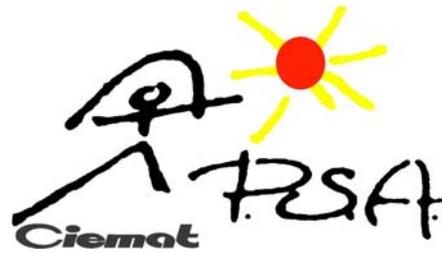


Plataforma
Solar de
Almería



Informe Anual
2004

ÍNDICE

Introducción	5
Presentación General	9
La PSA como gran instalación solar: Datos generales	9
Organigrama y Estructura Funcional	10
Recursos Económicos y Humanos	11
Entorno de Colaboración	13
Actividades de Formación	14
Instalaciones e Infraestructuras	15
Descripción General de la PSA.....	15
Instalaciones de Receptor Central: CESA-1 y CRS	16
Instalaciones con Concentradores de Foco Lineal: DCS, DISS, EUROTROUGH y LS3	19
Sistemas Disco-Stirling: DISTAL y EURODISH	22
El Horno Solar.....	24
Instalaciones de Química Solar y Desalación	26
Otras Instalaciones	30
Proyectos de I+D	35
Introducción	35
Energía Solar Térmica de Alta Temperatura	36
Tecnología de Colectores Cilindro-parabólicos	63
Aplicaciones Mediambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar	77
Eventos	99
Referencias Documentación.....	103
Lista de Acrónimos.....	111

Introducción

La actividad de la Plataforma Solar de Almería (PSA) durante el año 2004 ha estado estructurada en tres líneas principales de trabajo: tecnologías 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 el conocimiento acerca de 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 2004. Actualmente se organiza en tres Unidades, dos de ellas de investigación y una, denominada '**Gestión de la PSA**', dedicada a actividades horizontales de gestión de los recursos, formación y apoyo técnico a las otras dos unidades. Las dos unidades de investigación se denominan '**Sistemas de Concentración Solar (SCS)**' y '**Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar (AMES)**'. La nueva unidad SCS engloba las actividades de los antiguos proyectos de 'Energía Solar Térmica de Media Temperatura' y 'Energía Solar Térmica de Alta Temperatura'. Igualmente asume las actividades realizadas en las instalaciones de 'muy alta concentración', Horno Solar y DISTAL, que anteriormente dependían del 'Proyecto de Formación y Acceso'.

Sin embargo, y dado que nuestras actividades se llevaron a cabo durante el año 2004 con arreglo a la anterior organización, hemos considerado oportuno mantener la estructura de este informe según el modelo anterior.

En el proyecto de 'Energía Solar Térmica a Media Temperatura' se continúa trabajando en la consolidación de la tecnología de generación directa de vapor (GDV), mediante la cual se esperan reducir los costes de producción de electricidad termosolar en torno a un 30%. El núcleo principal de la actividad ha sido el proyecto europeo INDITEP cuyo fin último es producir la ingeniería de detalle de una planta GDV de 5 MWe. La experiencia acumulada durante años de operación continuada del lazo DISS de la PSA será un factor decisivo para el éxito de este proyecto.

Además, durante 2004 se han iniciado las actividades encaminadas a despejar la última incógnita tecnológica del proceso GDV: el almacenamiento térmico. El proyecto DISTOR cuenta con el apoyo de la Comisión Europea, comenzó oficialmente en febrero de 2004 y tendrá una duración de 45 meses. Su objetivo principal es el desarrollo de un sistema de almacenamiento térmico competitivo y adecuado para plantas solares que funcionen con generación directa de vapor en el campo solar. Para tal fin se desarrollará un sistema de almacenamiento basado en materiales con cambio de fase.

El objetivo económico del proyecto DISTOR es alcanzar un coste específico de 20 € por kWh de capacidad del sistema de almacenamiento, ya que esta cifra haría rentable su implementación comercial en plantas solares térmicas.

El proyecto DISTOR está coordinado por el DLR y cuenta con un total de 13 participantes de cinco países.

Por otra parte, la actividad desempeñada dentro del proyecto de 'Energía Solar Térmica de Alta Temperatura' ha estado enfocada hacia la colaboración tecnológica con las empresas promotoras de dos proyectos comerciales de plantas de torre. El primero de ellos se denomina PS10 y será la primera planta comercial de generación eléctrica termosolar en España, su inauguración está prevista en junio de 2006. La segunda iniciativa se denomina SOLAR TRES, se encuentra aún en fase de promoción y su apuesta es el uso de las sales fundidas como fluido de trabajo en un sistema de receptor central.

Los 'combustibles solares' tienen su hueco también dentro de la actividad de este grupo, con especial importancia asignada a la producción de hidrógeno. El proyecto emprendido junto con la empresa 'Petróleos de Venezuela' S.A. y el ETH de Zúrich ha concluido de forma satisfactoria su Fase I durante este año. Esta fase consistía en el estudio de la cinética del proceso químico necesario para transformar un petróleo pesado en hidrógeno a alta temperatura y la demostración de su viabilidad mediante el uso de energía solar concentrada.

La actividad de la PSA en general ha recibido un importante impulso gracias al nuevo marco legal definido en España para las plantas solares termoeléctricas, a partir de las condiciones definidas por los Reales Decretos 436/2004 (BOE del 27/03/2004) y 2351/2004 (BOE del 24/12/2004). Esta nueva legislación ha catalizado la actividad industrial española en relación con este tema. La prima de 0,18 €/kWh establecida para la electricidad producida mediante energía solar térmica, junto con la posibilidad de hibridar con gas natural entre un 12% y un 15% en base anual, ha afianzado el interés de los sectores inversor e industrial por las tecnologías de concentración solar. Estas atractivas condiciones han motivado que un elevado número de empresas hayan acudido a la PSA en busca de asesoramiento y colaboración.

Nuestra actividad en 'Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar' ha estado centrada en las líneas de destoxificación de aguas residuales y en la desalinización de agua de mar. Un hito importante ha sido la puesta en marcha de la primera planta comercial de destoxificación 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 2004 se ha constituido formalmente el 'Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar' (SolLAB). Este laboratorio virtual está 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. El acuerdo se firmó en octubre de 2004 y las tareas coordinadas han empezado ya a dar sus frutos, especialmente en los campos de la medida de flujo y temperatura y de la formación de estudiantes pre-doctorales. A fecha de hoy, el 'Paul Scherrer Institut' de Suiza ha solicitado formalmente su adhesión como nuevo socio de 'SolLAB'.

Por otro lado, la continuada e intensa colaboración con la Universidad de Almería (UAL) se ha visto 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 de laboratorios que, financiado parcialmente por el programa FEDER, se inaugurará en el campus de la UAL durante el año 2005.

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 centros de investigación de todo el mundo.

En este campo jugará un papel relevante el nuevo 'Centro de Atención a Visitantes' que durante este año ha venido dotándose de elementos demostrativos de las aplicaciones de la tecnología solar gracias a una subvención del Ministerio de Educación y Ciencia.

No quisiera terminar esta introducción sin agradecer el apoyo recibido por parte de la Dirección General del CIEMAT y el buen hacer y profesionalidad de todo el personal de la PSA durante este año.



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 División de I+D dentro de la estructura del Departamento de Energía del CIEMAT.

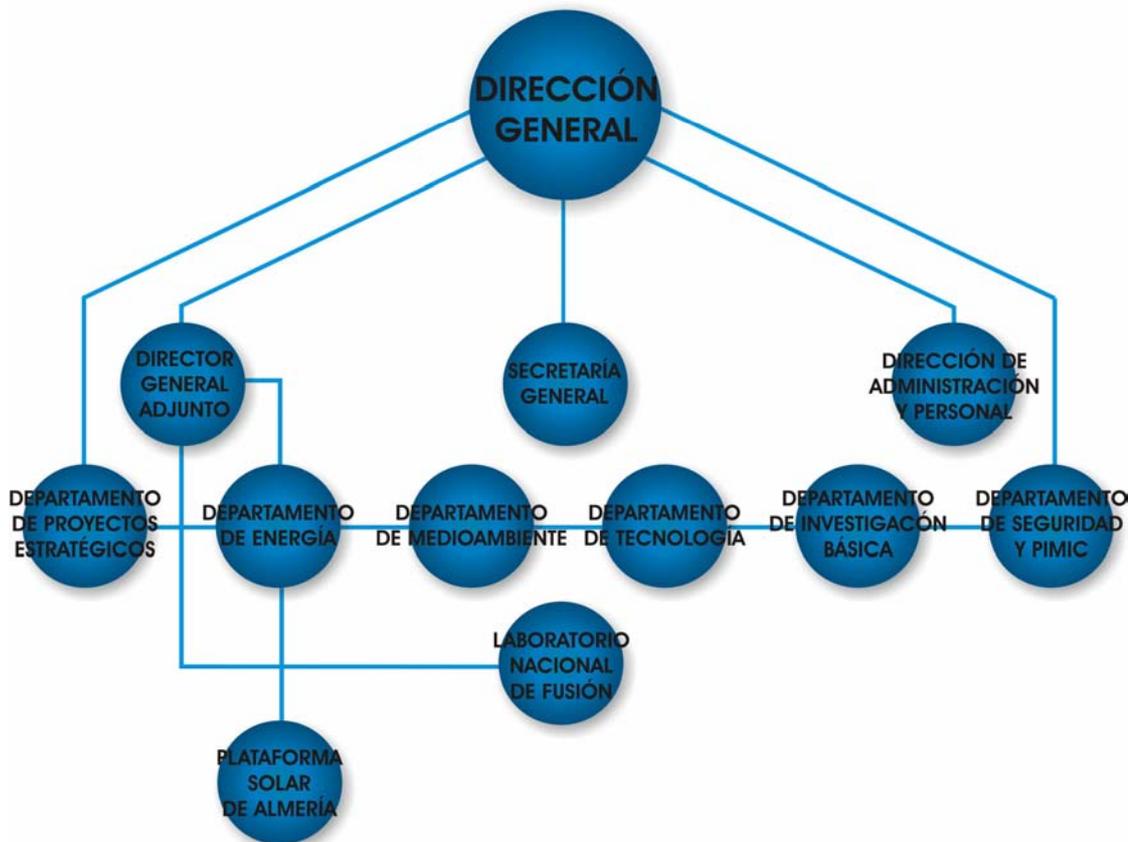


Figura 1. Integración de la PSA en la estructura orgánica del CIEMAT



Figura 2. Vista aérea de la Plataforma Solar de Almería

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.
- 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 española 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

Durante el año 2004 la actividad investigadora que se lleva a cabo en la Plataforma Solar de Almería se ha estructurado en torno a tres grandes proyectos o programas de investigación: 'Energía Solar Térmica de Media Temperatura', 'Energía Solar Térmica de Alta Temperatura' y 'Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar'. Los dos primeros están dedicados al desarrollo de nuevas y mejores formas de producir electricidad por medios termosolares y el tercero a explorar las po-

sibilidades 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 desalación de agua.

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 gran importancia para el desempeño diario de todas las líneas de actuación que tienen lugar en el centro.

Cada proyecto de I+D cuenta con un responsable 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 tres 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 unidades de apoyo general del CIEMAT ubicadas en Madrid.

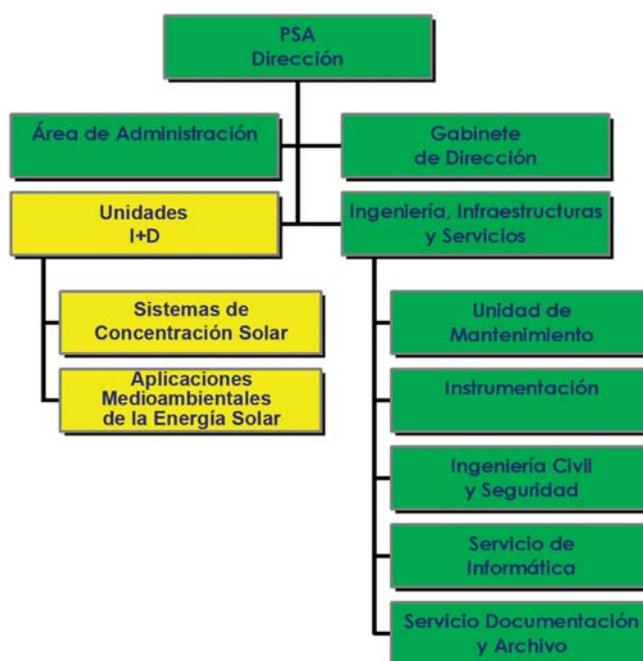


Figura 3. Organigrama PSA 2004. En color verde se recogen las unidades funcionales y servicios adscritos al Área de Dirección.

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 2004 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 de personal investigador externo que son gestionadas a través de la Dirección.

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 contratadas 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 contratadas 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.

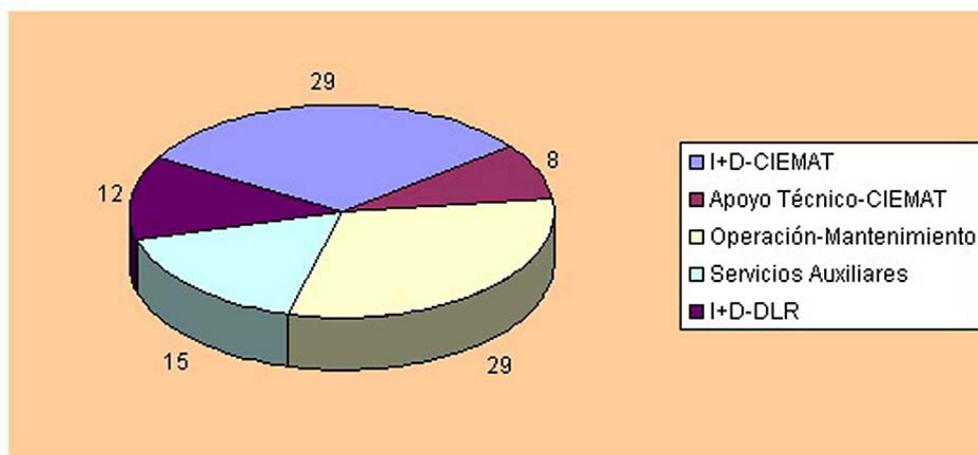


Figura 4. Distribución del personal que desarrolla su actividad en la PSA de forma permanente a Diciembre de 2004

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 integrada 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 gasto de la PSA, se puede apreciar una tendencia creciente, gracias en buena medida a una mayor captación de ingresos.

En la captación de ingresos procedentes de la Comisión Europea ha tenido una contribución destacable nuestro socio por defecto, el 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.

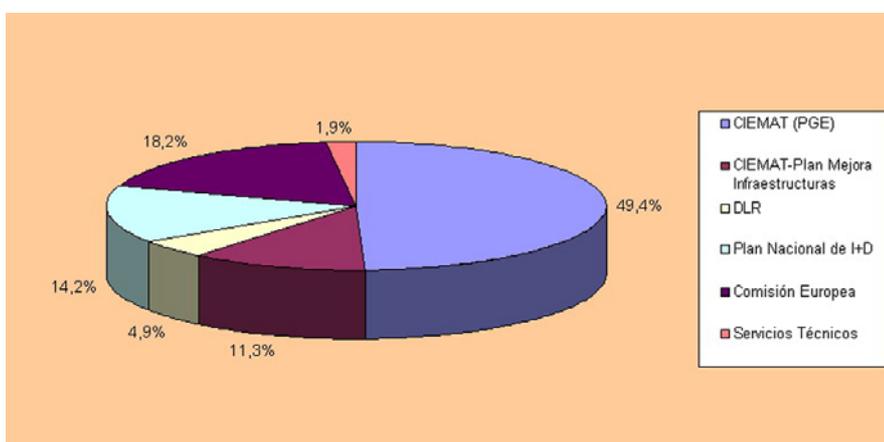


Figura 5. Distribución Ingresos PSA 2004

También han aumentado significativamente el número de proyectos financiados a través del Plan Nacional de I+D, en cuyas convocatorias se aprecia una apuesta creciente por las energías renovables y, en particular, por las tecnologías solares de concentración.

El presupuesto de la PSA alcanzó en el año 2004 los 5,87 M€ 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 heliostatos.

Entorno de Colaboración

Como se ha referido con anterioridad la PSA mantiene desde el año 1987 un Convenio de colaboración Hispano-Alemán 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 a 2005. Este nuevo Anexo IV viene aplicándose 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 la 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 2004 se ha constituido formalmente el 'Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar' (SolLAB). Este laboratorio virtual está 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. El acuerdo se firmó en octubre de 2004 y las tareas coordinadas han empezado ya a dar sus frutos, especialmente en los campos de la medida de flujo y temperatura y de la formación de estudiantes pre-doctorales. A fecha de hoy, el 'Paul Scherrer Institut' de Suiza ha solicitado formalmente su adhesión como nuevo socio de 'SolLAB'.

Con respecto a las actividades de formación, se cuenta 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.

En cuanto al 'Proyecto de Energía Solar Térmica de Media Temperatura', el entorno de colaboración sigue siendo bueno, ya que la PSA tiene relaciones contractuales con un amplio abanico de instituciones nacionales e internacionales. Se siguió colaborando en el año 2004 con las Universidades de Sevilla y Almería, con centros de investigación como INASMET, el DLR, el ZSW, el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems de Alemania, el Weizmann Institute of Science (Israel) y el Central Laboratory of Solar Energy and New Energy Sources (Bulgaria). Por lo que a la industria se refiere, hay intensos contactos con compañías eléctricas como IBERDROLA, industrias como SOLUCAR, GAMESA y la alemana FLABEG Solar Int. e ingenierías, como las alemanas FICHTNER y SBP, la española INITEC y las francesas DEFY Systemes y EPSILON Ingénierie.

En el ámbito de la 'Energía Solar Térmica de Alta Temperatura', y dentro del contexto nacional se ha mantenido la colaboración en proyectos con las empresas SOLUCAR,

SENER, IBERESE y SERLED, y universidades como las de la Universidad de Sevilla, Almería, la Politécnica de Cataluña y la UNED. Bajo el paraguas del VI 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).

Las nuevas líneas de investigación en 'combustibles solares y calor de proceso' han dado lugar al establecimiento de nuevas colaboraciones, entre ellas podemos citar al Instituto de Tecnología Cerámica de Castellón, a la empresa venezolana 'Petroleos de Venezuela, S.A.', al ENEA italiano ó al CEA francés.

El entorno de colaboración del Proyecto de Aplicaciones Químicas de la Radiación Solar ha experimentado a lo largo del año 2004 un fuerte impulso e incremento con relación a la ya extensa lista de instituciones con las que se estaba colaborando en años anteriores. En efecto, 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, Fundación Inasmet, las Universidades Autónoma de Barcelona, Complutense, Alcalá, La Laguna, ICP-CSIC y el Hospital de San Carlos de Madrid), el europeo (Weir-Entropie, Ao Sol, Hellenic Saltworks, Trailigaz, 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 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (México), Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentina), Universidad Nacional de Ingeniería (Perú), Tinep S.A. (México), ENIG (Túnez), Université de Fes (Marruecos), Projema, S.A. (Marruecos) y Photoenergy Center (Egipto).

Actividades de Formación

El principio que rige el **programa de formación de la Plataforma Solar de Almería** es la creación de una generación de jóvenes investigadores que puean contribuir al despliegue de la energía solar térmica en todas sus posibles aplicaciones. 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 PSA acerca de la tecnología solar térmica durante veinticinco años de realización de experiencias.

Las principales vertientes de dicho programa de formación han sido las siguientes:

- Gestión del programa de becas asociado al convenio anual con la Universidad de Almería (UAL): becas predoctorales y becas de prácticas.
- Becas 'Leonardo da Vinci', dotadas con fondos europeos para estancias de estudiantes de otros países.
- Gestión de diversos acuerdos específicos de colaboración educativa con otras entidades para enviar estudiantes a la PSA.

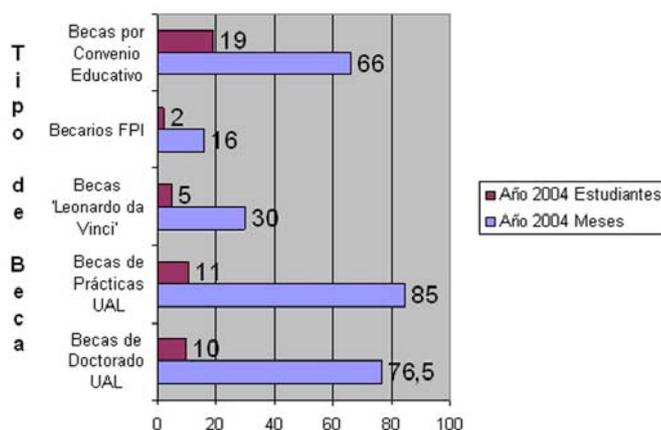


Figura 6. Becarios Año 2004

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/(m²·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:

- 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 cilindro-parabólicos.
- Una instalación con 6 sistemas disco-Stirling denominada DISTAL.

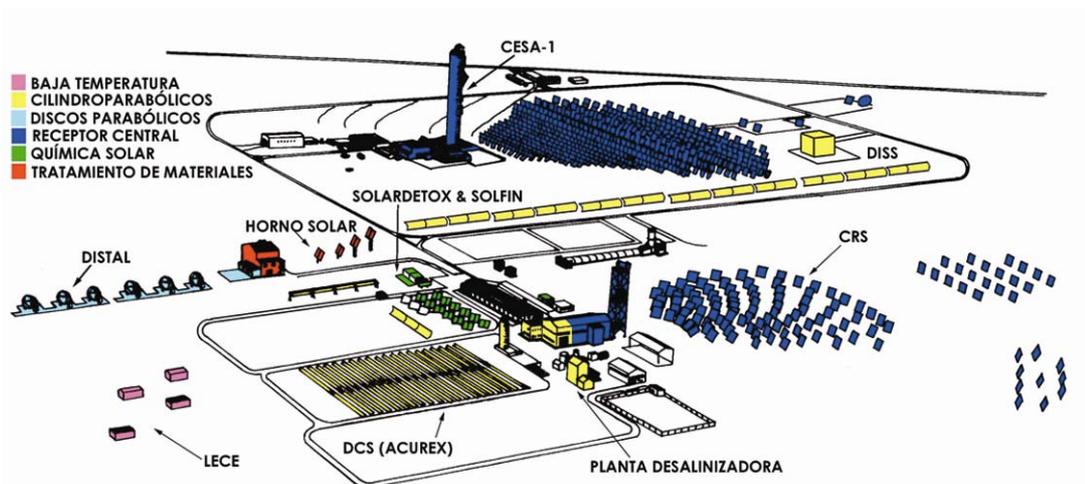


Figura 7. Ubicación de las principales instalaciones de ensayo de la PSA

- 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 cilindro-parabólicos con seguimiento en dos ejes y tres lazos de fotorreactores tipo CPC, para la realización de diferentes tipos de ensayos.
- 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_t

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 m² de superficie cada uno, distribuidos en un campo norte de 16 filas con 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 uni-



Figura 8. Vista lateral de la instalación CESA-I con las filas de helióstatos enfocando al nivel intermedio de ensayos (60 m.)

dades 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/m², se obtiene un flujo pico de 3,3 MW/m². 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_t

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 m² de superficie cada una. Existe un segundo campo con 20 helióstatos de 52 m² y 65 m² 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, siguiendo el concepto desarrollado y patentado por investigadores de la PSA. En la actualidad la instalación CRS dispone del primer campo de helióstatos 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.



Figura 9. Un helióstato del campo CRS con vista reflejada de la torre

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/m², la potencia térmica total del campo asciende a 2,7 MW y se obtiene un flujo pico de 2,5 MW/m². 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 resolución adquiere la correspondiente imagen.

Luego de un tratamiento exhaustivo de la imagen (sustracción del ruido electrónico de fondo, corrección de efectos aberrantes intro-



Figura 10. Vista frontal del banco de ensayos de receptores volumétricos en la torre CRS, en el rango de 200-400 kW.

ducidos 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, EUROTROUGH 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 ($100\text{ bar}/400^\circ\text{C}$) en los tubos absorbentes de colectores cilindro-parabólicos. 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 cilindro-parabólicos. 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 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 absorbentes.

La planta DISS consta de dos subsistemas: el Campo Solar con colectores cilindro-parabólicos, 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



Figura 11. Lazo DISS en operación

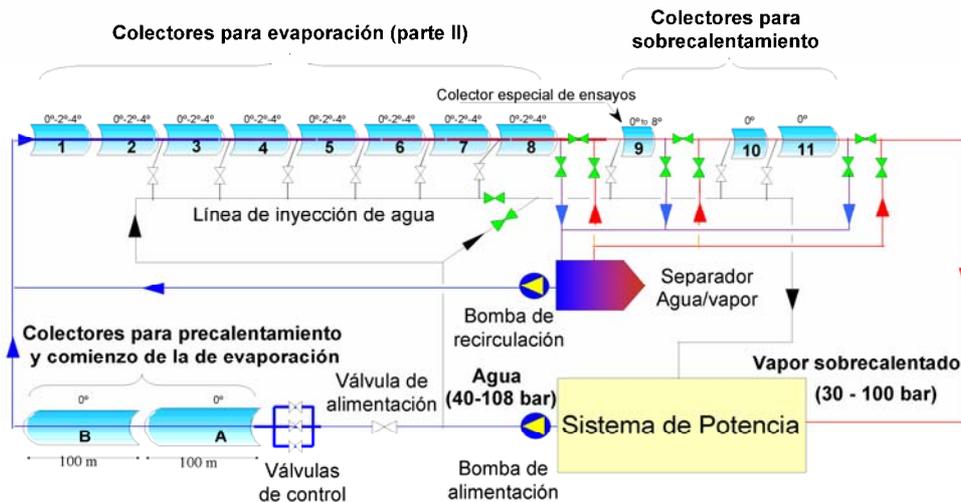


Figura 12. Esquema simplificado del lazo DISS existente en la PSA

tubos absorbedores de una fila de colectores cilindro-parabólicos de 665 m de longitud y 3.838 m² 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 hasta 100 bar de presión en función de las necesidades, y con cualquiera de los tres procesos básicos de generación directa de vapor: Recirculación, Inyección y Un-Solo-Paso, o combinación de ellos. (Habitualmente se trabaja en tres niveles diferentes de presión, 30, 60 y 100 bar.) Además, está dotada de una completa gama de instrumentos que permiten una total monitorización del sistema.

La figura adjunta (Figura 12) 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 cilindro-parabólicos cuyo eje de rotación está 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.

EL LAZO DE ENSAYOS 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



Figura 13. Vista general del lazo HTF

La Instalación original constaba 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 m². 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 1 m³ 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 400 kW. Dispone de un variador de velocidad para controlar el caudal de aire.
- Bomba centrífuga de aceite, con un caudal de hasta 8,3 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 inicial, se instaló posteriormente el primer prototipo de colector EUROTROUGH. El diseño de colector EUROTROUGH 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 EUROTROUGH, los socios participantes en dicho proyecto han cedido este primer prototipo al CIEMAT para su operación y mantenimiento, pasando a formar parte de los sistemas 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 m².

También dentro del lazo de ensayos, se ha insertado, para su evaluación, un sistema de almacenamiento térmico compuesto por cuatro módulos de 5 m³ y 10-15 toneladas cada uno, dos de hormigón y dos de material cerámico, y 175 kWh de capacidad de almacenamiento por módulo (Figura 14). La conexión está realizada de tal manera que se permite llevar a cabo la carga o la descarga de forma conjunta o de forma independiente en cada módulo.



Figura 14. Haces tubulares correspondientes a los módulos de almacenamiento

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.

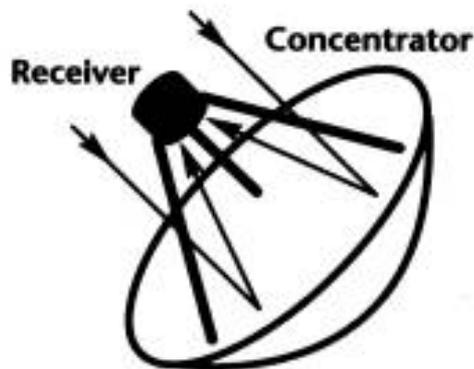


Figura 15. Esquema de funcionamiento de un disco parabólico con motor Stirling en el foco.

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_t de energía, con un motor Stirling SOLO V160 capaz de generar hasta 9 kW_e 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 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.



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

DISTAL II

Como primer intento por obtener un sistema de mejores prestaciones y coste por kW_e 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_t. 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. El motor Stirling también ha evolucionado, tratándose ahora del modelo SOLO V161, de 10 kW_e. El sistema de seguimiento es ahora del tipo acimut-elevación, con lo que se consigue la operación automática en modo orto-ocaso.

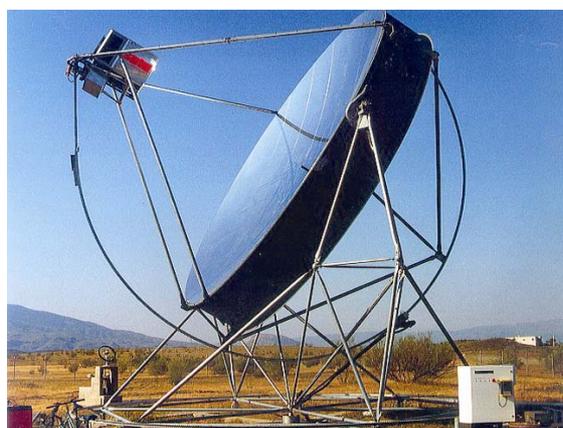


Figura 17. Unidad DISTAL II

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:



Figura 18. EuroDISH vista desde delante y detrás

- 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.

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.

HELIOSTATOS

Los helióstatos 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 helióstatos 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 helióstatos constan de 16 facetas de tipo sandwich de 3,35 m², lo que da un total de 53,58 m². 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 m² 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.

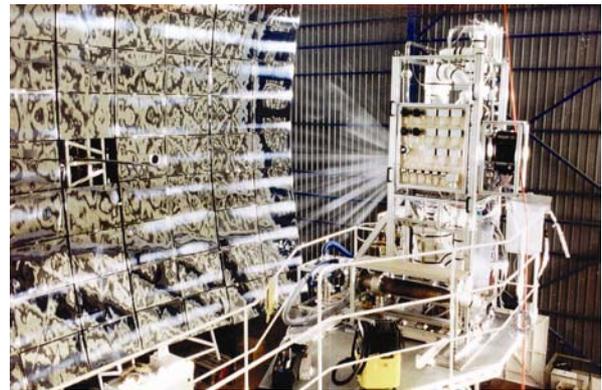


Figura 19. Disco concentrador del Horno Solar (izquierda) y receptor en operación dentro de la zona focal (derecha).

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°.

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.



Figura 20. 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

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^2 son: Pico de flujo: 3000 kW/m^2 , potencia total: 58 kW , y diámetro del foco: 23 cm [Neumann, 1994].

Instalaciones de Química Solar y Desalación

INSTALACIONES 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 PTC (Parabolic Through Collectors) está compuesta por 4 colectores solares (128 m^2) 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^2 . 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 absorbente (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 .



Figura 21. Vista general de las cinco instalaciones para aplicaciones de Fotoquímica Solar basadas en colectores CPC instaladas en la PSA.

Posteriormente se han instalado otras plantas piloto basadas en CPCs (colectores cilindro-parabólico 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 varias plantas empleando este tipo de colectores. La más antigua consta de tres módulos (1, Figura 21) cada uno con una superficie de 3 m^2 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 absorbente es de 108 L (volumen iluminado). En 2002 se instaló un nuevo colector (2) de 15 m^2 , conectado a su vez a una bomba de recirculación y un tanque que permite realizar experimentos con 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 (3) 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^2) de cada reactor están montados en una plataforma fija inclinada 37° (latitud local). El volu-

men 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.

En el contexto del Proyecto Europeo CADOX (ver Proyectos de I+D, Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar) y debido a los desarrollos realizados durante su ejecución se ha instalado un nuevo sistema que no solo cuenta con un nuevo colector solar (4) tipo CPC (con diámetro de fotoreactor de 50 mm, más adecuado para aplicaciones de foto-Fenton) con su correspondiente tanque y bomba de recirculación (75 L), sino que además acoplado con él se ha instalado un reactor biológico (150 L, basado en biomasa fijada sobre matriz inerte) y un sistema de ozonización (50 L, con un sistema de producción de ozono de hasta 15 g O₃/h)). Todo ello monitorizado (pH, T, ORP, O₂, caudal, H₂O₂, O₃) y controlado (pH, T, caudal) por un ordenador. Además, se han instalado también pequeños prototipos (5) para aplicaciones de desinfección como parte de las tareas de los Proyectos europeos SOLWATER y AQUACAT (ver Proyectos de I+D, Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar).

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.

El laboratorio de Química Solar de la PSA es un edificio de unos 75 m² 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, autoclave, campana de flujo laminar, incubador para microbiología 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 (espectrómetro de masas) con Sistema de Purga y Trampa (análisis de volátiles disueltos en agua), Cromatógrafo 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, titrador automático. 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).

PLANTA SSPS-DCS CON SISTEMA DE DESALACIÓN SOLAR

Esta instalación posee una potencia nominal de 1,2 MW_t, y consta de cuatro subsistemas principales, tal y como se muestra en el esquema adjunto:

- Un campo solar compuesto por 40 captadores cilindro-parabólicos del modelo ACUREX 3001, agrupados en 10 filas paralelas, con 4 captadores conectados en serie en cada fila. La superficie total de captación solar de este campo es de 2.672 m², y el eje de giro de los captadores está orientado en la dirección este-oeste. El fluido utilizado es aceite sintético Santotherm 55, que posee una temperatura máxima de trabajo de 300°C. Los tubos absorbentes 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_t para una radiación solar directa de 950 W/m². El suministro medio diario de energía térmica es de 6,5 MWh_t.
- Un sistema de almacenamiento térmico consistente en un tanque termoclino de aceite, con un volumen interior de 115 m³ y una capacidad de almacenamiento de

Capacidad:	3 m ³ /h
Número de efectos:	14
Agua de entrada:	Agua de mar (35.000 ppm)
Producto:	Destilado (≤5 ppm)
Factor de rechazo:	62%
Caudal:	8 m ³ /h (alimentación)
Consumo térmico:	63 kWh/m ³ (PR>9)
Consumo eléctrico:	3 kWh/m ³
Potencia solar:	1,2 MWp
Rendimiento:	50% (campo solar)
Superficie:	2.762 m ² de colectores
Tipo de colectores:	ACUREX 3001 (CCP)
Almacenamiento:	5 MWh (Santotherm 55)
Temp. máx. (aceite):	300 °C



Figura 23. Especificaciones técnicas de la planta de desalación solar SOL-14 de la PSA y detalle del campo de colectores ACUREX

5 MWh_t, 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_e, 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.
- Un sistema de desalación consistente 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 m³/h de destilado, el consumo de la planta es de 190 kW_t, con un factor de rendimiento (número de kg de destilado producidos por cada 2.300 kJ de energía térmica consumida) mayor de 9. La concentración salina del destilado se sitúa en torno a 5 ppm. El gradiente nominal de temperatura entre la primera etapa y la última 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 opera-

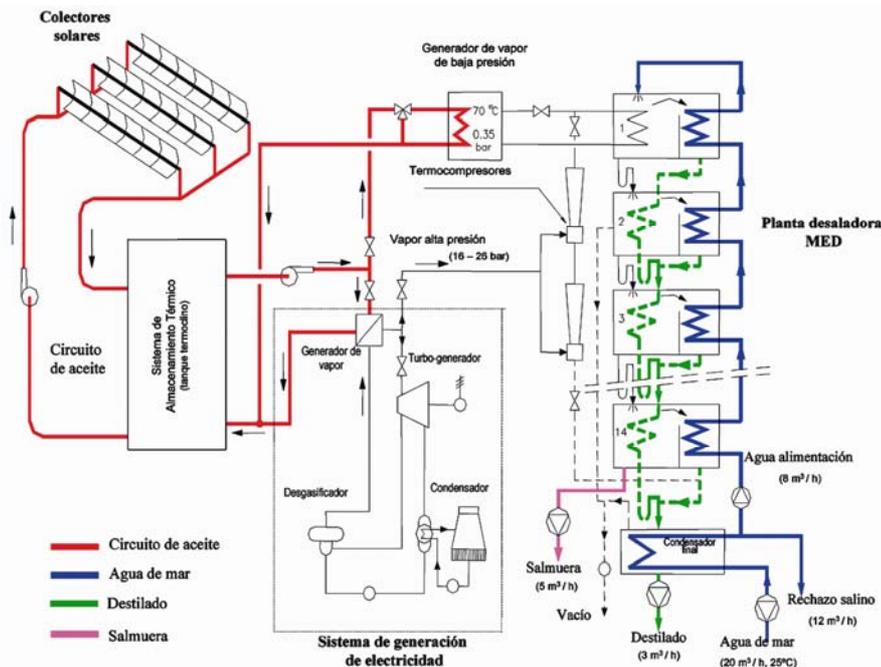


Figura 22. Esquema general de la planta SSPS-DCS

ción 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 – H₂O) 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.

PLATAFORMA DE ENSAYO DE CAPTADORES 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 captadores solares estáticos, con



Figura 24. Vista de la plataforma de ensayo de captadores solares estáticos

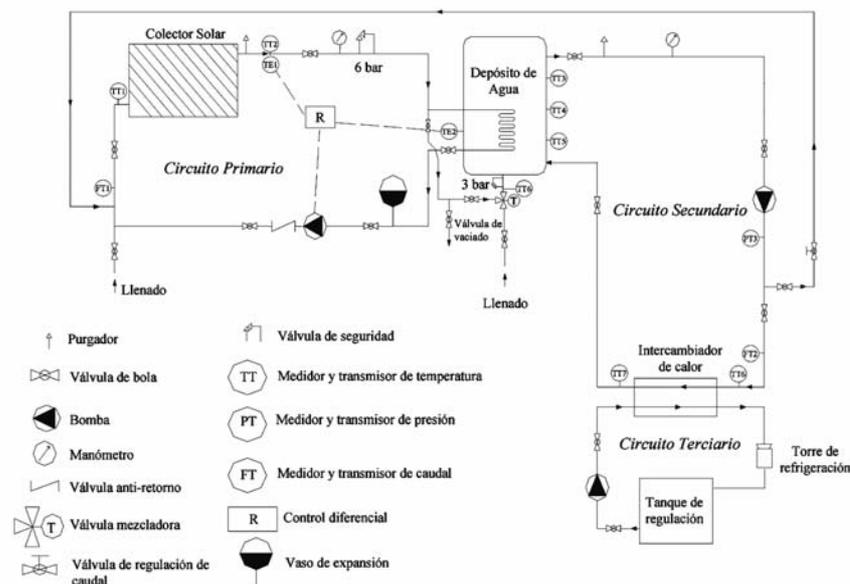


Figura 25. Esquema general de la plataforma de ensayo de captadores solares estáticos

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 captador 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.

LABORATORIO DE DETOXIFICACIÓN EN FASE GASEOSA

Distintos tipos y configuraciones de reactores y catalizadores - planos, monolíticos, tubulares- ensayados en fase gaseosa. El laboratorio de Detoxificación en Fase Gaseosa se encuentra situado en el edificio E42.P1.10 de (I Departamento) LA DIVISIÓN 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 de ensayos mediante simulador solar por lámpara de xenón. La instrumentación analítica asociada está constituida, básicamente por CG, MCG y CG-MS asociado a un sistema de desorción térmica PROGRAMADA, FTIR, más analizadores de SO₂ y CO₂ en continuo.

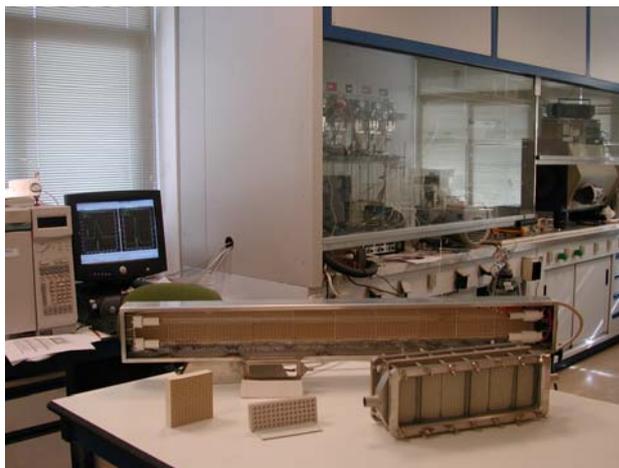


Figura 26. Distintos tipos y configuraciones de reactores y catalizadores –planos, monolíticos, tubulares- ensayados en fase gaseosa

Otras Instalaciones

ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA PSA

Desde 1988, la PSA cuenta con una estación meteorológica centrada en la medida de la radiación solar integrada (radiación global, directa y difusa) así como otras variables meteorológicas genéricas (temperatura, velocidad y dirección de viento, humedad y presión atmosférica, precipitación acumulada...). En los últimos años, la PSA ha acometido la tarea de remodelar esta antigua estación, remodelándola en su totalidad. Dado el marco de las instalaciones en las que nos encontramos, se ha pretendido desde el comienzo de esta iniciativa, que esta nueva estación cumpla los más estrictos requisitos de calidad y precisión en la medida de la radiación solar. Además, como un identificativo global de haber alcanzado este objetivo, la nueva configuración de la estación se ha hecho siguiendo las directrices de la Organización Meteorológica Mundial en el marco de la red: Baseline Surface Radiation Network. Durante el año 2004, finalmente se ha conseguido la admisión de la nueva estación radiométrica de la PSA como candidata oficial a esta red.

Además de las medidas de las variables meteorológicas mencionadas, como característica destacable, cabe mencionar la medida de la distribución espectral de la radiación solar.

A continuación se detallan los instrumentos y equipos que componen la nueva estación radiométrica. Básicamente se trata de dos grupos:

- Equipos de medida de la estación radiométrica
- Laboratorio de calibración espectral.

La estación radiométrica consta de tres partes fundamentales:

- 1) Los instrumentos de medida. Los instrumentos de medida de la estación meteorológica de la PSA son instrumentos de la mas alta gama dentro de la medida de la radiación solar. Todos los sensores de radiación están ventilados y calefactados, así como disponen adicionalmente de la medida de la temperatura del sensor. Estos equipos permiten tener una muy buena información de la radiación solar y de las variables atmosféricas más generales, y pueden ser utilizados para el filtrado de datos de entrada y en la validación de modelos espectrales.
- 2) El espectrorradiómetro, que por su distinta naturaleza debe de ser considerado como una instalación independiente. Se trata de un prototipo desarrollado por Instrument System bajo especificaciones del CIEMAT. Este equipo, basado en el SP320D, que incorpora un fotomultiplicador y un detector de sulfuro de plomo, registra la distribución espectral de la radiación solar en todo su rango espectral (de 200 a 2500 nm), frente a la mayoría de los equipos que trabajan únicamente en una parte del espectro (generalmente el visible o el ultravioleta). Al equipo base, se le ha acoplado un intercambiador de manera que



Figura 27. Visión global de la nueva estación radiométrica de la PSA



Figura 28. Sondas del espectrorradiómetro para medida de la radiación global y difusa dispuestas en el seguidor solar



Figura 29. Detector del espectrorradiómetro con el switcher de conexión de las tres sondas

puede trabajar con tres sondas alternativamente, las cuales se han dispuesto en un seguidor solar para registrar la radiación solar global, directa y difusa respectivamente. Aunque es configurable, el equipo se ha programado de manera que registre un espectro (con una resolución aproximada de 2 nm en el UV y visible y de 10nm en el IR) en unos 7 minutos, y cada 10 minutos cambia de sonda de medida. De esta manera disponemos de una base de datos de 2 espectros de cada una de las variables de la radiación solar cada hora. Este equipo opera de manera continua desde la salida hasta la puesta de sol, lo cual es otra diferencia importante frente a las usuales campañas de medida de la distribución espectral de la radiación solar.

- Sensores dispuestos en el mástil de 30m:
 - 30 m: Pirgeómetro orientado hacia el suelo (IR reflejada)
 - Piranómetro orientado hacia el suelo (rad. global reflejada)
 - Anemómetro y veleta.
 - 10 m: Anemómetro y veleta.
 - Sensor de humedad y temperatura
 - 2 m: Anemómetro
 - Sensor de humedad y temperatura
- Sensores en la terraza de la caseta:
 - Seguidor solar 2AP Kipp&Zonen
 - Piranómetro (rad. global)
 - Piranómetro sombreado (rad. difusa)
 - Pirheliómetro.
 - Pirheliómetro de cavidad absoluta
- Bancada de instrumentación:
 - Pirgeómetro
 - Pluviómetro
 - Barómetro
 - Psicrómetro
 - Piranómetro de UVA



Figura 30. Vista del mástil de 30 metros

- 3) El sistema de adquisición de datos. Se trata de un sistema desarrollado específicamente en Visual C++ utilizando tarjetas IMP. La frecuencia de adquisición de datos es de 1 sg. promediando al minuto, a la hora y diariamente. Los datos se almacenan en un sistema de gestión de base de datos relacional que se describe a continuación y durante la adquisición se aplican entre otros una serie de filtros físicos. Cabe destacar el hecho de que este sistema de adquisición de datos está conectado a un GPS que actúa como servidor de tiempo de alta precisión.
- 4) La base de datos. Está desarrollada en Microsoft SQL Server 2000 y se han desarrollado herramientas de consulta en ASP para poder explotarla al través de internet. Las tablas de esta base de datos se crean dinámicamente, por lo que es posible dar de alta y de baja sensores en la estación sin necesidad de modificar la estructura de la misma. El tamaño de la base de datos se ha estudiado para poder tener acceso simultáneo a 10 años de datos al segundo y promediados de todas las variables registradas.

El laboratorio de calibración espectral:

El laboratorio de calibración espectral ha sido adquirido recientemente y se espera que su instalación se realice en el primer trimestre de 2005. La necesidad del laboratorio de calibración surge de la manera con la que se ha diseñado la operación del espectrorradiómetro. Estos equipos suelen trabajar en campañas de medida específicas, y en este caso se recomienda su recalibración anual. En nuestro caso, dado que queremos que el equipo opere de manera continua, se hacía preciso la calibración in situ, para:



Figura 31. Nueva construcción adosada al edificio del CESA-1 para albergar el Laboratorio de Calibración Espectral.



Figura 32. Estación radiométrica en el CEDER (Soria)

- Minimizar las pérdidas de datos por los periodos de calibración (en torno a 1 mes si hay que mandar el equipo al fabricante).
- Poder aumentar las calibraciones según se estime conveniente: semestral, trimestral, mensualmente o semanalmente.

El laboratorio de calibración ha sido especialmente diseñado para permitir la calibración en todo el rango de 200 a 2500 nm.

Para su ubicación, ha sido preciso construir unas nuevas dependencias que cumplan los requisitos para la ubicación del mismo.

Finalmente, además de las instalaciones reseñadas en la PSA, durante 2004 se ha instalado otra nueva estación radiométrica básica en las dependencias del CIEMAT en el CEDER (Soria). Esta nueva estación permitirá un mejor conocimiento de la radiación solar así como la comparación con las medidas en la PSA. La definición de la misma se ha hecho de manera similar a la de la PSA, siendo la dotación mucho más sencilla y contando de una caseta en la terraza de la cual se han dispuesto sensores en un seguidor solar 2AP:

- Piranómetro (rad. global)
- Piranómetro sombreado (rad. difusa)
- Pirheliómetro.
- Pirheliómetro de cavidad absoluta

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 importan-



Figura 33. Vistas del LECE: Células, edificios referencia y chimenea solar

cia 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.

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 investigadora de la PSA en general ha recibido un importante impulso gracias al nuevo marco legal definido en España para las plantas solares termoeléctricas, a partir de las condiciones definidas por los Reales Decretos 436/2004 (BOE del 27/03/2004) y 2351/2004 (BOE del 24/12/2004). Esta nueva legislación ha catalizado la actividad industrial española en relación con este tema. La prima de 0,18 €/kWh establecida para la electricidad producida mediante energía solar térmica, junto con la posibilidad de hibridar con gas natural entre un 12% y un 15% en base anual, ha afianzado el interés de los sectores inversor e industrial por las tecnologías de concentración solar. Estas atractivas condiciones han motivado que un elevado número de empresas hayan acudido a la PSA en busca de asesoramiento y colaboración.

En el proyecto de 'Energía Solar Térmica a Media Temperatura' han continuado las actividades relativas a la tecnología de generación directa de vapor (GDV), mediante la cual se esperan reducir los costes de producción de electricidad termosolar en torno a un 30%. El núcleo principal de la actividad ha sido el proyecto europeo INDITEP cuyo fin último es producir la ingeniería de detalle de una planta GDV de 5 MWe. La experiencia acumulada durante años de operación continuada del lazo DISS de la PSA será un factor decisivo para el éxito de este proyecto.

Además, durante 2004 se han iniciado las actividades encaminadas a despejar la última incógnita tecnológica del proceso GDV: el almacenamiento térmico. El proyecto DISTOR, financiado parcialmente por la Comisión Europea, tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema de almacenamiento térmico competitivo y adecuado para plantas solares que funcionen con generación directa de vapor en el campo solar. Para tal fin se desarrollará un sistema de almacenamiento basado en materiales con cambio de fase.

Dentro del proyecto de 'Energía Solar Térmica de Alta Temperatura' la actividad investigadora ha estado enfocada hacia la colaboración tecnológica con las empresas promotoras de dos proyectos comerciales de plantas de torre. El primero de ellos se denomina PS10 y será la primera planta comercial de generación eléctrica termosolar en España, su inauguración está prevista en junio de 2006. La segunda iniciativa se denomina SOLAR TRES, se encuentra aún en fase de promoción y su apuesta es el uso de las sales fundidas como fluido de trabajo en un sistema de receptor central.

La producción de hidrógeno por la vía termoquímica tiene su hueco también dentro de la actividad de este grupo. Durante este año el proyecto emprendido junto con la empresa 'Petroleos de Venezuela' S.A. y el ETH de Zürich ha concluido de forma satisfactoria su Fase I. Esta fase ha consistido en el estudio de la cinética del proceso químico necesari-

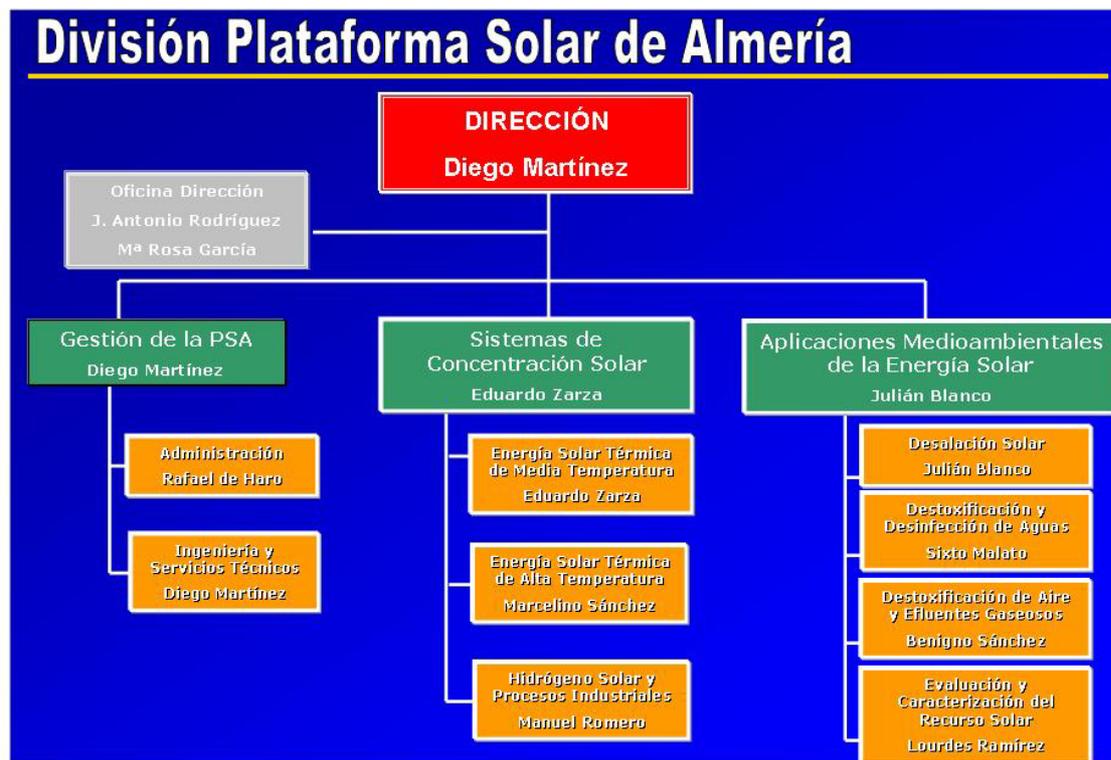


Figura 34. Proyectos que configuran la actividad de I+D en la PSA

rio para transformar un petróleo pesado en hidrógeno a alta temperatura y la demostración de su viabilidad mediante el uso de energía solar concentrada.

Nuestra actividad investigadora en el proyecto 'Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar' ha estado centrada en las líneas de destoxificación de aguas residuales y en la desalinización de agua de mar. Un hito importante ha sido la puesta en marcha de la primera planta comercial de destoxificación 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.

Energía Solar Térmica de Alta Temperatura

Los dos hechos que cabría resaltar en el año 2004 por su relevancia en la propia organización y definición de las actividades de I+D en alta temperatura dentro de la PSA son la publicación del nuevo Real Decreto 436/2004 de regulación de la producción eléctrica en el régimen especial y la decisión estratégica interna de unificar en la PSA todos los grupos de investigación en alta concentración solar y alta temperatura bajo un único Proyecto denominado Energía Solar Térmica de Alta Temperatura (ESTAT).

El R.D. 436/2004 de 12 de marzo (BOE nº 75 de 27 de marzo de 2004) por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, recoge buena parte de las ambiciones y demandas de conjunto de los sectores científico, tecnológico e industrial interesados en promover el desarrollo e implantación comercial de la energía solar termoeléctrica en España. Con la aprobación de un esquema de tarifas premiadas para la solar termoeléctrica que suponen en la práctica el reconocimiento de un precio de venta tres veces superior al de mercado, se sientan las bases para dinamizar

el sector y desbloquear una serie de proyectos que han venido gestándose desde el año 1998 con una participación activa de la PSA. Las tecnologías de torre con receptor central y de disco-Stirling han visto revitalizarse el interés de las empresas e ingenierías, y como consecuencia la PSA se ha situado en el punto de mira de las mismas, como tractor tecnológico y polo difusor del conocimiento y experiencia en la materia. Dos proyectos con tecnología de torre y receptor central, el proyecto PS10 liderado por la empresa SOLUCAR y el proyecto SOLAR TRES promovido por la empresa SENER, han visto relanzada su ejecución en el primer caso y su promoción en el segundo, y tendrán una influencia decisiva en los próximos años para demostrar la madurez comercial de estos sistemas.

Los sistemas de torre o de tecnología de receptor central 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 son complejos. 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.

Los altos flujos de radiación incidente (típicamente entre 300 y 1.000 kW/m²), 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 horas 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 demostrar 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 sus 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 de I+D centrada en el desarrollo tecnológico de componentes y sistemas con el fin de reducir costes y mejorar la eficiencia de los mismos.

Los sistemas disco-Stirling son, sin lugar a dudas, la tecnología con un mayor potencial a largo plazo, por sus altas eficiencias y su modularidad que los hacen extraordinariamente atractivos desde el punto de vista de la planificación de la inversión. Son pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado a un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son superiores (1.000-4.000) y los rendimientos de conversión solar a electricidad pueden llegar a alcanzar el 30%. La limitación en cuanto a su potencia unitaria (por debajo de 25 kW) es, no obstante, un obstáculo para muchas aplicaciones que pretenden producción eléctrica a gran escala. Las experiencias de operación se restringen a unas pocas unidades por lo que el riesgo tecnológico es alto. También es limitada la experiencia sobre fiabilidad a partir del número de horas acumuladas de ensayo. Se trata además de un sistema que precisa establecer un sistema de producción en masa para reducir costes de utillajes, sobre todo en los motores, por lo que los costes de la inversión para las primeras plantas son altos y la incertidumbre en su reducción también más elevada, resultando ineludible una estrategia industrial que contemple la exportación hacia un mercado amplio para garantizar su viabilidad. La PSA atesora la mayor experiencia en operación y mantenimiento de estos sistemas con más de 45.000 horas acumuladas en 6 unidades y es el centro Europeo de ensayos de referencia para este tipo de concentradores solares.

Pero el año 2004 ha servido también para contribuir a la maduración de otras aplicaciones y diseños de los dispositivos y sistemas de alta concentración solar, que se salen de del clásico esquema de producción termoeléctrica, como la de determinados procesos industriales dentro de un proyecto nacional denominado SOLARPRO, el desarrollo de sistemas fotovoltaicos de alta concentración, en este caso en un proyecto Europeo denominado HICON-PV, o la producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos pesados en colaboración con la compañía petrolera Venezolana PDVSA y el prestigioso Instituto Tecnológico Federal de Zurich (ETH). A este rango de aplicaciones se suma la permanente vocación de la PSA de trabajar en el desarrollo de mejores herramientas de medida, ensayo y evaluación de componentes y sistemas de alta concentración solar. Como ejemplos de esta línea de actuación se puede mencionar el proyecto MEPSOCON donde se trabaja, en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México, en el diseño, construcción y caracterización de un calorímetro de cavidad para la medición de flujos radiativos concentrados en sistemas de concentración solar.

Con el fin de optimizar las capacidades, instalaciones y recursos humanos existentes, para atender de una manera más eficiente la cada vez más creciente demanda de colaboración externa y un mayor abanico de aplicaciones, se inició en enero de 2004 una estrategia de concentración de los mismos, mediante la integración en un único Proyecto interno de Investigación, ESTAT. Dicho Proyecto incorpora las instalaciones, capacidades y recursos del antiguo Proyecto de Tecnología de Receptor Central, y parte de los correspondientes al Proyecto de Formación y Acceso, en particular las actividades y desarrollos ligados a las tecnologías de discos parabólicos y horno solar.

El objetivo que se pretende alcanzar en esta nueva línea de I+D es desarrollar conocimiento, tecnologías y aplicaciones en el ámbito de la energía solar a alta temperatura y alta concentración fotónica. Este objetivo general se estructura en los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollo de componentes y sistemas para alta temperatura y alta concentración solar, más eficientes y baratos, especialmente de aquéllos que tienen un mayor peso en el coste total de la planta (concentrador, receptor, almacenamiento térmico), y la simplificación de la O+M asociada mediante altos niveles de automatización.
- Mejora de conocimiento en disciplinas fundamentales, desarrollo de herramientas, metodologías, procedimientos, códigos e instrumentación, así como de instalaciones

de ensayo de referencia, tanto para el núcleo de investigación propia en alta concentración solar como para su aplicación en proyectos industriales.

Facilitar el desarrollo y la consolidación de un sector industrial, mediante la transferencia de tecnología, la elaboración de estudios de viabilidad, la realización de Hojas de Ruta en I+D y la definición de actuaciones tendentes a eliminar las barreras no tecnológicas que dificultan la penetración

- de esta tecnología.
- Optimizar la integración de los dispositivos de concentración solar en esquemas y sistemas de conversión eléctrica más eficientes, tanto en ciclos termodinámicos como en sistemas de conversión directa.
- Caracterizar las propiedades ópticas y térmicas, así como la durabilidad, de los materiales de uso en las distintas tecnologías de alta concentración solar y alta temperatura.
- Desarrollar tecnologías de tratamiento de superficies y síntesis de materiales mediante el uso de altas concentraciones fotónicas y altas temperaturas.
- Desarrollar tecnologías de producción de hidrógeno solar por vía termoquímica, así como de otros combustibles solares, valorización de combustibles con energía solar y solarización de procesos industriales a alta temperatura.

El programa de trabajo interno del Proyecto ESTAT se articula en tres grandes líneas de investigación que se recogen en la Figura 35:

- 1) Componentes y sistemas de alta concentración solar
- 2) Tecnología de materiales e instrumentación
- 3) Combustibles solares y procesos industriales

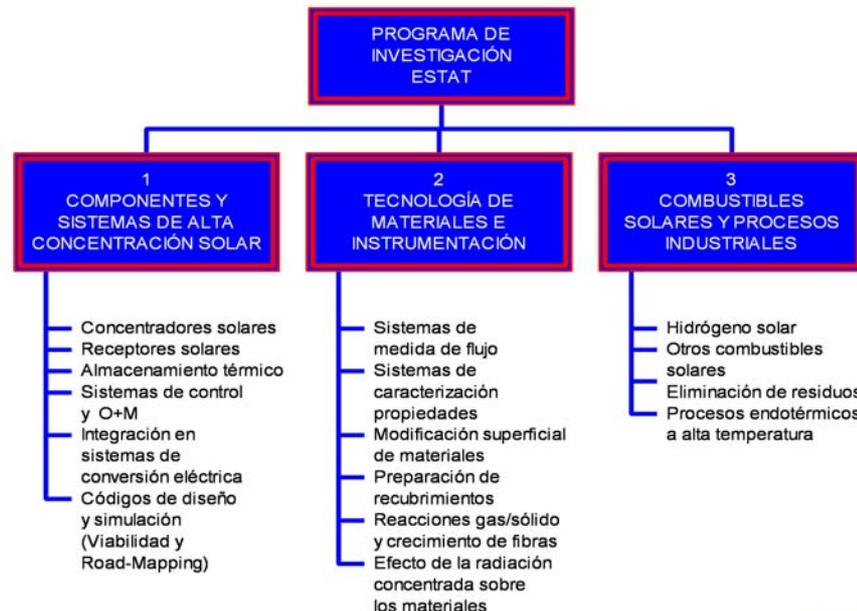


Figura 35. Estructura temática y agrupaciones de conocimiento en el Proyecto de investigación en energía solar térmica a alta temperatura (ESTAT)

La actividad de investigación llevada a cabo por el grupo de ESTAT en la PSA durante el año 2004 se ha nucleado en torno a los siguientes proyectos específicos, financiados todos ellos en convocatorias públicas de I+D:

Componentes y sistemas de alta concentración solar.

- 1) Proyecto: "ECOSTAR: European Concentrated Solar Thermal Roadmap". Ref. 502578. Convocatoria: Energy1- Sustainable Energy Systems – 6º PM. Entidad financiadora: CE DG Investigación). Entidades participantes: CIEMAT (España), DLR, VGB

- (RFA), CNRS (Francia), WIS (Israel), IVTAN (Rusia), ETH (Suiza). Coordinador: R. Pitz-Paal(DLR). Investigador principal CIEMAT: M. Romero. Periodo: Diciembre 2003/Abril 2005.
- 2) Proyecto: "PS10: 10 MW Solar Thermal Power Plant for Southern Spain"; Ref. NNE5-1999-00356. Convocatoria: 1999/C 77/13. Entidad financiadora: CEC- DG XVII (Programa ENERGIE). Investigador principal: Rafael Osuna (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT, SOLUCAR (España), DLR, Fichtner (RFA). Periodo: Julio 2001/Julio 2004.
 - 3) Proyecto: SOLPRO-II – Promoción de una central solar termoeléctrica de capacidad de generación de 2,8 GWh de electricidad al año (1,5 MW de potencia) en Almería. Ref. FIT-120000-2004-93. Convocatoria PROFIT-2004, Ministerio de Educación y Ciencia. Investigador Principal: Valerio Fernández (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT, CENTER y SOLUCAR (Enero 2004/Junio 2005).
 - 4) Proyecto "SOLAR TRES: Molten Salt Solar Thermal Power 15 MWe Demonstration Plant"; Ref. NNE5/369/2001. CEC- DG XVII (Programa ENERGIE). GHERSA, SENER, CIEMAT (España), Saint Gobain (Francia), Boeing (EEUU), Alstom (República Checa). Diciembre 2002/Diciembre 2007.
 - 5) Proyecto: "HICONPV: High Concentration PV Power System". Ref. 502626. Convocatoria: Energy1- Sustainable Energy Systems – 6º PM. Entidad financiadora: CE DG Investigación). Entidades participantes: Solúcar Energía (Coordinador), DLR, Fraunhofer ISE, PSE, CIEMAT, RWE, Ben Gurion University, EDF, University of Malta. Investigador principal CIEMAT: M. Sánchez. Periodo: Diciembre 2003/Diciembre 2006.
 - 6) 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 XII (Programa ENERGIE). Entidades participantes: CIEMAT, SOLUCAR, IBERESE (España), STC (Dinamarca), DLR (RFA) y FORTH/CEPRI (Grecia). Investigador principal: Rafael Osuna (SOLUCAR). Periodo: Febrero 2000/Junio 2004.
 - 7) 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 (España), DLR, KAM, G+H, Isolite (Alemania). Coordinador: R. Buck (DLR). Periodo (Enero 2002/Septiembre 2004).
 - 8) Proyecto: "Megahelio - Sistema de Seguimiento de Helióstatos de Gran Superficie Reflectorante para Planta Termo-Solar" Ref. FIT-120102-2002-19. Convocatoria PROFIT-2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador Principal: Juan Enrile (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT y SOLUCAR (Enero 2003/Abril 2004).
 - 9) 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).
 - 10) Proyecto: "PCHA: Primer campo de heliostatos 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 2002/Abril 2004).
 - 11) 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 2003/Diciembre 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.

Tecnología de materiales e instrumentación para altos flujos.

- 1) Proyecto: "MEPSOCON: Medida de potencia solar concentrada en plantas eléctricas de receptor central" . Ref. DPI2003-03788. Convocatoria: Plan Nacional de I+D

2002, Programa de Producción Industrial. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador principal: Jesús Ballestrín (CIEMAT). Entidades: CIEMAT. Periodo: Dic. 2003 a Dic. 2006.

- 2) Proyecto: "SolarPRO: Desarrollo de un sistema de aporte de calor a partir de radiación solar concentrada: ensayo y caracterización de su aplicación a diversos procesos productivos y de eliminación de residuos a alta temperatura". Ref. REN2003-09247-C04-XX/TECNO .Convocatoria: Plan Nacional de I+D 2002, Programa de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador principal: Diego Martínez (CIEMAT). Entidades: CIEMAT, ITC, Univ. Sevilla, UPC. Periodo: Nov. 2003 a Nov. 2006.

Combustibles solares y solarización de procesos industriales.

- 1) Proyecto: "SolarPRO: Desarrollo de un sistema de aporte de calor a partir de radiación solar concentrada: ensayo y caracterización de su aplicación a diversos procesos productivos y de eliminación de residuos a alta temperatura". Ref. REN2003-09247-C04-XX/TECNO .Convocatoria: Plan Nacional de I+D 2002, Programa de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador principal: Diego Martínez (CIEMAT). Entidades: CIEMAT, ITC, Univ. Sevilla, UPC. Periodo: Nov. 2003 a Nov. 2006.
- 2) Proyecto: "INNOHYP: Innovative medium-long term Routes for Hydrogen Production – Coordinated Action". Ref. 513550. Convocatoria: Energy1- Sustainable Energy Systems – 6º PM.Entidad financiadora: CE DG Investigación). Entidades participantes: CEA (Francia), DLR (Alemania), ENEA (Italia), USFD (UK), EA y CIEMAT (España), CSIRO (Australia), JRC (Holanda). Coordinador: F. Le Naour (CEA). Investigador principal CIEMAT: M. Romero. Periodo: Junio 2004/julio 2006.
- 3) PROYECTO SOLTER-H: "Generación de hidrógeno a partir de energía solar térmica de alta temperatura". Ref. FIT-120000-2004-66. Convocatoria PROFIT-2004, Ministerio de Educación y Ciencia. Investigador Principal: Javier Brey (Hynergreen). Entidades participantes: CIEMAT y Hynergreen (Enero 2004/Abril 2005).
- 4) Proyecto: "SOLAR THERMOCHEMICAL APPLICATION FOR PRODUCTION OF SYNGAS + H2 FROM HEAVY CRUDE OIL". Convenio específico de colaboración PDVSA (Venezuela), ETH (Suiza), CIEMAT (España). Investigador principal: Juan C. De Jesús (PDVSA), A. Steinfeld (ETH), M. Romero (CIEMAT). Duración: Ene. 2003/Jun. 2007.

COMPONENTES Y SISTEMAS DE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR.

Se trata de la línea de investigación más consolidada, ya que hereda los objetivos y recursos del antiguo proyecto en Sistemas de Receptor Central. Sus principales agrupaciones de actividades se recogen en la Figura 2. En el amplio abanico de proyectos podemos encontrar actividades en estudios de viabilidad y participación en proyectos integrales de demostración que suponen la contribución activa de la PSA a la transferencia de tecnología e implementación comercial de los sistemas de alta concentración solar. Esto sin abandonar la participación en proyectos de integración con nuevos esquemas novedosos, el desarrollo de componentes específicos como el receptor solar, el concentrador solar, sistemas de control y la puesta a punto de herramientas de diseño y simulación.

En la Figura 36 se puede apreciar con claridad como aquellas actividades más próximas a la aplicación en plantas comerciales, los estudios de viabilidad y el desarrollo de nuevos esquemas de producción y receptores solares, son objeto de financiación por parte de la CE, mientras que los desarrollos de helióstatos y concentradores solares son financiados en planes nacionales y con colaboración de nuestras empresas. Por último, aquellos temas más ligados a la mejora de capacidades o herramientas son financiados con fondos propios de CIEMAT.

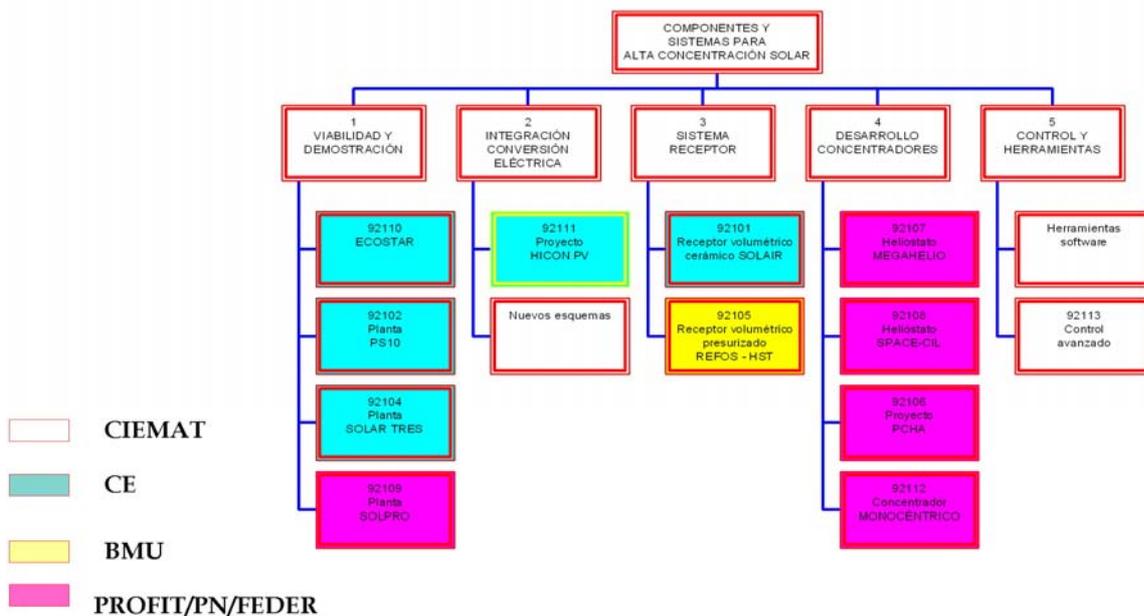


Figura 36. Agrupación de proyectos de I+D en la línea de Componentes y Sistemas de Alta Concentración Solar. El color denota la fuente de financiación.

El proyecto ECOSTAR:

Este proyecto de corta duración ha recogido como objetivo la realización de una hoja de ruta sobre la tecnología de concentración solar para producción térmica de electricidad. El trabajo fue coordinado por DLR (Centro Aeroespacial Alemán), y contó con la participación de los principales centros de investigación y desarrollo en Europa de la tecnología de concentración solar (CIEMAT, ETH, IVTAN, WIS, CNRS), así como con el asesoramiento de la Asociación Europea de Productores Eléctricos (VGB). En concreto el estudio se centró en la determinación de aquellas innovaciones técnicas con un mayor impacto en la penetración de los sistemas solares termoeléctricos.

La metodología de análisis desarrollada seleccionó siete tipologías de plantas de referencia (cilindro-parabólicos tipo SEGS, cilindro-parabólicos con generación directa de vapor, centrales de torre con receptor de agua/vapor, centrales de torres con sales fundidas, centrales de torre con receptor volumétrico refrigerado por aire, centrales de torre híbridas con receptor volumétricos presurizado y sistemas disco/Stirling). La comparativa se llevo a cabo para una planta tipo de 50 MW, adaptada a cada una de las tecnologías, y el coste promediado de producción de la energía eléctrica (LEC o Levelized Electricity Cost) fue el parámetro de comparación.

Tal y como puede apreciarse en la Figura 37, es esperable que en el horizonte del año 2020 se consiga una reducción del 60% en el LEC, siendo de este valor casi la mitad el correspondiente a la introducción de innovaciones tecnológicas. En todos los casos estas reducciones de costes se consiguen mediante una combinación de tres o más innovaciones tecnológicas como el aumento de tamaño, la introducción de nuevos materiales y estructuras en los concentradores solares, la integración de sistemas de almacenamiento y receptores solares avanzados y la implantación de ciclos termodinámicos más eficientes. El diseño actual más optimizado en costes sería el basado en central de torre con sales fundidas, en zona intermedia se situarían los sistemas basados en agua/vapor, tanto cilindroparabólicos como torre, y por último estarían los sistemas basados en receptores volumétricos de aire, donde se identifica y una mayor camino a recorrer en optimización de eficiencias y costes.

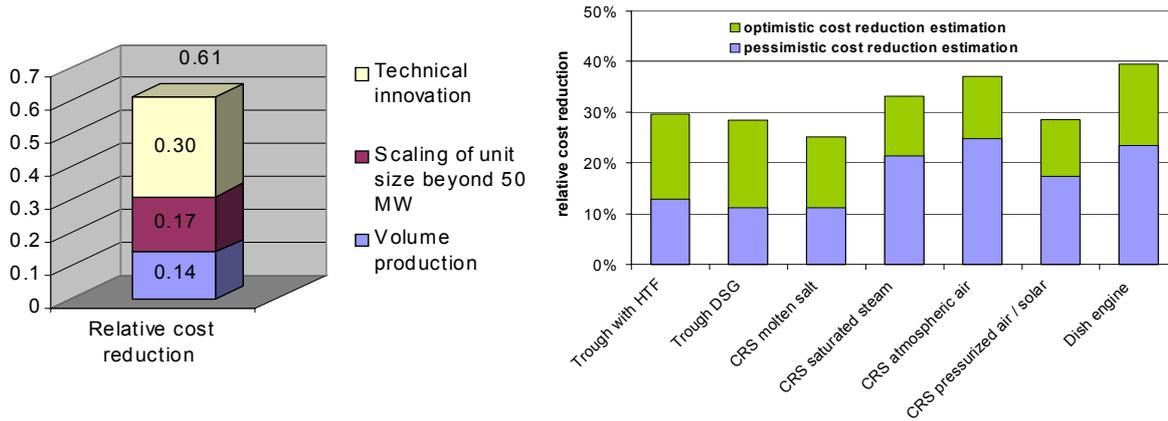


Figura 37. Influencia de la innovación tecnológica en la reducción de costes para distintos sistemas solares termoeléctricos.

Proyectos de demostración comercial: PS10, SOLPRO Y SOLAR TRES

El proyecto PS10, iniciado en el año 1999, ha tenido un largo recorrido hasta nuestros días y despierta numerosas expectativas dentro de la comunidad solar, al ser la primera iniciativa de torre solar comercial dentro y fuera de nuestro país. 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 Educación y Ciencia.

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 bruta de 11 MW. Esta planta está siendo instalada en el municipio de Sanlúcar la Mayor, en la provincia de Sevilla, y se espera que su inauguración tenga lugar en junio de 2006. 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 1,2 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. 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 m² cada uno) desarrollados por la compañía SOLUCAR y una torre de 100 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 absorbedor será de tubos verticales independientes y flexible para absorber las expansiones térmicas y las deformaciones mecánicas sin sufrir roturas ni fugas. 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 bloque de potencia trabaja 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.

Para periodos de 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, fundamentalmente en la revisión del nuevo receptor solar diseñado por la empresa TECNICAL, 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.

Con todo, el proyecto PS10 constituye sólo un primer paso, donde la etapa lógica que sigue pasa por el desarrollo de una planta que permita mediante el uso de una segunda cavidad, la obtención de vapor sobrecalentado. El esquema consistente en el uso de centrales de torre con doble cavidad (una para vapor saturado y otra sobrecalentado) ha sido analizado dentro de un proyecto PROFIT denominado SOLPRO. El esquema SOLPRO ha sido retenido por SOLUCAR para su futura implementación en nuevas plantas de agua/vapor.

Cabe mencionar que dentro de la participación en proyectos de demostración comercial, se ha visto en el año 2004 relanzar la promoción del proyecto SOLAR TRES. Este proyecto es promovido por la empresa SENER y tiene por objeto el desarrollo y construcción de una planta de 17 MW basada en la tecnología de refrigeración por sales fundi-



Figura 38. Vista aérea de la planta PS10 durante la etapa de construcción (Cortesía SOLUCAR)

das. En el año 2004, se han iniciado pasos muy importantes para la revitalización del proyecto, como ha sido la renegociación de la subvención de la Comisión Europea (5 millones de euros), el desarrollo de un helióstato específico por parte de SENER y que ha sido ensayado en la PSA, y la puesta en marcha de un acuerdo de desarrollo tecnológico con CIEMAT para desarrollar un nuevo concepto de receptor solar a ensayar en la Plataforma Solar de Almería. El proyecto SOLAR TRES basa su rentabilidad en el uso de un gran sistema de almacenamiento térmico, equivalente a 15 horas a plena carga, que permitirán en los meses de verano una operación continuada las 24 horas del día.

Nuevos esquemas de producción: El proyecto HICON-PV

La integración de la energía térmica captada en el receptor solar dentro de esquemas más eficientes de producción de electricidad constituye una línea permanente de investigación en la PSA. Esta aproximación se lleva a cabo tanto mediante la búsqueda de opciones o esquemas de producción termoeléctrica basada en ciclos termodinámicos más avanzados, como en la incorporación de sistemas de producción eléctrica por conversión directa (fotovoltaica, MHD, termomiónica, etc.).

El proyecto HiconPV (High Concentration PV Power System) tiene como objetivo el desarrollo, fabricación y ensayo de un dispositivo de concentración fotovoltaica capaz de trabajar con flujos de radiación solar de 1000 kW/m². HiconPV es un proyecto financiado por la Comisión Europea dentro de su Sexto Programa Marco, en la prioridad 6.1.3.2.3: Conceptos avanzados en tecnologías renovables-Concentración FV. El comienzo efectivo del proyecto tuvo lugar en febrero de 2004, con una reunión de lanzamiento organizada por la PSA en Almería. Los participantes son Solúcar Energía (Coordinador), DLR, Fraunhofer ISE, PSE, CIEMAT, RWE, Universidad de Ben Gurion University, EDF y Universidad de Malta. El objetivo último de HiconPV es conseguir desarrollar una tecnología de concentración fotovoltaica que pueda alcanzar un coste por sistema de 1€/W_p en 2015. Por un lado el proyecto pretende la selección de sistemas de concentración solar adecuados para alta concentración fotovoltaica, así como su adaptación a los estrictos requisitos de distribución de flujo de radiación y de temperatura en el módulo FV. Esta tarea está encomendada a CIEMAT y DLR, con la colaboración de PSE en la definición del sistema de refrigeración de las células. En cuanto al receptor solar fotovoltaico, el reto tecnológico más visible dentro del proyecto es la obtención de un módulo integrado monolítico (MIM) y la construcción de receptor solar basado en módulos compactos formados por estos MIM, siendo Fraunhofer ISE el responsable. Las células de Si se ven limitadas a factores de concentración por debajo de 500x y a eficiencias en módulos del 20%, por lo que la propuesta de HiconPV se basa en el uso de células de GaAs que permiten altos flujos y proporcionan mayores eficiencias. En el caso de células multi-unión se pueden alcanzar eficiencias del 35%, si bien HiconPV se centra en una primera etapa donde el módulo utilizará células de una sola unión. El objetivo fijado por ISE para el año 2004 fue la obtención de varios prototipos de MIM con un tamaño de 17x25 mm. Estos MIM serán ensayados en el horno solar de DLR en Alemania, el horno solar de la PSA en Almería y el disco solar de Ben Gurion en Israel.

Durante el año 2004, la actividad de PSA en el proyecto HiconPV se ha centrado en la simulación y optimización óptica de diversos tipos de concentradores solares como discos parabólicos, fresnel o centrales de torre. En particular se ha identificado una opción de diseño óptico mediante el uso de un concentrador esférico modificado que permite la obtención de perfiles de flujo solar concentrado más plano y aceptable por el módulo FV. Por otra parte la PSA ha dedicado un esfuerzo importante a la preparación de las infraestructuras necesarias en el horno solar para el ensayo y caracterización de los MIM y módulos compactos FV, incluyendo un sistema avanzado de cortina rápida, la modificación del sistema de control, la instrumentación y el sistema de rechazo de calor.

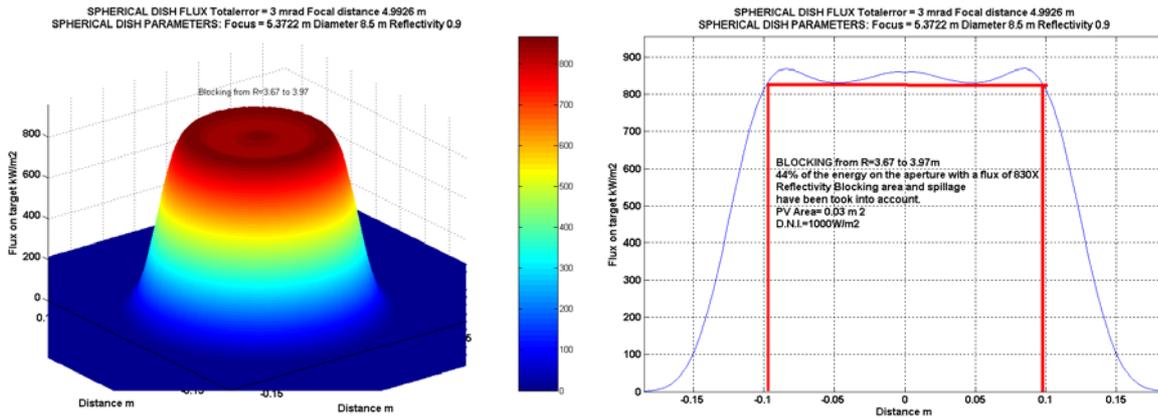


Figura 39. Perfil de flujo obtenido para un concentrador esférico modificado de 8,5 m de diámetro y con un error total de 3 mrad y una distancia focal de 5 m. El perfil plano se garantiza en una región focal de 20 cm de diámetro.

Receptores volumétricos: Proyectos SOLAIR y HST

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 (España), HelioTech (Dinamarca), DLR (Alemania) y CPERI (Grecia). CIEMAT tiene un papel muy activo en este proyecto, liderando los ensayos y evaluación de los prototipos, realizando el análisis y optimización 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 se inició en el año 2000, y ha finalizado su andadura en junio de 2004, habiéndose completado la última campaña de ensayos con un prototipo de receptor solar de 3 MW que fue colocado en el banco de ensayos TSA. El banco de pruebas se situaba en la cota de 80 m de la torre CESA-I de la PSA.

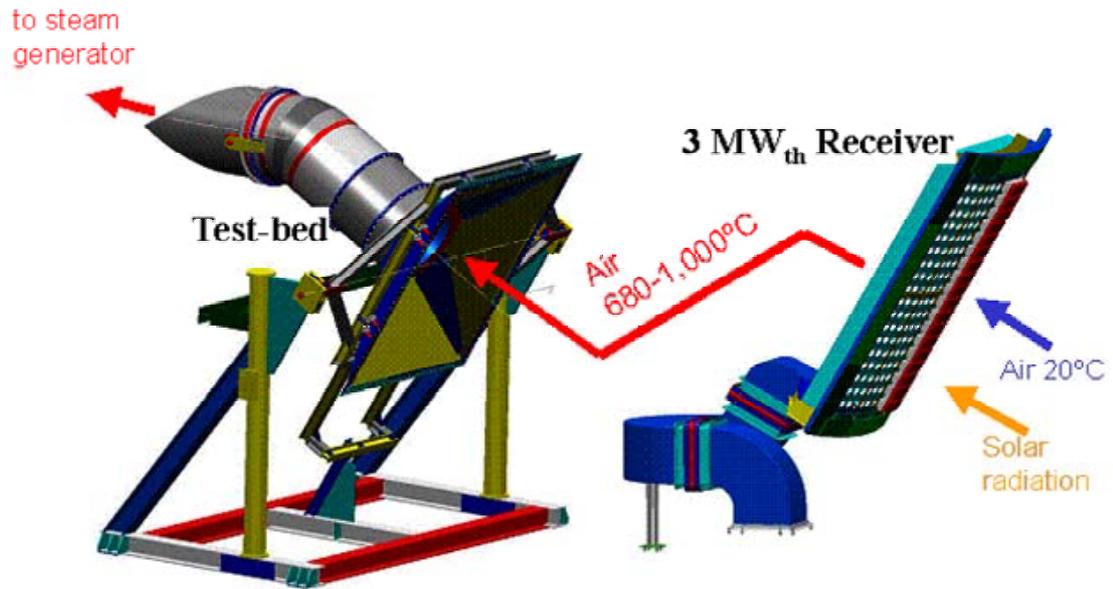


Figura 40. Despiece del banco de ensayos SOLAIR-3000 con representación del flujo y radiación solar de entrada

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, no obstante, por un deficiente pegado de algunas de las partidas de conjuntos copa/absorbedor. El proyecto SOLAIR finalizó en julio de 2004, habiéndose completado un total de 150 horas de operación solar útiles. Por este motivo los socios decidieron extender la fase de ensayos hasta finales de 2004 y poder acumular así más horas de experiencia operacional. Se llevaron a cabo 188 ensayos con medida de flujo solar a temperaturas de aire de salida de 600, 650, 700 y 750°C, para carga nominal y a media carga. Las eficiencias térmicas obtenidas se recogen en la Figura 7, donde se puede apreciar que son muy sensibles a la potencia y a la temperatura. Para la potencia nominal objetivo de 3 MW, se obtuvo una eficiencia del 72%, moviéndose entre el 70 y 75% para valores nominales de operación con temperatura de 750°C y flujos de 370-520 kW/m². En aplicaciones que requieran temperatura de aire algo inferiores (alrededor de 600°C) se obtienen eficiencias superiores al 85%.

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. Su atractivo conceptual y el receptor de 3 MW ensayado han motivado que la Comisión Europea seleccionara el proyecto SOLAIR como uno de los tres proyectos de referencia en energías renovables dentro del Programa de Energía del V Programa Marco, que fueron presentados a los medios de comunicación Europeos en Marzo de 2004.

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 vino representada por el proyecto SOLGATE. El proyecto SOLGATE fue la primera iniciativa con éxito en la conexión de un

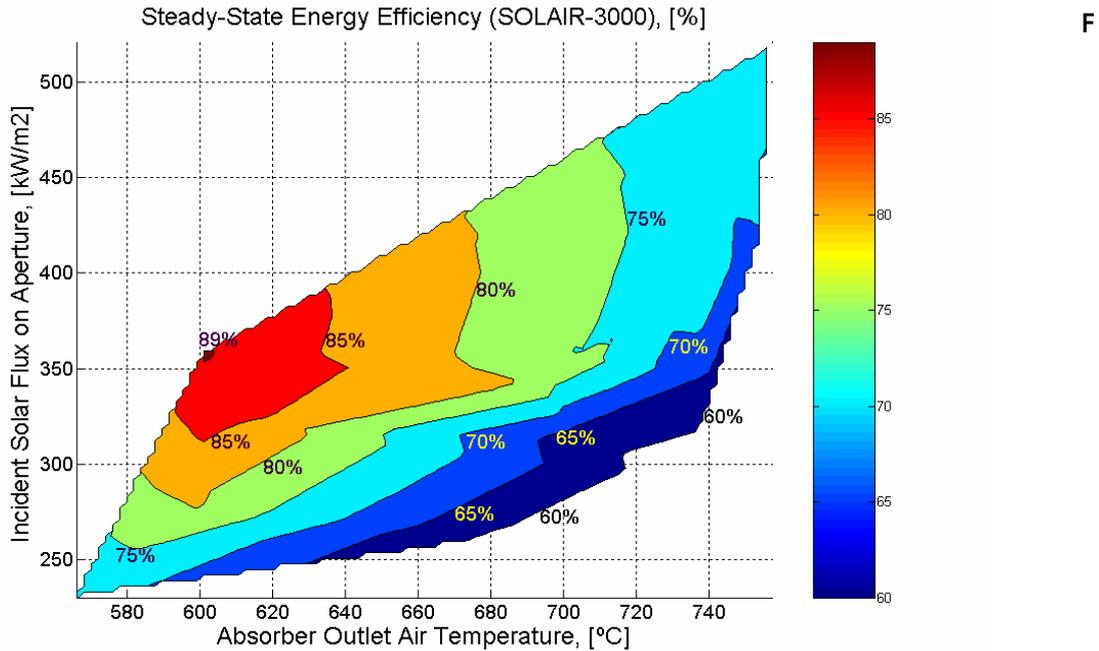


Figura 42. Mapa de eficiencia para el receptor volumétrico de aire SOLAIR-3000 en función del flujo solar incidente y la temperatura del aire de salida

receptor solar volumétrico presurizado con una turbina de combustión. SOLGATE, contó con financiación de la CE y, además de DLR y CIEMAT, fueron también participantes en el mismo las empresas ORMAT (Israel), SOLUCAR (España) y TUMA (Suiza).

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. El proyecto SOLGATE demostró la viabilidad técnica de la integración y consiguió operar el cluster solar, suministrando aire caliente por encima de 900°C que era inyectado en la cámara de combustión de la turbina. Una vez que el proyecto SOLGATE ha finalizado, la 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 y entre cuyos objetivos principales se encuentra el mejorar la eficiencia del sistema con la inclusión de un nuevo receptor solar cerámico de alta temperatura que permita alcanzar una temperatura de 1100°C en el aire de salida. CIEMAT participa en dicho proyecto, coordinado por DLR, cuyo objetivo en el año 2004 fue la integración del nuevo absorberdor cerámico (Figura 43) y la operación y ensayo con la turbina OST3 a temperaturas más elevadas. Una vez realizado el montaje y puesta a punto del nuevo receptor y su instrumentación y periféricos asociados, la campaña de ensayo se comenzó se llevó a cabo en los meses de junio, julio y agosto de 2004. Los ensayos determinaron sobrecalentamiento en algunas zonas de la ventana de cuarzo debido a un funcionamiento deficiente en el sistema de refrigeración de la ventana, y eso impidió que se pudiera alcanzar la temperatura de 1100°C pretendida. En el mes de agosto se consiguió fijar el límite superior de ensayos, obteniéndose una temperatura de 1030°C. A 1000°C el receptor solar superó una eficiencia térmica del 75%. En base a los resultados obtenidos, se puede concluir la viabilidad técnica de un sistema operando a 1000°C y 6 bar, cuya aplicación resulta de gran interés en sistemas de cogeneración y de producción eléctrica distribuida.

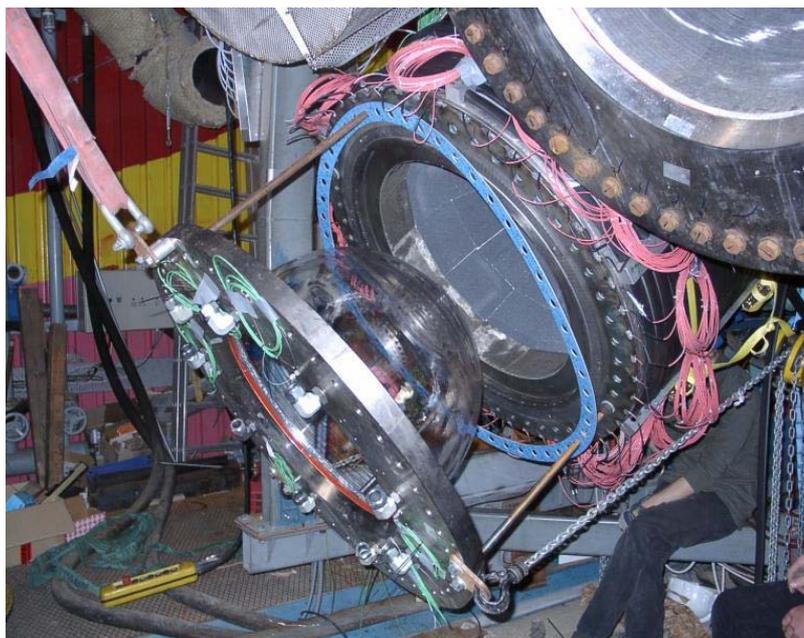


Figura 43. Detalle de la fase de montaje del nuevo aborbedor cerámico de 1100°C y conexión de la instrumentación y ventana de cuarzo.

Helióstatos y concentradores solares

El heliostato Sanlúcar-120 representa la referencia más madura y comercial en la actualidad. Las estimaciones de SOLUCAR cifran su coste por debajo de los 180€/m² para una producción de unas mil unidades (150€/m² 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 y principios del 2004 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 diseños Megahelio y Space-Cil. Asimismo se realizó en el dicho periodo el estudio conceptual de un concentrador monocéntrico cuya novedad era la posibilidad de alcanzar altas temperaturas y concentraciones utilizando un concentrador estático y un receptor solar cilíndrico móvil. El objetivo del proyecto Megahelio era desarrollar un nuevo prototipo de seguidor de heliostato con una superficie útil en torno a los 200 m² para plantas termosolares, que consiga mejorar hasta en un 30% el coste de referencia del heliostato 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 imagen superior (Figura 44). En total, tenemos 48 espejos de 3220 mm x 1355 mm, lo que nos da un área reflectante total de 209,43 m². Esta es la superficie reflectante neta, pero la superficie total expuesta al viento es mayor, unos 215 m². En la estructura portante destaca la viga metálica en celosía horizontal (de color azul) de casi 26 m 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€/m², con un potencial de reducción de más de un 30% sobre este precio de referencia, estos objetivos también parecen alcanzables por el heliostato Sanlúcar-120, en base a posibles mejoras en su mecanismo de accionamiento. Por ese motivo, se ha optado por no continuar con la fase de construcción y ensayo de un prototipo.

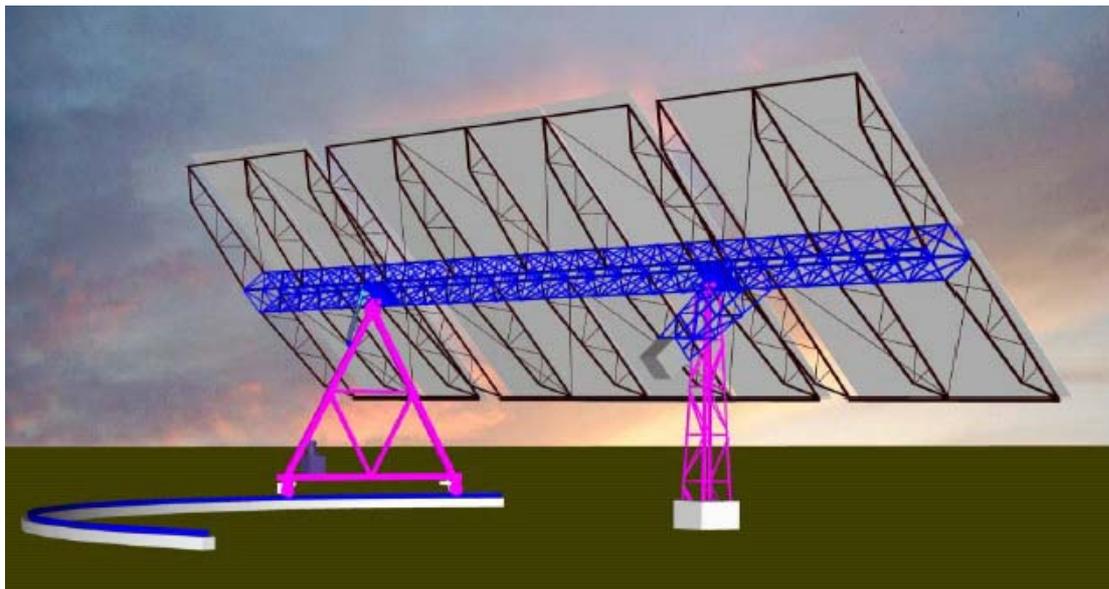


Figura 44. Representación artística del helióstato de 200 m² Megahelio (Diseño de SOLUCAR)

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. 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.

Tras diversas pruebas con prototipos y miniserias de helióstatos autónomos, la PSA ha conseguido un hito mundial en autonomía al poner en operación todo el campo CRS de helióstatos, 92 unidades, controlado por radio. El proyecto PCHA (Primer Campo de Helióstatos Autónomos), iniciado en el año 2002, con un coste total de 650.000€, ha sido parcialmente subvencionado por el Programa PROFIT del Ministerio de Educación y Ciencia.

La tercera y última fase del proyecto se ha desarrollado durante el año 2004, habiéndose completado todo el montaje del campo, que había sido iniciado en octubre de 2003. En marzo de 2004 la totalidad del campo fue puesta en marcha y comenzó el plan de ensayo prolongado. La primera campaña de evaluación se realizó en septiembre de 2004 e incluía ensayos de comunicaciones, ensayos operacionales y ensayos de consumo eléctrico. Asimismo se llevó a cabo un estudio comparativo de costes con helióstatos

convencionales tomando como referencia el campo de 624 helióstatos de la planta PS10 en Sevilla. Los ensayos de comunicaciones demostraron la viabilidad de comunicaciones en el campo CRS con un total de cinco radiomodem centrales, permitiendo comunicarse con tasa de 20 helióstatos por segundo y refresco de todo el campo cada cinco segundos. Con esta solución, se pudo proponer un esquema de comunicación para el campo PS10 que permitía un refresco de todo el campo cada 10 segundos. La tasa de fallos obtenida fue inferior al 0,4%. Los ensayos operaciones demostraron el buen funcionamiento del sistema de protección por altos vientos y en general las actuaciones de auto-



Figura 45. Vista frontal parcial del campo de helióstatos CRS de la PSA, con un total de 92 unidades enteramente autónomas y controladas por radio. En el centro del helióstato se observa colocado sobre el pedestal, el panel FV de alimentación al sistema de control y la antena de comunicación con el control central.

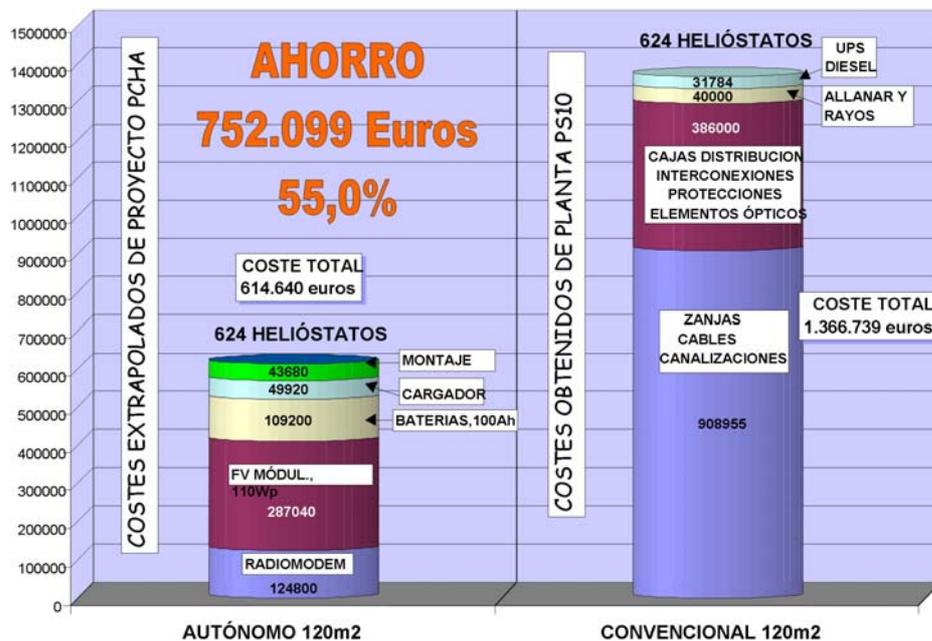


Figura 46. Comparativa de costes de un campo de helióstatos autónomos y convencionales para 624 unidades de 120 m² (Datos basados en el campo PS10)

protección esenciales en un helióstato autónomo. A finales de 2004 se acumulaban más de 7000 horas de operación. Los consumos eléctricos han sido extraordinariamente bajos, con un valor promedio de 129 Wh/día para un modo de operación que impone 12 horas en seguimiento solar. De hecho una de las conclusiones principales es que el sistema FV resultaba claramente sobredimensionado, llegando a producir algunos problemas de sobrecarga, por lo que un panel de 30 Wp se considera más que suficiente. El aprovechamiento de la radiación difusa por parte del sistema de alimentación FV da lugar a una gran autonomía, no habiéndose detectado problemas de suministro, incluso en periodos invernales con climatología adversa. La extrapolación de estos datos para un helióstato comercial de gran tamaño, como el helióstato de 120 m² a utilizar en PS10, muestra un valor total diario de 341 Wh, de los cuales 221 Wh serían por consumo de motores y el resto por consumo fijo de electrónica y pérdidas. Para un helióstato de 120 m² se considera que el sistema óptimo consistiría en un panel de 110 Wp y una batería de 100 Ah. La comparativa realizada entre los datos extrapolados para helióstatos autónomos de gran tamaño y los datos de un campo convencional como PS10, muestran un potencial de abaratamiento del 55%, teniendo en cuenta incluso la reposición periódica de baterías durante la vida de la planta. Consideramos, por tanto, que la experiencia de PCHA ha sido totalmente satisfactoria y demuestra que la utilización de campos de helióstatos autónomos en plantas comerciales ofrece un beneficio no sólo técnico, sino también económico.

Desarrollo de Sistemas de Control Avanzado (UAL)

Con la Universidad de Almería (UAL), se mantiene una fructífera línea de colaboración 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 año 2004 se ha avanzado significativamente en la elaboración de sendos sistemas de control, para los campos CESA y CRS. 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, se ha llevado a cabo el 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 computadores 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.

Uno de los desarrollos más relevantes durante el año 2004 ha sido la obtención de un modelo dinámico para el Sistema Receptor/Almacenamiento/Circuito de aire ubicado en la planta CESA-I. Al igual que para el modelo dinámico de Hornos Solares, éste ha sido 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 47 aparece

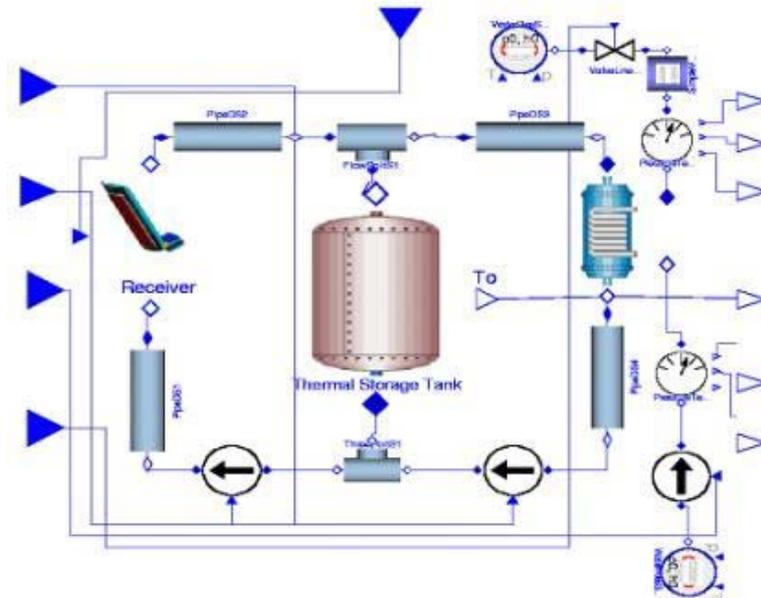


Figura 47. Modelo dinámico mediante Dymola/Modelica® de la instalación TSA/Solair con receptor volumétrico de aire, almacenamiento térmico, generador de vapor y soplantes.

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, ...). Los principales componentes del sistema han sido modelados en entorno Thermofluid. El comportamiento dinámico del sistema ha sido simulado, habiéndose modelizado la respuesta ante un paso de nubes.

TECNOLOGÍA DE MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN PARA ALTOS FLUJOS

Se incluyen en este apartado actividades que se consideran fundamentales para un centro de excelencia en ensayo y medida de sistemas de concentración solar como la PSA. En particular la búsqueda de métodos e instrumentos de medida de flujo solar concentrado más fiables y el ensayo y preparación de materiales sometidos a altos flujos, resultan esenciales para las próximas generaciones de plantas. Si bien estas actividades suelen ser permanentes en cualquier instalación científica de referencia en concentra-

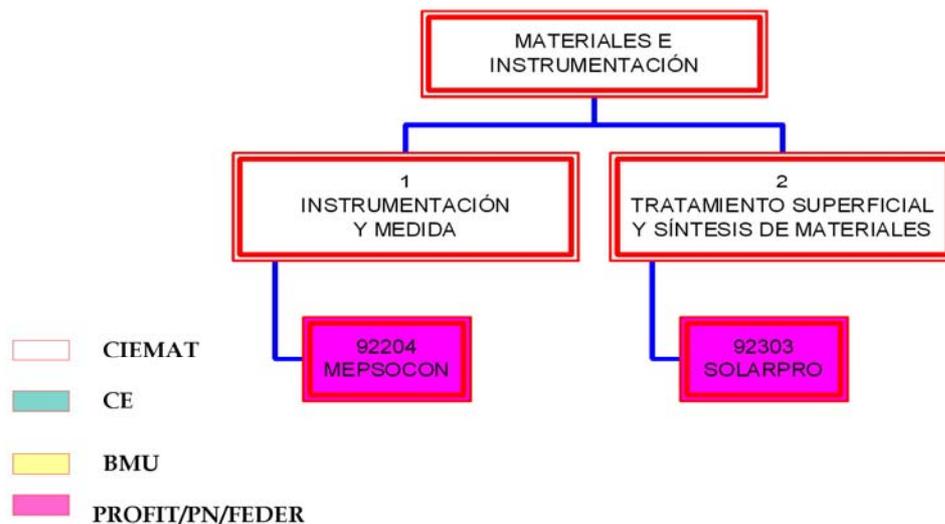


Figura 48. Agrupación de proyectos de I+D en la línea de materiales e instrumentación y medida. El color denota la fuente de financiación

ción solar, la mayoría de las veces suelen pasar inadvertidas al encontrarse semi-ocultas dentro de proyectos de desarrollo de componentes o ensayo de sistemas. Se caracteriza, por tanto, por ser una actividad de marcado perfil horizontal. Existen, no obstante, proyectos financiados por el Plan Nacional de I+D, que centran sus objetivos concretos en el desarrollo de estas técnicas y procesos. Durante el año 2004 esta actividad se ha recogido en los proyectos MEPSOCON y SOLARPRO.

Instrumentación y medida (Proyecto MEPSOCON)

Hay muchos factores que afectan la medida de la radiación solar concentrada 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.

Los métodos de caracterización empleados tienen al radiómetro Gardon como referencia, para el cual se ha establecido un procedimiento de calibración específico, utilizando un cuerpo negro de grafito de cavidad cilíndrica dual, siguiendo los procedimientos de NIST (National Institute of Standards and Technology). Una vez elaborados los procedimientos de calibración del radiómetro Gardon, se ha detectado un error sistemático (incertidumbre de tipo B), en su utilización para la medida de radiación solar. Esta incertidumbre es dependiente del recubrimiento que lleva el radiómetro. Si el recubrimiento es Zynolyte, el radiómetro sobre-estima la medida en un 3,6%, y si el recubrimiento es grafito coloidal ésta se sobre-estima un un 27,9%. Estos errores sistemáticos son consecuencia de que a la temperatura de calibración (850°C) la radiancia espectral de un cuerpo negro

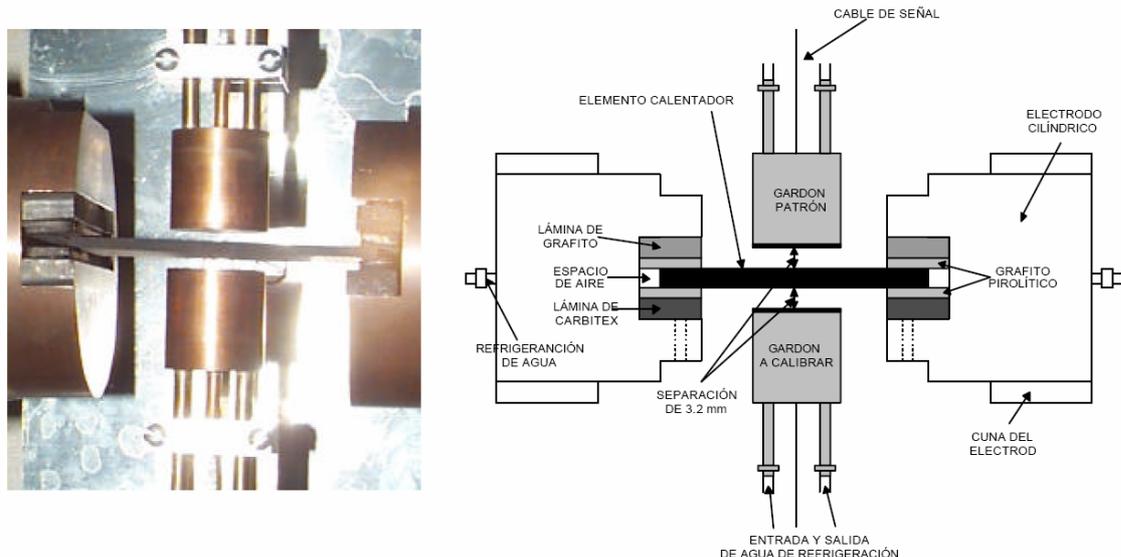


Figura 49. Fotografía y esquema del posicionamiento del elemento calentador y los sensores para realizar la calibración

es significativamente distinta de la distribución espectral de la radiación solar, cuyo máximo según la ley de desplazamiento de Wien se produce a 2580 nm. Por esta razón se evidencia un error sistemático en la potencia absorbida por los recubrimientos bajo dos distribuciones espectrales diferentes. El error sistemático ha sido reconocido por la empresa Vatel Corporation, con quien se ha publicado conjuntamente el hallazgo obtenido, que resulta de gran relevancia por el uso extendido de estos radiómetros en aplicaciones solares. Para poder utilizar estos sensores en medida de radiación solar es preciso realizar una corrección de las constantes de calibración, mediante un factor adimensional de 0,965 en el caso de el Zynolyte y 0.782 para el grafito coloidal.

Tratamiento superficial y síntesis de materiales (Proyecto SOLAR PRO)

La adaptación de la tecnología de concentración solar a procesos industriales endotérmicos intensivos, que requieran altas temperaturas y una reducción importante de emisiones de CO₂, son un claro objetivo para la energía solar. También resulta de gran importancia el avanzar en el conocimiento del uso de la radiación solar concentrada para el tratamiento superficial y la síntesis de materiales, donde herramientas como los hornos solares resultan esenciales. El objeto del proyecto SOLARPRO es demostrar la viabilidad tecnológica de utilizar la energía solar térmica como sistema de aporte energético en diferentes procesos industriales cuyo denominador común es la alta temperatura, distintos a la producción de electricidad. Para ello, se combinan la experiencia y conocimientos adquiridos en los diversos proyectos de tecnología de receptor central con los correspondientes a las actividades de tratamiento de materiales llevados a cabo en el horno solar, que ha sido puesto a punto para este fin durante el año 2004.

De cara a este proyecto, los procesos a estudiar se clasifican básicamente en dos grupos:

- 1) Procesos de producción industrial: Dado que lo que se pretende es aprovechar la capacidad de generar altas temperaturas, propia de los sistemas de concentración solar, se propone realizar un estudio de viabilidad sobre su aplicación a diferentes procesos propios de la industria cerámica y de sinterizado de materiales metálicos.
- 2) Procesos de tratamiento de residuos: En principio se propone abordar una línea innovadora consistente en la eliminación y recuperación de metales pesados a partir de suelos contaminados.

Los socios del proyecto SOLARPRO son:

- Departamento de ingeniería mecánica y de los materiales de la Universidad de Sevilla (USE). Conocimiento del proceso de sinterizado de metales.
- Instituto de Tecnología Cerámica (Castellón) (ITC). Centro tecnológico con conocimiento de los procesos de fabricación de la industria cerámica.
- Departamento de mecánica de fluidos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Conocimiento de la problemática de los suelos contaminados por metales pesados.

Los procesos inicialmente seleccionados para ser estudiados son los siguientes:

- Procesos típicos de la industria de la cerámica:
 - Secado de piezas 'crudas' antes de su cocción. ($100^{\circ}\text{C} < T < 200^{\circ}\text{C}$)
 - Secado por atomización ($200^{\circ}\text{C} < T < 350^{\circ}\text{C}$)
 - 'Tercer fuego', para obtener ciertos tipos de decoración ($800^{\circ}\text{C} < T < 900^{\circ}\text{C}$)
 - Obtención de 'fritas' ($1400^{\circ}\text{C} < T < 1600^{\circ}\text{C}$)
- Procesos de sinterizado de compuestos metálicos con atmósfera reductora. ($T \sim 1000^{\circ}\text{C}$)
- Procesos de eliminación de metales en suelos contaminados. (Hg, $T \sim 630^{\circ}\text{C}$)

Los principales objetivos del proyecto son:

- Demostrar la viabilidad tecnológica del concepto.

- Obtener datos y experiencia suficientes para optimizar el diseño y los procedimientos de operación de los equipos de energía solar con respecto a las aplicaciones ensayadas.
- Modelado de los procesos y validación con datos reales.
 - Identificar posibles nuevos procesos susceptibles de recibir aporte energético por vía solar.
 - Obtener conclusiones que ayuden a plantear un posterior escalado del sistema hasta potencias del orden del megavatio.

Durante el año 2004, se ha realizado la puesta a punto del horno solar para el proyecto SOLARPRO, habiéndose desarrollado un banco de pruebas de calentamiento de aire con un receptor solar volumétrico que tendrá su aplicación en los subproyectos 1 y 2 (secado de piezas de la industria cerámica y sinterizado de materiales pulvimetalúrgicos, en particular cobre). Un segundo reactor ha sido desarrollado basado en el concepto de horno rotatorio y tendrá su utilización en el subproyecto 3 (recuperación térmica de suelos contaminados por metales, en particular por mercurio).

Ensayos en el Horno Solar

La operación en el Horno Solar ha estado dedicada principalmente a la realización de los ensayos incluidos dentro de los proyectos de las llamadas "Líneas Propias" del Grupo de Materiales de la PSA, como el proyecto Solarpro que, en colaboración con el Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) de Castellón, ha llevado a cabo ensayos para la obtención de "fritas" a partir de distintas mezclas de alúmina y circonia en polvo; o como la espumación de probetas de aluminio con la ETS de Ingenieros de Minas de Madrid. También se pueden encuadrar dentro de las mismas "Líneas Propias" los ensayos realizados con el Departamento de Fusión del CIEMAT en los que se han tratado probetas de alúmina compactada a muy alta temperatura. Además se han llevado a cabo ensayos de control automático del atenuador en colaboración con la Universidad de Almería y se ha medido el flujo del horno en el marco del proyecto MEPSOCON del Programa Nacional de I+D con un calorímetro diseñado y fabricado por la Universidad Autónoma de Méjico.

Otros ensayos han servido para completar la campaña del programa Mejora del Potencial Humano (IHP) que comenzó en el año 2003 con el centro de investigación ARC Seibersdorf en colaboración con la Universidad Técnica de Riga y no pudo completarse por problemas con la infraestructura del Horno.

Por último cabe mencionar la campaña realizada en el marco del programa INTAS con la universidad BMSTU de Moscú en el que se ensayó, a muy alta temperatura, mate-

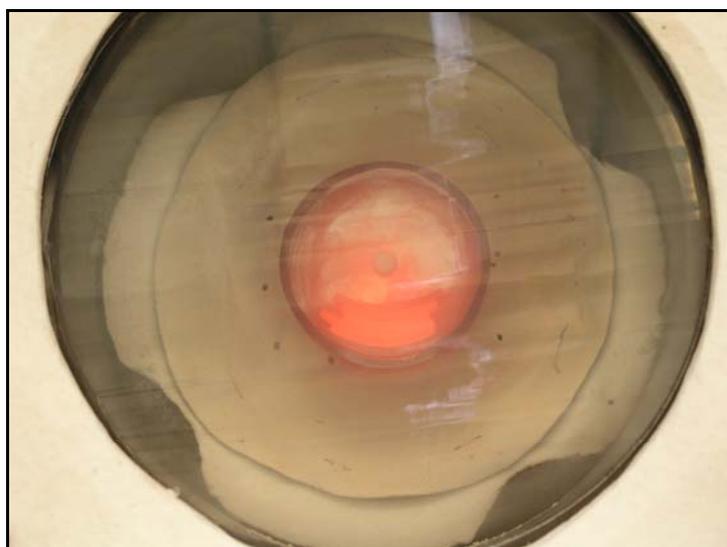


Figura 50. Crisol de ensayos en la MiniVac

rial aislante a base alúmina.

El **Centro de Investigación ARC Seibersdorf** en colaboración con la **Universidad Técnica de Riga** están involucrados en el desarrollo de métodos de preparación de nanomateriales a partir de compuestos refractarios en polvo. Los métodos tradicionales de sinterización están relacionados con un intenso crecimiento del grano asociado con propiedades físicas y mecánicas no deseadas de las cerámicas consolidadas.

La sinterización por plasma y las técnicas relacionadas como la sinterización por pulso eléctrico, son rápidas, eficientes energéticamente y altamente efectivas, produciendo materiales muy densos de grano fino.

La sinterización en el Horno Solar constituye una forma alternativa de sinterización rápida. La combinación de calentamiento rápido, corto periodo de procesado y enfriamiento rápido, hacen de estas técnicas una poderosa herramienta para el desarrollo de materiales y la optimización microestructural.

En los ensayos llevados a cabo por el Grupo de Materiales de la PSA en colaboración con las instituciones citadas más arriba, diferentes probetas de TiCN, WC y W fueron tratadas en la Mini cámara de Vacío (MiniVac) del Horno Solar en una corriente de N₂ a temperaturas de entre 1500 y 1750 °C.

El objetivo de la campaña de ensayos realizada en el marco del programa INTAS con la **Bauman Moscow State Technical University-BMSTU**- en asociación con la compañía alemana **ASTRIUM GmbH** es el "Desarrollo de Métodos Numéricos y Experimentales de Investigación de Transferencia de Calor en Materiales Porosos de Protección Térmica".

Este proyecto pretende generalizar y sistematizar los resultados de la investigación de diferentes sistemas de protección térmica basados en materiales porosos, así como desarrollar algoritmos para la identificación de parámetros de transferencia de calor a partir de los datos experimentales obtenidos en los ensayos, según el método de solución del problema inverso.

Los materiales porosos de aislamiento térmico son ampliamente usados en ingeniería, por ejemplo, son elementos esenciales de protección de vehículos espaciales como el Space Shuttle (USA) o el cohete Buran (Rusia) para la reentrada en la atmósfera.

Se llevaron a cabo varios ensayos a distintas densidades de flujo, comenzando por las densidades más bajas y aumentando progresivamente hasta la densidad máxima con el



Figura 51. Concentrador y área de ensayos durante un ensayo

atenuador al 100%; con lo que se hicieron ensayos entre 150 y 1900 kW/m² y temperaturas entre 700 y 1900 °C.

En cuanto a los ensayos de medida de flujo del programa MEPSOCON, se realizaron con un calorímetro fabricado por la Universidad de Méjico llamado Cavical, mediante el cual, y por diferencia de la temperatura del agua a la entrada y salida del calorímetro, se calcula indirectamente la energía que entra por la boca del calorímetro.

Se hicieron dos campañas de ensayos a diferentes aperturas del atenuador, de forma que se pudiesen obtener los distintos niveles de energía aportada por el horno en diferentes posiciones entre el 0% -cerrado- y el 100% -abierto-.

Caracterización del foco del Horno Solar

Mención aparte merece la campaña de ensayos de caracterización del foco del Horno Solar que se llevó a cabo a finales de septiembre, ya que, una vez sustituidos los cuatro helióstatos MBB originales por un único helióstato, era necesario conocer la nueva distribución de flujo en el plano focal.

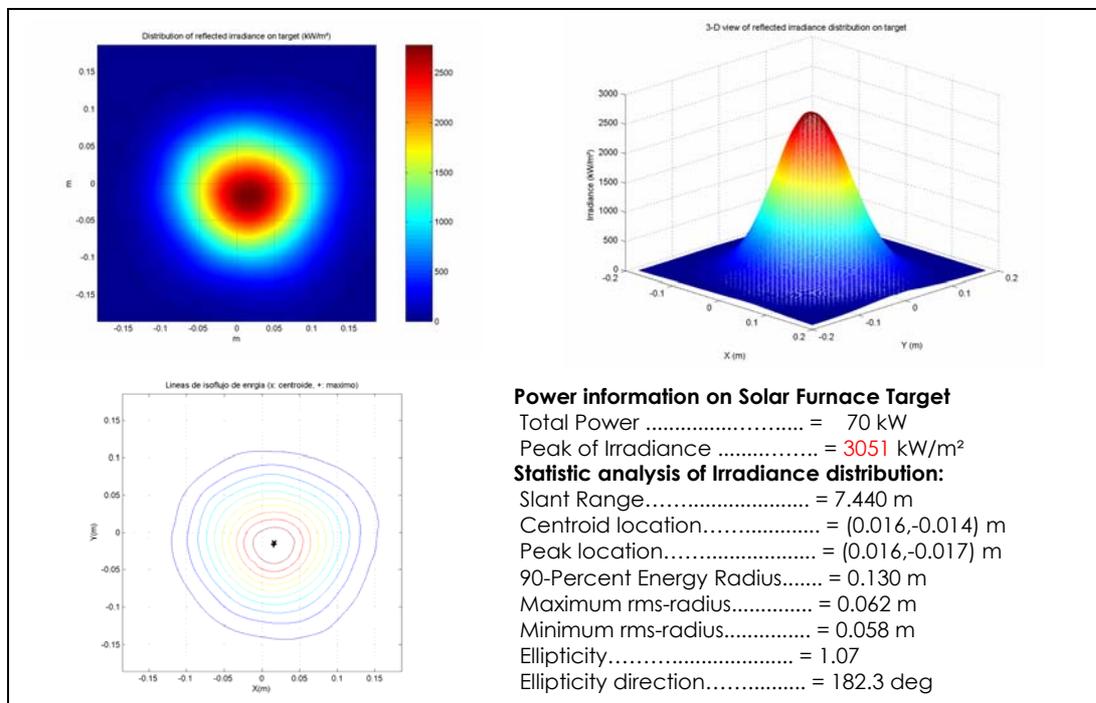


Figura 52. Medida de flujo en el plano focal

El nuevo helióstato llamado GM-140 tiene una superficie de 140 m² y ha sido fabricado por la empresa Solucar.

Para la medida de flujo se ha empleado el blanco lambertiano del Horno con un radiómetro HYCAL de rango 3,4 MW/m². Las imágenes se han tomado con la nueva cámara CCD Hamamatsu C4480 conectada a ordenador Pentium 4 provisto del software Image Pro Plus de Media Cybernetics.

Para la caracterización se realizaron 17 medidas para cada una de las aperturas del atenuador, a distancias entre +150 y -150 mm del plano focal en escalones de 10 mm. Las aperturas del atenuador empleadas fueron entre el 20% y el 100% en intervalos del 10%. La potencia total medida fue de 70 kW con un radio de 13 cm para el 90% de la energía en el plano focal.

MEJORA DE LAS INSTALACIONES

Durante el primer semestre se ha terminado de instalar el nuevo software de control y adquisición que, concebido como una herramienta SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), se ha realizado en el entorno Labview en colaboración con la Universidad de Almería. Esta nueva aplicación dispone de potentes utilidades gráficas y de control y ha sido diseñada de manera que, en sucesivas versiones, se le podrán incorporar mejoras como la automatización del atenuador –de suma importancia para la operación del sistema, ya que facilitará enormemente la realización de los ensayos y su repetibilidad–.

Este nuevo sistema de control y adquisición incluye un nuevo ordenador Pentium 4 con dos pantallas -pantalla de control y pantalla gráfica- que pueden verse a continuación, y supone una importante mejora respecto al anterior sistema de adquisición, al poder disponer de los datos más importantes en forma gráfica en una pantalla y el resto de datos en la pantalla principal.



Figura 53. Pantallas del nuevo Sistema de Adquisición de Datos

En este contexto, se han llevado a cabo varios ensayos de automatización del atenuador con distintos algoritmos de control. Las probetas utilizadas, consistentes en mazos de alambre de cobre, son sinterizadas en el interior de la cámara Minivac. Este tipo de probetas han sido ensayadas en multitud de ocasiones, por lo que son conocidas por el personal de operación, lo que facilita la realización de las pruebas con los diferentes algoritmos.

También se ha instalado un nuevo sistema de medida de flujo que incluye el blanco lambertiano del sistema de medida anterior y una nueva cámara CCD

Hamamatsu C4880-21, que dispone de doble método de lectura gracias a dos convertidores A/D: convertidor de 12 bits para modo de lectura rápido y convertidor de 16 bits para modo de lectura de precisión. Su rango dinámico real típico con el convertidor A/D de 16 bits es de 37500:1.

El software elegido para el sistema ha sido el Image Pro Plus de Media Cybernetics, que es uno de los más conocidos y populares entre los usuarios de programas de adquisición y análisis de imagen e incluye amplias posibilidades de captura, desde vídeos a fotografías digitales pasando por cámaras CCD y otros instrumentos científicos, con alta calidad y precisión, y pone a disposición del usuario gran variedad de herramientas para procesado de imágenes.

COMBUSTIBLES SOLARES Y PROCESOS INDUSTRIALES

La producción de vectores energéticos distintos de la electricidad que permitan un almacenamiento estacional y transporte de la energía solar, así como la integración en procesos industriales que requieren adaptar el proceso para solarizar aquellas etapas endotérmicas, constituyen actividades emergentes en el Proyecto de Energía solar de alta temperatura. La integración en procesos industriales se recoge fundamentalmente en proyecto nacional coordinado SOLARPRO, que ha sido ya presentado en el apartado anterior. En cuanto a la actividad ligada a la producción de combustibles solares, las investigaciones pivotan alrededor de la producción de hidrógeno solar, tal y como recoge la Figura 54.

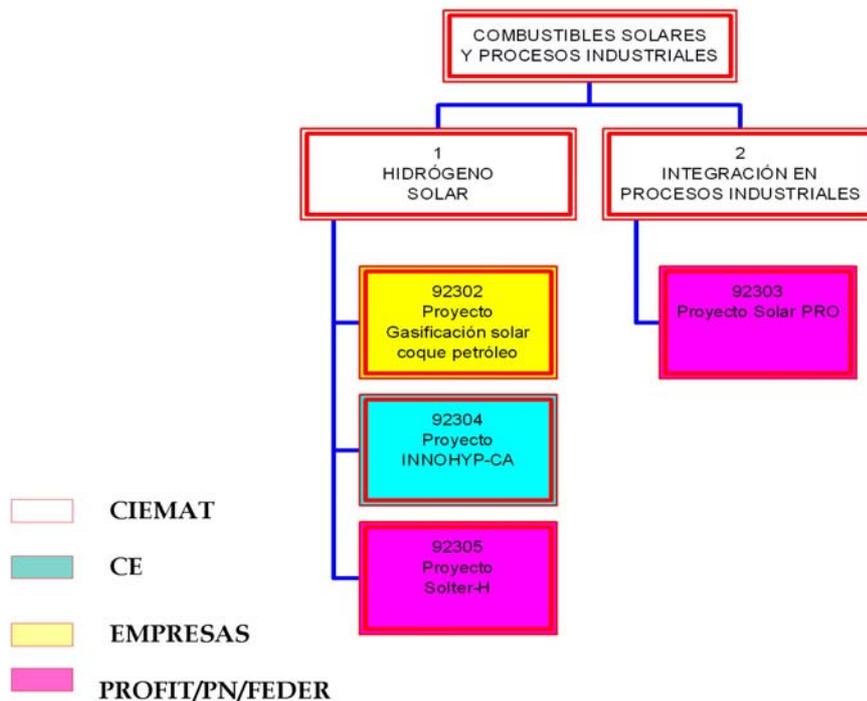
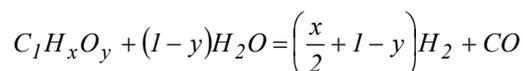


Figura 54. Estructura y contenido de las líneas de investigación en hidrógeno solar e integración en procesos industriales. Los colores indican las fuentes de financiación

Proyecto de gasificación solar de coque de petróleo

La sustitución completa de los combustibles fósiles es un objetivo a largo plazo que requiere el desarrollo de nuevas tecnologías. Estratégicamente, es deseable como etapa intermedia el considerar objetivos a medio plazo orientados al desarrollo de procesos endotérmicos híbridos solar/fósil en los que los combustibles fósiles son utilizados exclusivamente como reactivos químicos y la energía solar como la fuente de calor de proceso. Un ejemplo importante de proceso híbrido, y ciertamente uno que probablemente causará mayor impacto, es la gasificación solar de coque de petróleo. Los resultados son combustibles más limpios cuyo contenido energético ha sido mejorado con energía solar: su valor calorífico es incrementado por encima del valor de la materia prima principal mediante la aportación solar en una cantidad igual al intercambio entálpico de la reacción. La mezcla de coque de petróleo y energía solar crea un vínculo entre la tecnología de hoy basada en el petróleo y la tecnología química solar de mañana.

La gasificación de coque de petróleo es un proceso complejo, pero la conversión química global puede ser representada por la reacción neta simplificada:



donde x e y son las relaciones molares elementales de H/C y O/C en coque de petróleo, respectivamente. El producto químico obtenido es gas de síntesis (syngas), cuya calidad depende de x e y.

El proyecto de gasificación solar de coque de petróleo es una colaboración entre la empresa Petróleos de Venezuela (PDVSA), el Instituto Tecnológico de Zurich (ETH) y CIEMAT, y su objetivo principal es desarrollar una tecnología limpia de gasificación solar de coque de petróleo y en general petróleos pesados. En su primera fase, el proyecto se ha centrado en la caracterización del proceso para tres coques de petróleo procedentes de la explotación de crudos pesados de la Faja del Orinoco en Venezuela: Flexicoke,

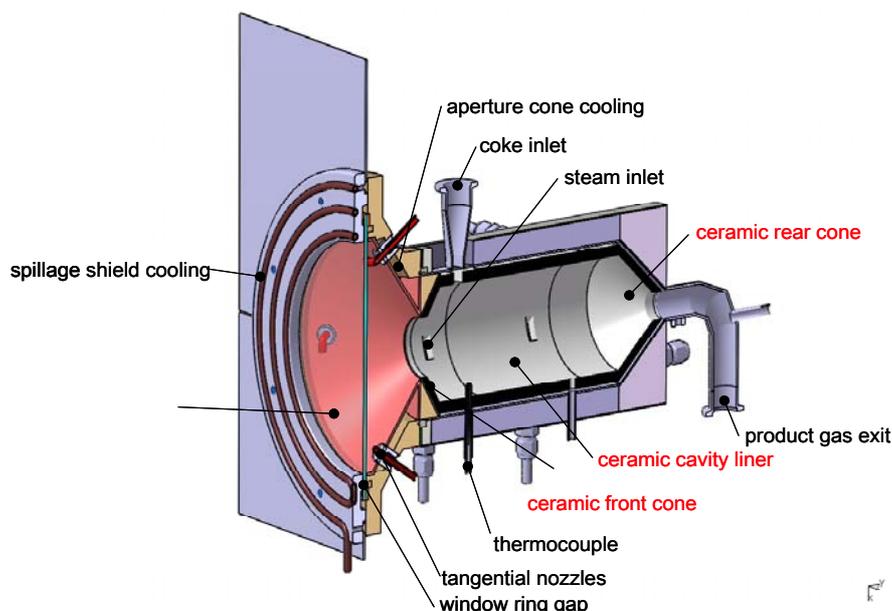


Figura 55. Esquema de reactor químico solarizado de 5 kW utilizado para la gasificación de coque de petróleo (Proyecto en colaboración PDVSA, ETH, CIEMAT)

y Delayed Coke de Petrozuata y Amuay. Los ensayos cinético-químicos realizados en reactores con control cinético en laboratorio han permitido confirmar la alta calidad del gas de síntesis producido a temperaturas por encima de 1300K, donde prácticamente la composición del gas queda reducida a CO e H₂. El gas obtenido es de gran limpieza, ya que no existen gases de combustión, y la totalidad del coque se ha empleado como reactivo químico. Se han obtenido, asimismo, las constantes cinéticas y el correspondiente modelo cinético, y se ha desarrollado un modelo de transferencia de materia y energía en el reactor, donde se ha analizado el comportamiento fluido-dinámico para partículas de 1 a 100 micras mediante el uso del código Fluent®.

Se realizó un análisis exergético, en base a la segunda ley de la termodinámica, para examinar dos caminos técnicamente viables para obtener energía de los productos químicos de la gasificación, y establecer una base para compararlos con la generación de electricidad con plantas eléctricas convencionales. Los dos caminos son: 1) el gas de síntesis producido por gasificación solar con vapor del coque de petróleo se utiliza como combustible en un ciclo combinado Brayton-Rankine con un rendimiento de 55%; y 2) el gas de síntesis producido por gasificación solar con vapor es nuevamente procesado hasta H₂ con la reacción de desplazamiento, seguido por la separación de H₂/CO₂, y el H₂ se utiliza para alimentar una pila de combustible con 65% de rendimiento. El análisis de exergía indica que los dos caminos pueden doblar la salida de electricidad específica (6,6 kWh/kg de coque), y por lo tanto, reducir a la mitad las emisiones específicas de CO₂, frente al ciclo Rankine alimentado por combustible con un rendimiento de 35%.

Durante el año 2004 se culminó la fase I del proyecto, consistente en el diseño, construcción y ensayo de un reactor experimental de 5 kW ensayado en horno solar. El reactor ensayado demostró la producción de gas de síntesis de alta calidad, a partir de coque de petróleo, a una temperatura de operación de 1300-1800K, con conversiones del 87% y tiempos de residencia de 1 s. CIEMAT, además de participar en los ensayos del reactor de 5 kW llevados a cabo en el horno solar de PSI en Suiza, realizó una campaña de ensayos en laboratorio con un modelo a escala calentado por resistencia eléctrica y donde se pudieron ensayar nuevos métodos de alimentación del coque a partir de slurries.

Durante el año 2005 se pondrá en marcha la fase 2 del proyecto consistente en la escalación del concepto a una planta piloto de 500 kW que será ensayada en la torre CRS de la Plataforma Solar de Almería.

Hoja de ruta de producción de hidrógeno por vía termoquímica (Proyecto INNOHYP)

La producción de hidrógeno sin emisiones de CO₂ y por vía termoquímica registra actualmente una revitalización, después de dos décadas de ostracismo y falta de interés. La tecnología de alta concentración solar posee las capacidades y propiedades requeridas para poder solarizar procesos de producción de hidrógeno a gran escala, utilizando altas temperaturas y ciclos termoquímicos.

El proyecto INNOHYP-CA (Innovative high temperature routes for Hydrogen Production – Coordinated Action) es una Acción Concertada financiada por la Comisión Europea en su VI Programa Marco, que tiene por objeto revisar el estado del arte en procesos innovadores de producción masiva de hidrógeno por vía térmica y sin emisiones de CO₂. El proyecto está coordinado por el Comisariado de la Energía Atómica Francés (CEA) y reúne la colaboración de otros siete participantes (ENEA en Italia, DLR en Alemania, la Universidad de Sheffield en Reino Unido, Empresarios Agrupados y CIEMAT en España, CSIRO en Australia y el Joint Research Centre de la CE en Petten, Países Bajos). El estudio se centra en procesos de disociación de agua por ciclos termoquímicos clásicos como UT-3 SI, Westhingham, y ciclos de basados en óxidos metálicos como el ciclo de ZnO, ferritas mixtas y otros, como la electrolisis a alta temperatura. Asimismo se analizan procesos de descarbonización de combustibles fósiles, tales como el cracking térmico de metano, el reformado solar de metano o la gasificación solar de materiales carbonosos. El proyecto INNOHYP deberá además servir de reflexión sobre los retos tecnológicos a resolver y proponer ámbitos de investigación y desarrollo, así como servir de puente con otros proyectos de hojas de ruta (Proyecto Hyways), y de intermediación con Plataformas Tecnológicas y con foros internacionales de colaboración como la Agencia Internacional de la Energía y el IPHE (Internacional Partnership on Hydrogen Economy).

El proyecto comenzó su andadura en septiembre de 2004 y su duración será de dos años. Durante el año 2004 se llevó a cabo la reunión de lanzamiento, que fue organizada por CIEMAT en Madrid, donde se acordaron los principios básicos para la metodología de análisis y comparativa de los distintos procesos. Se espera disponer a finales de 2005 de un documento de revisión del estado del arte de los distintos procesos, que permita comenzar a elaborar la comparativa y hoja de ruta correspondiente a comienzos de 2006.

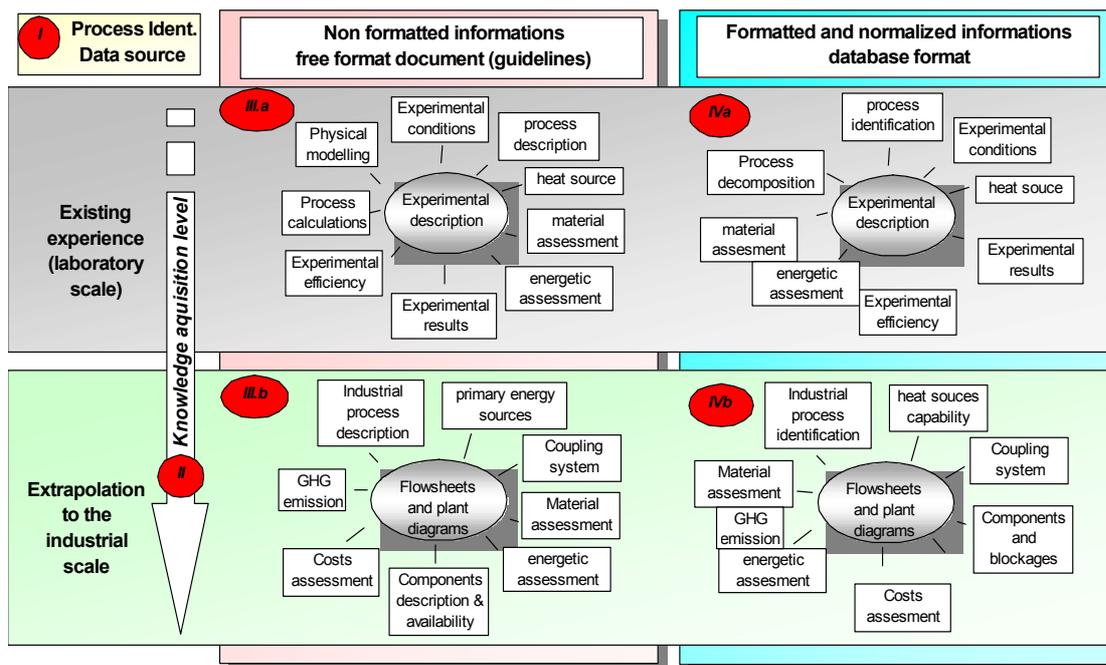


Figura 56. Metodología establecida en el proyecto INNOHYP para el análisis del estado del arte en procesos de producción masiva de hidrógeno por vía termoquímica (Fuente: CEA).

Producción de hidrógeno a partir de óxidos metálicos (Proyecto Solter-H)

Entre la multitud de procesos endotérmicos que presentan interés para su solarización, presentan especial atractivo aquéllos basados en el uso de óxidos metálicos. El proyecto Solter-H es un proyecto financiado por convocatoria PROFIT del Ministerio de Educación y Ciencia, en el que colaboran la empresa Hynergreen y CIEMAT. En el mencionado proyecto se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte de los distintos procesos basados en ciclos termoquímicos, siendo el objeto del mismo el seleccionar un proceso para su posterior desarrollo por los socios, primero a escala de laboratorio y posteriormente a escala de varios kW en horno o disco solar.

Tanto la bibliografía disponible como los datos de operación existentes para los ciclos General Atomics y UT-3, reflejan una excesiva complejidad, tanto en lo relativo al número de reacciones involucradas como al desarrollo de la tecnología adecuada para solventar algunos problemas básicos. Este hecho unido a los problemas inherentes a la operación de una central termosolar complicarían de forma extraordinaria la operación, ya que tendríamos que integrar el control del campo de helióstatos, con varios receptores, operaciones básicas de separación, purificación, etc. Esta interacción entre los distintos componentes del campo sería aun más crítica en presencia de transitorios o incluso en periodos de arranque y parada. Sin embargo, ciclos híbridos como el ciclo Westinghouse aunque menos eficientes y que con dos reacciones claramente diferenciadas, podrían ser una alternativa viable para una planta solar. Fruto de esta reflexión se participó en colaboración con CEA y DLR en la elaboración de una propuesta a la CE, dentro de la última convocatoria del VI Programa Marco, que desafortunadamente no fue financiada. Se ha retenido, no obstante, dicho proceso como susceptible de ser desarrollado en futuras colaboraciones internacionales.

En el ámbito nacional, se ha considerado más viable la colaboración entre Hynergreen y CIEMAT, en el desarrollo de un proceso que permite adaptar los conocimientos que ambos tienen en tecnología de concentración solar y absorbedores solares volumétricos. En este sentido son las ferritas mixtas las que presentan unas características más atractivas para su posible solarización. La ausencia de datos fiables es, no obstante, una de las fuertes limitaciones para el comienzo de la solarización de este proceso. El proyecto Solter-H pretende desarrollar los pasos necesarios para un estudio de viabilidad técnico-económico que analice la utilización de ferritas mixtas en reactores solares, mediante el ensayo primero en laboratorio y después en un pequeño concentrador solar de distintas ferritas dopadas.

Tecnología de Colectores Cilindro-parabólicos

Aunque los límites del rango de la media temperatura no están definidos por ninguna normativa, dentro de la comunidad científica que trabaja en temas de radiación solar concentrada es habitual considerar que dicho rango está comprendido entre los 150°C y los 450°C. En cualquier caso, los límites de este rango deben ser considerados con cierta flexibilidad.

Desde el punto de vista tecnológico, el uso de la energía solar dentro del rango de la media temperatura va asociado a un tipo de colectores solares muy concretos: los colectores cilindro-parabólicos (CCP). Aunque recientemente se está prestando atención también a otro tipo de colector solar que es también adecuado para aplicaciones solares dentro del rango de la media temperatura (el colector lineal Fresnel, CLF), el grado de madurez tecnológica y desarrollo comercial de los CCP es mucho mayor. Por esta razón, las actividades desarrolladas en la PSA dentro del Programa de Energía Solar Térmica de Media Temperatura están estrechamente relacionadas con la tecnología y aplicaciones de los CCP.

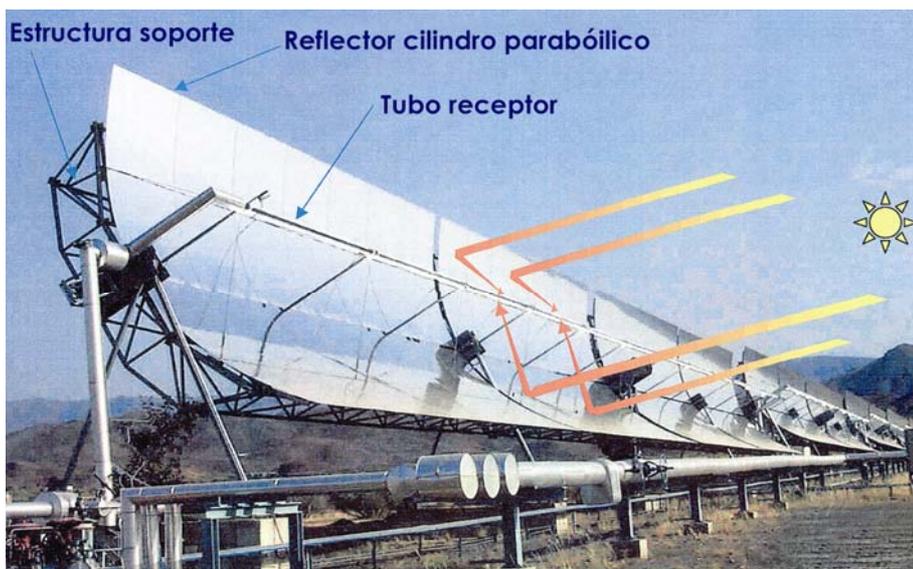


Figura 57. Principio de funcionamiento de un colector cilindro-parabólico

Los 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 la media temperatura. 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 superiores a los 400°C. Por este motivo, los CCP resultan idóneos para alimentar energéticamente procesos industriales térmicos que trabajen entre 150°C y 400°C. Dada la gran cantidad de procesos que cumplen esta condición, el interés comercial de los CCP es muy importante, ya que su implantación comercial podría ayudar de modo significativo a alcanzar el tan deseado *Desarrollo Sostenible*, reduciendo las emisiones de CO₂ y la contaminación ambiental que conlleva el uso de los combustibles fósiles.

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 del espejo parabólico. 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. La Figura 57 adjunta muestra una fotografía de un CCP e ilustra su modo de funcionamiento.

Dentro del Programa de Energía Solar Térmica de Media Temperatura, la PSA está desarrollando diversas líneas de I+D relacionadas con los CCP, cuyo objetivo final es promover y contribuir al desarrollo de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar en el rango de temperaturas 150°C – 450°C, tanto para la generación de electricidad como para la aplicación a procesos industriales térmicos. Se pretende la consecución de este objetivo final a partir de los cuatro objetivos parciales siguientes:

- desarrollo de nuevos componentes para CCP (nuevos tubos absorbedores y espejos, diseños estructurales más ligeros, nuevos sistemas de seguimiento solar, etc.), con una mejor relación calidad/precio
- desarrollo de herramientas de simulación y caracterización, tanto de colectores como de sistemas completos,
- 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 CCP como medio de transferencia de calor entre el campo de colectores solares y el proceso industrial que alimenta térmicamente, y
- facilitar el desarrollo y consolidación de una industria nacional propia, mediante el asesoramiento técnico-científico y la transferencia de tecnología.

Las actividades de la PSA encaminadas a conseguir estos objetivos 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.

Dentro de las actividades llevadas a cabo en la PSA durante el año 2004 en relación con la energía solar térmica en media temperatura, han seguido ocupando un lugar destacado las relacionadas con la generación directa de vapor a alta presión y temperatura dentro de los propios tubos absorbedores de los CCP. 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 este tipo de captadores solares, ya que permite prescindir del aceite térmico y del intercambiador de calor aceite/agua utilizado actualmente en este tipo de instalaciones.

La madurez técnica y comercial que han alcanzado las plantas solares con CCP para producción de electricidad (gracias a la valiosa experiencia aportada por las plantas SEGS de California) contrasta con la falta de desarrollo que aqueja a otras posibles aplicaciones de la energía solar dentro del rango de la media temperatura que también resultan interesantes, como son los procesos industriales de calor y la climatización industrial. La falta de colectores solares y equipos industriales que posean unas características adecuadas para este tipo de aplicaciones hace necesaria una fuerte actividad de I+D que permita alcanzar el mismo nivel de desarrollo que la generación de electricidad. España, al igual que muchos otros Países ubicados en el denominado *Cinturón Solar Terrestre*, poseen unas condiciones climáticas que hacen muy atractivas estas otras aplicaciones de los colectores cilindro-parabólicos. Por esta razón, durante el año 2004 se ha incrementado la actividad de la PSA en este campo y se ha trabajado también en el desarrollo de componentes para climatización industrial y alimentación de procesos industriales de calor. Por estos motivos, estamos participando en la Tarea 33/4 ('Solar Heat for Industrial Processes' o SHIP; www.iea-ship.org) de la Agencia Internacional de la Energía, con el fin de aprovechar las experiencias y conocimientos que sobre energía solar térmica aplicada a procesos industriales poseen otras entidades internacionales. De este modo, se ha ampliado el área de trabajo relacionada con los CCP, ya que tradicionalmente había estado centrada en la generación de electricidad (plantas solares termoeléctricas).

Las actividades desarrolladas por la PSA en el año 2004 dentro del Programa de I+D dedicado a la energía solar térmica de media temperatura han estado principalmente relacionadas con cuatro proyectos: *INDITEP*, *DISTOR*, *FASOL* y *PREDINCER*. De estos cuatro 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. A continuación se describen los resultados más relevantes conseguidos en el año 2004 por la PSA en relación con los cuatro proyectos mencionados.

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* (1996 – 2001). Una vez que la viabilidad técnica del proceso de Generación Directa de Vapor (GDV) en colectores cilindro-parabólicos fue demostrada en el proyecto *DISS* (Eck *et al*, 2003), el próximo paso lógico debía ser la optimización del proceso y de sus componentes esenciales, a la vez que se puede acometer el diseño de detalle de

una primera planta solar termoeléctrica comercial que funcione con generación directa de vapor en el campo solar.

El proyecto INDITEP tiene cuatro objetivos básicos:

- 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, 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 durante el año 2004 se ha centrado en las siguientes actividades:

- Participación en la ingeniería de detalle de la planta GDV de 5 MWe
- 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 y nuevos reflectores.
- Realizar un análisis del estrés que se ha producido en los tubos absorbedores de los colectores DISS después de más de 4000 horas de operación.
- Desarrollar nuevos recubrimientos selectivos capaces de soportar temperaturas de hasta 550°C.

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

Ingeniería de detalle de una planta GDV de 5 MWe:

En este tema, la PSA ha realizado la simulación del comportamiento anual de la planta solar termoeléctrica con generación directa de vapor cuyo diseño conceptual hicimos en el año 2003 (González 2003). Para ello, los modelos del campo solar y del bloque de potencia de la planta, realizados por la PSA e IBERINCO respectivamente, fueron implementados en TRNSYS y se simuló el comportamiento de la planta en su conjunto a partir de los datos meteorológicos correspondientes a un año tipo de la PSA. En la Figura 58 y

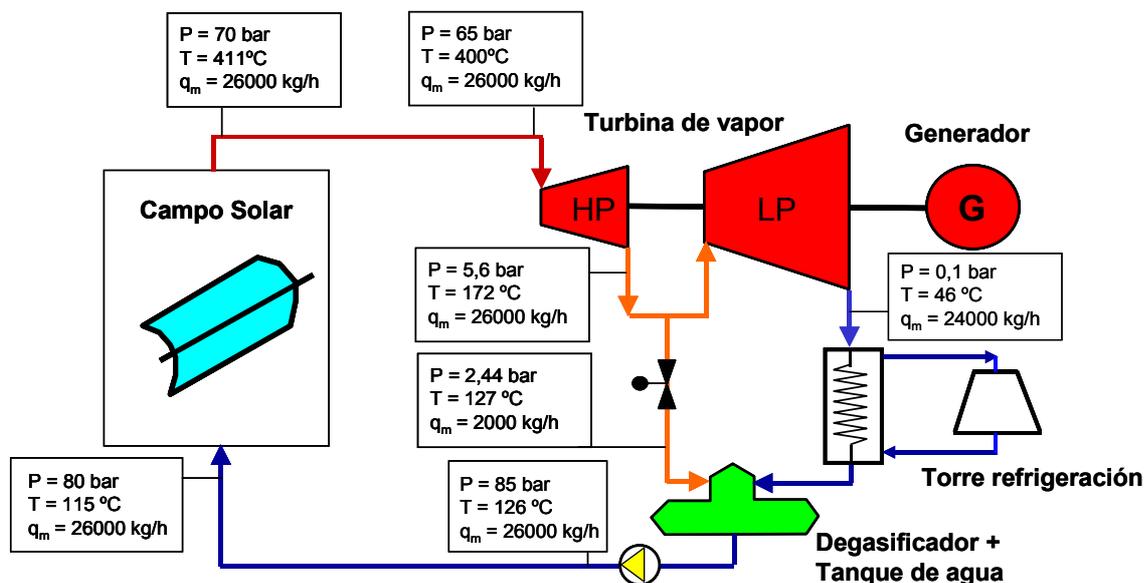


Figura 58. Esquema general de la planta solar termoeléctrica INDITEP

Parámetros principales de la planta INDITEP

Bloque de Potencia	
Potencia eléctrica bruta, kW _e ^o	5472
Potencia eléctrica neta, kW _e	5175
Rendimiento bruto, %	26.34
Rendimiento neto, %	24.9
Campo Solar GDV	
Número de filas paralelas de colectores	7
Número de colectores por fila	10
Longitud de cada colector, m	98.5
Ancho de parábola de los colectores, m	5.76
Área total de apertura, m ²	38384
Potencia térmica pico ($E_d=1\text{kW/m}^2$), MW	25

en la tabla adjunta se muestran los parámetros principales del bloque de potencia y del campo solar de la planta INDITEP, cuya potencia eléctrica nominal es de 5175 kW.

La potencia eléctrica neta de la planta en su conjunto es de 4839 kW, y se obtiene al quitarle a la potencia eléctrica neta del bloque de potencia los consumos eléctricos parásitos del campo solar y de los sistemas auxiliares. En la tabla siguiente se resumen los principales resultados obtenidos de la simulación del comportamiento anual de la planta INDITEP (Zarza *et al.*, 2004).

Resultados de la simulación del comportamiento anual de la planta INDITEP

Insolación anual por radiación solar directa, kWh/m ²	2008
Número de horas de Sol al año	3685
Número de horas de operación al año	2559
Producción anual neta de electricidad, MWh	9431
Horas equivalentes a plena carga	1949
Rendimiento medio del campo solar	61% (Verano) y 30% (Invierno)
Producción media de vapor en el campo solar, kg/s	5,1 (70,6% del valor nominal)

Durante el año 2004, la PSA ha trabajado también en el desarrollo del sistema de control y regulación del campo solar para la planta INDITEP (Valenzuela, Zarza 2004), así como en la definición de los procedimientos de operación de la planta. Estas últimas tareas han sido llevadas a cabo en colaboración con el DLR, IBERINCO y el ZSW. Se completó un primer borrador de los procedimientos de arranque y parada estimados como los más convenientes de acuerdo con la experiencia adquirida en la PSA con la planta experimental DISS durante los últimos cinco años. También se ha mejorado y completado el esquema de control propuesto en el 2003 para el campo solar GDV de la planta.

En relación con la ingeniería de detalle de la planta INDITEP, durante el año 2004 la PSA también ha colaborado con IBERINCO en el diseño del sistema de tuberías y elementos principales del campo solar.

Evaluación de componentes en la planta DISS de la PSA:

Otra fracción importante de la participación de la PSA en el proyecto INDITEP durante el año 2004 ha estado dedicada a la realización de ensayos en la planta experimental DISS con el fin de evaluar experimentalmente nuevos separadores compactos agua/vapor y seguir ensayando diferentes estrategias de operación y control. A lo largo de 2004, la planta DISS ha sido operada durante un total de 1003 horas.

El principal componente evaluado durante el año 2004 ha sido un nuevo prototipo de separador compacto agua/ vapor fabricado por la empresa alemana Framatone, del grupo SIEMENS, La Figura 59 muestra una vista de este separador una vez instalado en la planta DISS, junto al antiguo separador. El aspecto del nuevo separador es el de un trozo de tubería de acero de 76.1 mm de diámetro exterior y 1.5 m de longitud. En la misma fotografía puede apreciarse el separador agua/vapor tradicional que fue instalado en el año 1998, que tenía un volumen de 5 m³ y una longitud de 2.5 m. Puede apreciarse claramente la diferencia de tamaño entre un separador y otro. El coste del nuevo separador es de solo un 10% del coste del separador tradicional, lo que permitirá reducir de forma importante el coste del campo solar GDV. Los resultados experimentales obtenidos con el nuevo separador han sido evaluados por el DLR y han puesto de manifiesto un buen comportamiento de este nuevo prototipo de separador, ya que la eficiencia de separación es muy elevada (>90%) y la caída de presión que introduce en el circuito es bastante reducida (<1bar) para un caudal de 1 kg/s.

También se realizaron algunas mejoras en la planta DISS durante 2004. Un ejemplo de dichas mejoras ha sido la instalación de válvulas manuales de aislamiento a la entrada de todas las válvulas de control de los inyectores de agua existentes en el campo solar. Los datos experimentales obtenidos en años anteriores habían puesto de manifiesto un cierre defectuoso de dichas válvulas de control, lo que permitía la inyección de pequeñas cantidades de agua aunque las válvulas tuvieran activada la orden de cierre. Con la instalación de las nuevas válvulas manuales se puede garantizar la ausencia de flujo de agua a través de los inyectores cuando no se desea dicho flujo.

Durante el año 2004 se ha continuado, en colaboración con la Oficina Técnica de Electrónica de la PSA, con la mejora de los controles locales en lazo abierto instalados en los colectores de la planta DISS. Las mejoras implementadas en el hardware y en el software han aumentado la eficacia y fiabilidad del sistema de control desarrollado en la PSA para colectores solares cilindro-parabólicos. La experiencia acumulada por la PSA en lo relacionado con el seguimiento solar en bucle abierto mediante el cálculo del vector solar y la medida de la posición del eje de giro del colector ha permitido alcanzar un grado de fiabilidad y precisión que supera ya el requerido para poder instalarlo comercialmente. También se ha comprobado en la PSA que el desarrollo de sistemas fiables y precisos de seguimiento solar es mucho más complejo y delicado de lo que puede parecer cuando se aborda este tema por primera vez, ya que hay que tener pre-

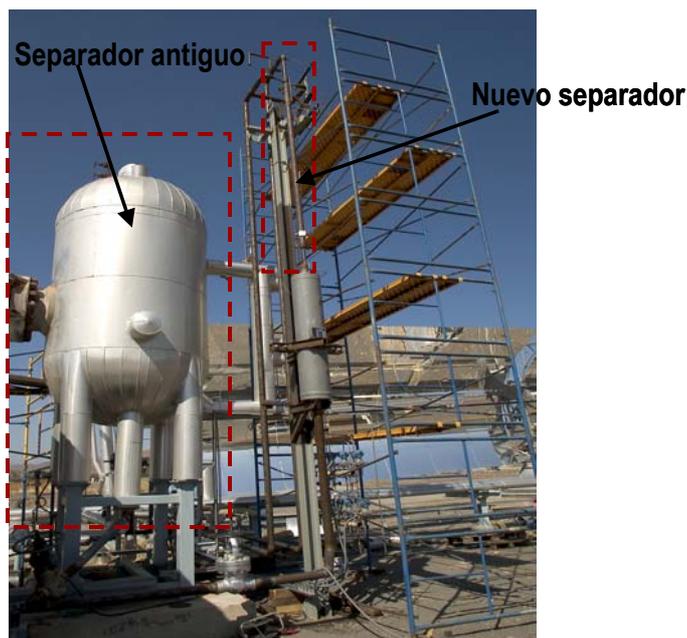


Figura 59. Vista del separador compacto agua/vapor ensayado en la PSA durante el año 2004

sente muchos aspectos que pasan fácilmente desapercibidos si no se dispone de una buena experiencia práctica sobre estos sistemas. Gracias a las mejoras que se han ido implementando durante los últimos cinco años y a la experiencia adquirida con la evaluación experimental de los sucesivos prototipos en la PSA durante miles de horas, se ha alcanzado un alto nivel de precisión y fiabilidad.

Teniendo en cuenta el interés industrial y comercial que existe actualmente en España en relación con las plantas solares termoeléctricas con CCP, y puesto que el sistema de control local desarrollado por la PSA ha alcanzado ya un buen nivel de perfeccionamiento, se hace necesario trabajar ahora en la integración de dicho control en una arquitectura global de planta adecuada a la situación tecnológica actual. En esta dirección irán los próximos pasos de la PSA en este campo.

Dentro de los ensayos previstos para el año 2004 en la planta DISS se incluían los de nuevas juntas rotativas adecuadas para agua/vapor a 100 bar y 550°C, suministradas gratuitamente por la empresa HYPAN. Está previsto que los ensayos a temperaturas superiores a los 300°C se harían en la central eléctrica que ENDESA posee en el municipio almeriense de Carboneras (Central Eléctrica "Litoral de Almería"), mientras que se decidió llevar a cabo en la PSA los ensayos hasta temperaturas de 300°C y presiones de hasta 70 bar. Para ello se acopló al circuito de vapor de alta presión de la planta DISS la máquina de ensayos que había sido desarrollada en la PSA durante la primera fase del proyecto DISS. Esta máquina permite someter a ciclos consecutivos de giro y pivotamiento juntas rotativas bajo condiciones reales de presión y temperatura. La existencia de células de carga, termopares y transmisores de presión permiten monitorizar la presión y temperatura a las que se encuentra la junta rotativa, así como los esfuerzos que se originan como consecuencia de la fricción interna en las juntas rotativas cuando se mueven. En la Figura 60 se muestra la máquina de ensayos para juntas rotativas, una vez instalada en la planta DISS de la PSA.



Figura 60. Vista de la máquina de ensayos para juntas rotativas en la planta DISS de la PSA.

Estudio de la corrosión existente en los tubos absorbedores de los colectores DISS

En colaboración con el Grupo de Materiales del CIEMAT, se ha llevado a cabo un estudio del estrés y corrosión existentes en los tubos absorbedores de los CCP de la planta experimental DISS después de 4000 horas de operación con generación directa de vapor (Diego, Gómez 2004). Para realizar este estudio se extrajeron cinco muestras de tuberías: una muestra fue tomada de la tubería de agua de alimentación a la entrada del campo solar, dos muestras fueron tomadas del tercer tubo absorbedor existente en el colector número 9, y otras dos fueron tomadas del primer tubo absorbedor del colector número 10. Todas las muestras fueron analizadas usando microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM/EDX), un analizador de energías dispersivas acoplado al SEM y difracción de rayos X.

El análisis de las muestras reveló la presencia de Zinc en la cara interna de todas las muestras, sin que se haya podido identificar su procedencia. Se apreció la existencia de una corrosión muy leve en la muestra de la tubería del agua de alimentación, mientras que en las muestras correspondientes a los tubos absorbedores de la zona de sobrecalentamiento de vapor se apreció una mezcla combinada de corrosión y erosión que pre-

sentaba un aspecto bastante uniforme y que afectaba a un 0,4% del espesor de la tubería, lo que supone un espesor de 0,04 mm afectado por la corrosión (ver Figura 61). En algunas zonas puntuales de muy pequeña extensión se ha observado una corrosión más profunda que llega a afectar a un 2,65% del espesor del tubo (ver Figura 61).

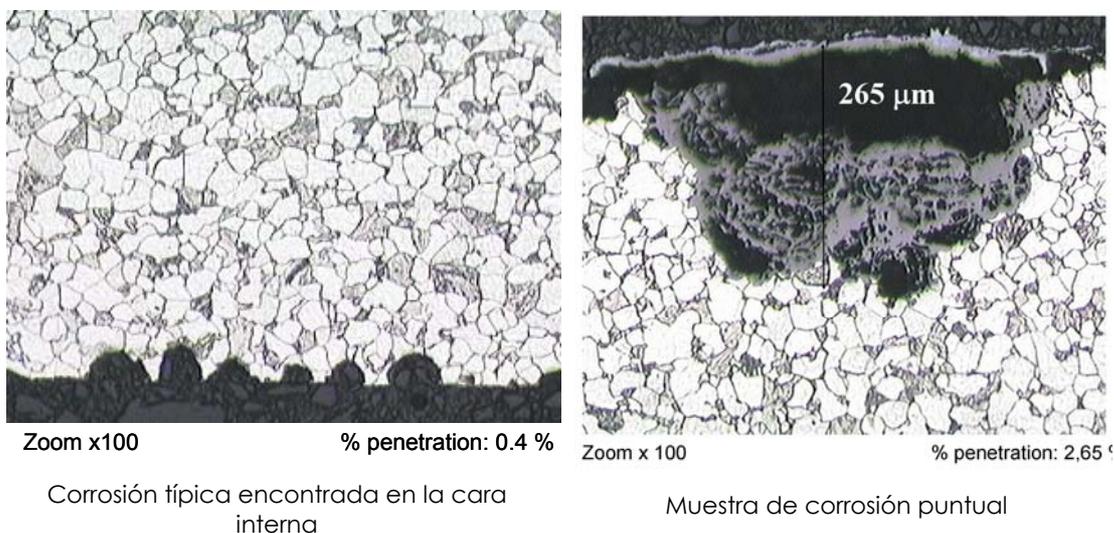


Figura 61. Estado de los tubos absorbedores de los colectores DISS tras 4000 horas de operación

Estos datos ponen de manifiesto que no son de esperar problemas asociados a la corrosión de los tubos absorbedores en plantas GDV comerciales durante un periodo de 25 ó 30 años. Se ha comprobado también, que en el caso de que existan, después de muchos años, daños puntuales más acusados en los tubos absorbedores, estos se manifestarían en forma de pequeños poros que originarían pequeñas fugas, pero nunca se produciría una explosión de los tubos aunque la presión de trabajo sea de 100 bar. Otro resultado importante del análisis de los tubos absorbedores DISS es el perfecto estado en el que se encuentran sus zonas de soldadura, ya que son las zonas donde se aprecia una menor corrosión, a pesar de la composición del acero de estos tubos (A335 grado P22) y de que no se realizó un pos-tratamiento térmico de las soldaduras.

Desarrollo de nuevos recubrimientos mediante la técnica Solgel:

En el año 2004, y dentro del marco de trabajo del proyecto INDITEP, la PSA ha seguido trabajando en la obtención de recubrimientos antirreflectantes para vidrios y de recubrimientos selectivos para tubos absorbedores. A continuación se resume la actividad llevada a cabo en estos dos campos.

a) Recubrimientos antirreflectantes sobre vidrio.

En el año 2004 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 de los colectores cilindro-parabólicos. Se ha optimizado el espesor y porosidad de la película de sílice para conseguir la máxima transmitancia del vidrio con una sola capa antirreflectante.

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.

En Figura 62 se muestra la transmitancia solar (AM1.5) del vidrio borosilicato empleado (0.923), del vidrio con la capa antirreflectante recién depositada (0.968) y tras el tratamiento de silanización para evitar la adsorción de agua (0.962).

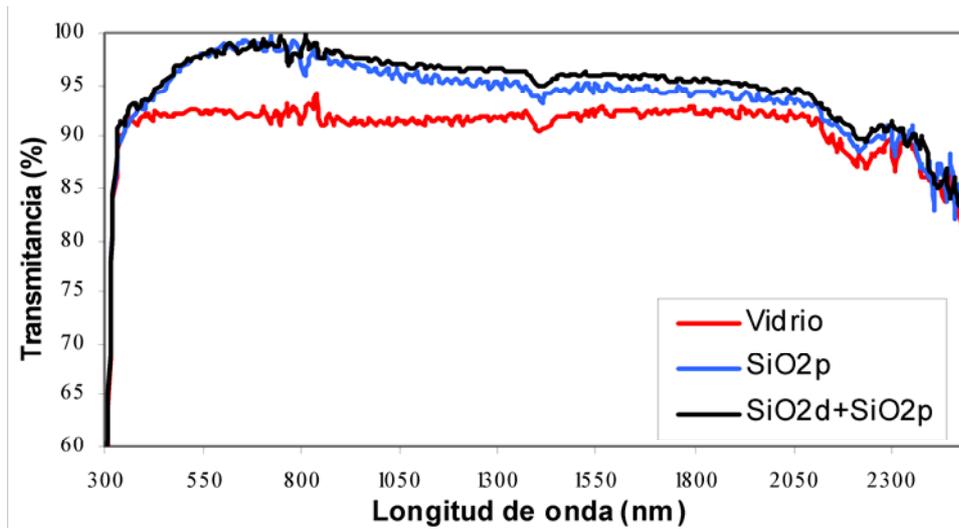


Figura 62. Transmitancias solares del vidrio borosilicato sin recubrir, con la capa porosa de sílice y tras el tratamiento de silanización.

Los resultados preliminares de envejecimiento acelerado en una cámara climática QUV con ciclos de condensación, temperatura y radiación UV indican que no se produce degradación de la película tras 1000 horas de ensayo.

b) Absorbentes selectivos estables a alta temperatura.

El proyecto INDITEP supone un aumento de la temperatura de operación del absorbente selectivo desde 400°C hasta 500-550°C que, junto al empleo de acero al carbono como material del tubo absorbedor, han obligado a introducir cambios importantes en el absorbente selectivo desarrollado anteriormente para ser depositado sobre tubos de acero inoxidable.

El nuevo absorbente se compone de dos capas de cermet de alúmina/platino con diferente contenido del metal sobre un reflector de platino metálico. Se han utilizado diferentes barreras protectoras y/o antidifusoras entre las capas, así como un recubrimiento antirreflectante.

La generación directa de vapor hace deseable la utilización de acero al carbono como material del tubo absorbedor. El acero al carbono presenta una baja estabilidad química y térmica, que impide la deposición de películas sol-gel directamente sobre el sustrato. Por este motivo, es necesario el uso de una película intermedia que confiera estabilidad térmica al acero, de manera que se pueda realizar la densificación de las películas de sol-gel a temperaturas en torno a los 550°C. Por este motivo se han empleado películas de níquel-tungsteno depositadas por electroless, que permiten la densificación de las sucesivas capas del cermet absorbente a una temperatura de 550°C.

Las propiedades ópticas de los absorbentes selectivos preparados sobre acero al carbono (ver Figura 63) son: $\alpha=0.95$ y $\epsilon_{400C}=0.14$.

El absorbente selectivo para el estudio de la estabilidad térmica se ha preparado con las películas individuales sinterizadas a 600°C, en aire, durante treinta minutos para conseguir una mayor densificación. Se ha evaluado la estabilidad térmica a 550°C en aire y se ha observado una progresiva degradación de las propiedades ópticas debido a la lenta oxidación de la película de níquel-tungsteno utilizada para proteger el sustrato de acero al carbono. Actualmente se está estudiando la forma de incrementar el contenido de tungsteno en la aleación para aumentar su estabilidad térmica.

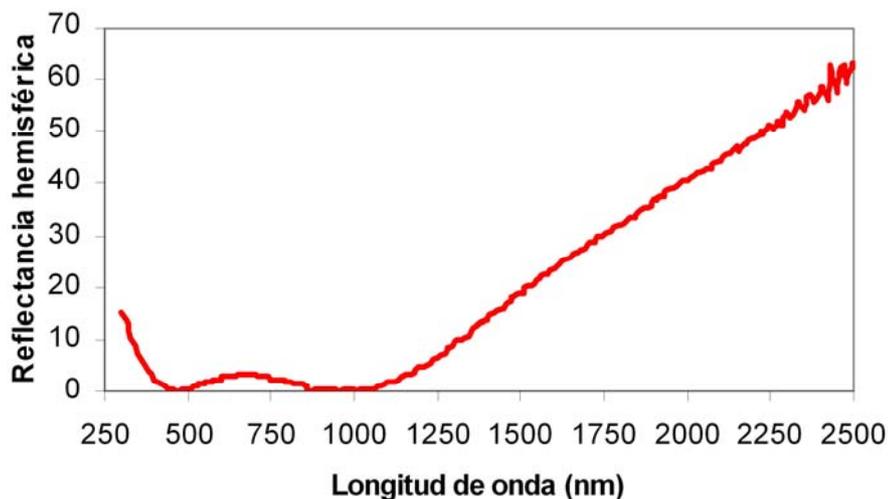


Figura 63. Absorbente selectivo depositado por sol-gel sobre acero al carbono.

PROYECTO DISTOR

El proyecto DISTOR es un proyecto europeo de I+D que cuenta con el apoyo de la Comisión Europea (contrato N°. SES6-CT-2004-503526). Comenzó oficialmente en febrero de 2004 y tendrá una duración de 45 meses. La finalidad principal del proyecto DISTOR es el desarrollo de un sistema de almacenamiento competitivo y adecuado para plantas solares que funcionen con generación directa de vapor en el campo solar. Los sistemas de almacenamiento actualmente disponibles para plantas solares que usan aceite como fluido de trabajo en el campo solar se basan en el almacenamiento de energía térmica en forma de calor sensible (aumentando la temperatura del medio de almacenamiento). Puesto que el vapor libera energía térmica al condensar y dicha liberación tiene lugar a temperatura constante, los sistemas de almacenamiento térmico tradicionales no sirven para plantas solares con generación directa de vapor. Por este motivo es necesario disponer de un sistema de almacenamiento térmico basado en calor latente, mediante materiales que cambien de fase. Este es el objetivo del proyecto DISTOR: desarrollar un sistema de almacenamiento basado en materiales con cambio de fase.

El objetivo económico del proyecto DISTOR es alcanzar un coste específico de 20€ por kWh de capacidad del sistema de almacenamiento, ya que esta cifra haría rentable su implementación comercial en plantas solares térmicas.

El proyecto DISTOR está coordinado por el DLR y cuenta con un elevado número de participantes: CIEMAT-PSA, Sistemas de Calor (España), INASMET (España), IBERINCO (España), DEFY Systemes (Francia), EPSILON Ingénierie (Francia), SGL Technologies GMBH (Alemania), FLAGSOL GMBH (Alemania), Sanlucar Solar Solucar, S.A. (España), ZSW (Alemania), Weizmann Institute of Science (Israel), y el Central Laboratory of Solar Energy and New Energy Sources (Bulgaria).

Dentro del proyecto DISTOR se están estudiando diferentes configuraciones de un sistema de almacenamiento térmico basado en el uso de sales con el punto de fusión en el rango 250°C – 290°C, aptas para absorber el calor latente liberado por el vapor de agua al condensar a presiones del orden de los 70bar – 100 bar. El sistema de almacenamiento mediante cambio de fase que se está desarrollando dentro del proyecto DISTOR tiene que ser complementado con un sistema de almacenamiento mediante calor sensible si se trabaja con vapor sobrecalentado. Puesto que los estudios llevados a cabo para comparar las dos opciones que existen actualmente para plantas con GDV desde el punto de vista del tipo de vapor (saturado o sobrecalentado) han puesto de manifiesto que ambas opciones poseen ventajas e inconvenientes frente a la otra y no se puede

descartar ninguna de ellas hoy en día, ya que no existen datos experimentales suficientes que avalen una decisión de ese tipo (Eck, Zarza, 2004).

En el año 2004, la PSA realizó un estudio sobre las diversas configuraciones posibles a la hora de conectar un sistema de almacenamiento térmico con cambio de fase a un campo solar con generación directa de vapor. La Figura 64 muestra de forma simplificada como quedaría la conexión de un sistema de almacenamiento térmico en una planta solar de generación directa de vapor sobrecalentado. Como puede apreciarse, el sistema de almacenamiento está compuesto por dos bloques diferentes conectados en serie: uno a base de calor latente (cambio de fase) y otro en calor sensible. Durante la descarga del sistema de almacenamiento, la parte correspondiente a calor latente es la encargada de producir vapor saturado, mientras que el sobrecalentamiento del vapor lo produce el sistema de almacenamiento en calor sensible.

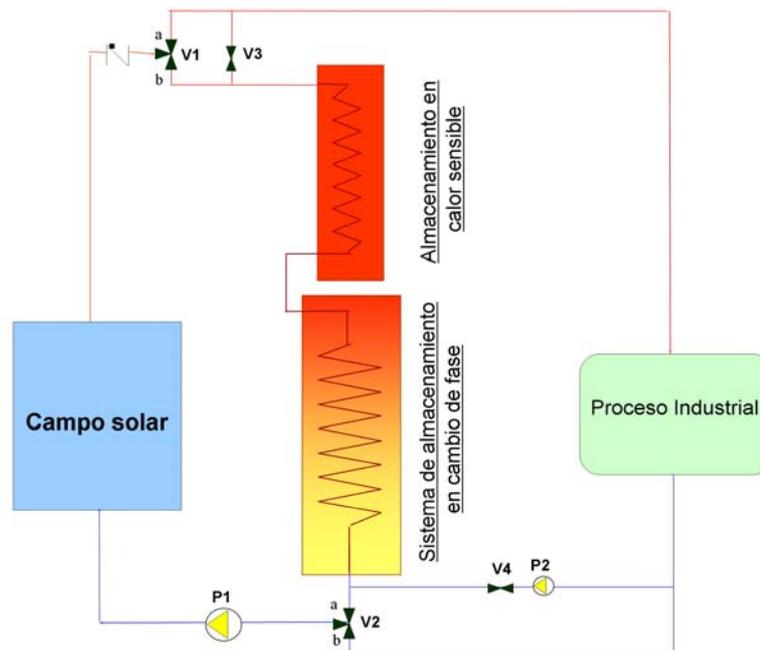


Figura 64. Esquema de implementación de un sistema de almacenamiento térmico en una planta solar de generación directa de vapor sobrecalentado

El estudio realizado por la PSA (Zarza 2004) ha puesto de manifiesto las ventajas de disponer de un sistema de almacenamiento dividido en módulos, como el mostrado en la Figura 65. Un diseño modular del sistema de almacenamiento tiene la ventaja de una mayor fiabilidad del sistema y una mayor flexibilidad de operación, ya que una avería en el sistema solo dejaría fuera de servicio el módulo afectado. Otra ventaja adicional de un diseño modular es un mejor aprovechamiento de la radiación solar directa en días con transitorios suaves pero frecuentes provocados por nubes aisladas. En este caso, el sistema de almacenamiento puede ser utilizado como amortiguador de los transitorios que se originan en los parámetros del vapor a la salida del campo solar. Para ello, toda la energía térmica suministrada por el campo solar es enviada al sistema de almacenamiento, siendo este el encargado de producir el vapor que demande el proceso industrial. La producción de vapor en el sistema de almacenamiento se empezaría una vez cargado al 100% el primer módulo del sistema, de modo que el campo solar pasaría a cargar el segundo módulo mientras que la energía almacenada en el primer módulo se emplea en producir el vapor requerido por el proceso.

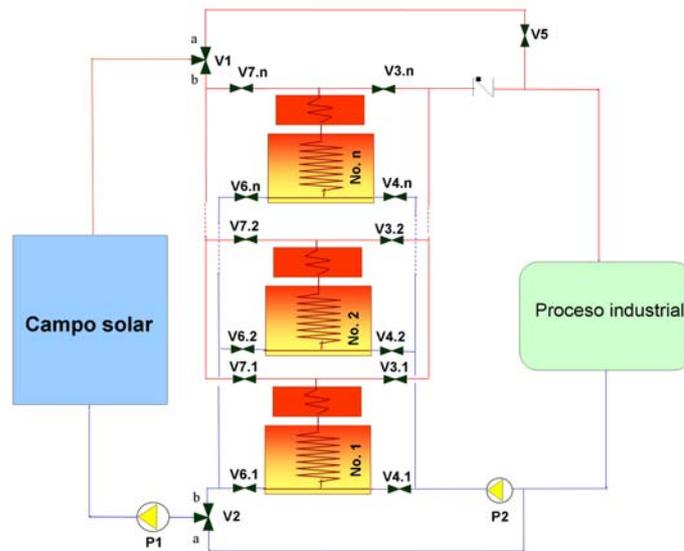


Figura 65. Esquema simplificado de un sistema de almacenamiento modular para una planta con generación directa de vapor sobrecalentado (cada módulo está compuesto por dos secciones conectadas en serie: una con cambio de fase y otra de almacenamiento en calor sensible).

PROYECTO FASOL

El objetivo del proyecto FASOL es el desarrollo de un nuevo colector cilindro-parabólico de tamaño medio, adecuado para pequeñas y medianas aplicaciones de la energía solar térmica hasta temperaturas de 300°C. En la actualidad hay una escasez importante de oferta en este campo, por lo que resulta interesante desarrollar un CCP con una buena relación calidad/precio y un tamaño adecuado para poder alimentar procesos industriales térmicos que demandan potencias moderadas. Existe un gran número de procesos industriales que consumen energía térmica dentro del rango de la media temperatura, pero para ellos resultan excesivamente grandes los colectores cilindro-parabólicos que se han desarrollado hasta el momento pensando en grandes plantas solares termoeléctricas (colectores LS3 y Eurotrough), donde la extensión del campo solar puede sobrepasar los 500,000 m². Obviamente, el tamaño que debe tener un CCP para aplicaciones pequeñas no debe ser el mismo que el recomendable para grandes campos. Por este motivo, la PSA en colaboración con la empresa Castaño Bolea e Hijos S.R.L. y el asesoramiento de dos expertos independientes (D. José Fuentes y D. Simón Avila) abordó el diseño de un CCP de tamaño medio, que resultase adecuado para aplicaciones pequeñas o medianas. A este proyecto se le dio el nombre de FASOL y ha contado con la ayuda financiera del Programa Nacional de Energía, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (PROFIT).

Se acometió el desarrollo y fabricación de un prototipo de colector cilindro-parabólico, el FASOL, cuyas principales características son:

- Ancho de parábola: 2.6 m
- Longitud de cada módulo concentrador: 6 m
- Longitud total del colector: 50 m
- Tipo de estructura: fabricada con composite moldeado y reforzado con costillas metálicas parabólicas
- Tipo de reflector: espejo convencional de vidrio fino con recubrimiento de plata (1.2 mm de espesor).

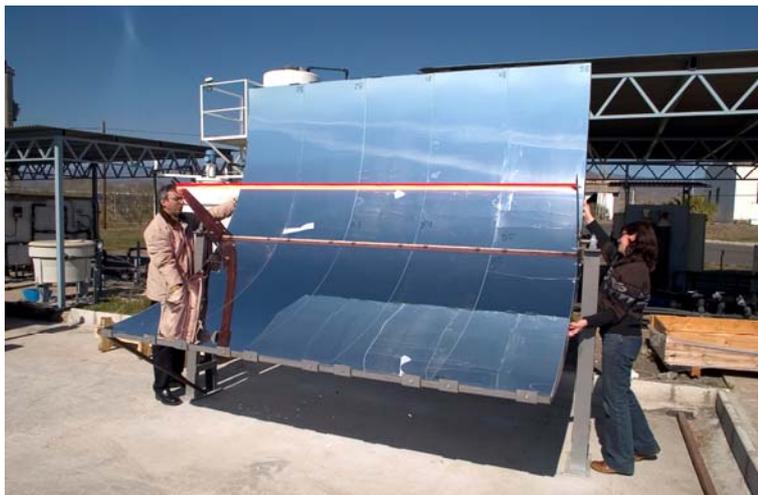


Figura 66. Vista de uno de los prototipos de concentrador cilindro-parabólico fabricados dentro del proyecto FASOL.

Durante el año 2004 se fabricaron y evaluaron dos prototipos de módulo cilindro-parabólico de 3 m de longitud (ver figura adjunta). Tras aparecer problemas de rotura en los espejos de vidrio fino, se evaluaron y estudiaron diferentes alternativas, entre las cuales destaca la de espejos de plata de primera superficie sobre chapa metálica y protegidos adecuadamente contra la intemperie. Siendo esta protección el aspecto más crítico, se evaluaron diferentes opciones y se comenzaron ensayos de durabilidad mediante cámara climática de envejecimiento acelerado. Los ensayos de envejecimiento acelerado mostraron que ninguno de los recubrimientos ensayados protegía adecuadamente la película de plata de los espejos de primera superficie, por lo que esta línea de investigación sigue en la actualidad abierta.

Entre las conclusiones obtenidas del trabajo realizado en 2004 cabe destacar las siguientes:

- para el desarrollo de estructuras a base de composites es indispensable la colaboración de una empresa especializada en el sector (con la que no se ha podido contar en este proyecto), porque el tratamiento y manejo de composites requiere de personal especializado en el tema, ya que los defectos de forma, que para otras aplicaciones pueden no ser tan importantes, en colectores solares determinan críticamente su calidad óptica y, por tanto, su rendimiento global.
- Los reflectores de vidrio fino que existen actualmente en el mercado son demasiado frágiles, al no estar templados de fábrica, para que puedan acoplarse fácilmente a una estructura parabólica con pequeño radio de curvatura. El desarrollo de nuevos colectores cilindro-parabólicos se vería favorecido de forma importante si existiesen reflectores resistentes a la intemperie y con flexibilidad suficiente para adoptar radios de curvaturas pequeños.

PROYECTO PREDINCER

El proyecto PREDINCER es un proyecto coordinado de I+D de ámbito nacional (CICYT), que cuenta con la financiación parcial del Ministerio de Educación y Ciencia. Comenzó en 2002 y finalizará en Noviembre de 2005. En el marco del proyecto la PSA 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.

En las actividades que se desarrollan se abordan básicamente tres aspectos: a) obtención de modelos dinámicos y acotación de las incertidumbres de dichos modelos para distintos procesos, b) implementación y requerimientos computacionales de los controladores diseñados a partir de dichos modelos, y c) garantizar la robustez de los controla-

dores. Las actividades que realiza la PSA están relacionadas con el estudio del comportamiento de la planta de generación directa de vapor DISS (Valenzuela *et al*, 2004). El campo solar es flexible en su configuración de operación (modos Recirculación y Un Solo-Paso) pero, independientemente de la configuración elegida, se requiere o una estructura de control multilazo (control SISO) o bien una estructura de control multivariable (control MIMO). En el proyecto PREDINCER se ha elegido la estructura de control SISO y para ésta se diseñan los controladores predictivos.

Los resultados principales que se han obtenido son: a) la adquisición de nuevos conocimientos derivados de la aplicación de técnicas de modelado (identificación paramétrica o aplicación de primeros principios (modelado no lineal)) que nos permiten acotar las incertidumbres de los parámetros o errores para procesos similares al estudiado, y b) implementación y uso de técnicas que permiten la compatibilidad de herramientas informáticas diferentes de modelado y control. En relación con el modelado se está haciendo uso de la herramienta Dymola/Modelica que permite el estudio del comportamiento dinámico del sistema aplicando técnicas de modelado de sistemas basados en primeros principios (masa, energía, momento); pero también se han obtenido, mediante identificación paramétrica y a partir de los datos experimentales, modelos dinámicos de bajo orden con incertidumbre aditiva del tipo:

$$\sum_{i=0}^{n_a} a_i y(t) = \sum_{i=0}^{n_b} b_j u(t-d-j) + e(t)$$

Estos modelos se están utilizando para la aplicación de técnicas de control predictivo robusto (MPC robusto). Para diseñar el controlador MPC teniendo en cuenta la incertidumbre o discrepancias entre el modelo y la planta, lo que se puede hacer es considerar el peor caso posible de la salida calculada con el modelo. Entonces se implementa un algoritmo para minimizar el máximo de los valores que puede tomar la función objetivo del MPC clásico para todos los valores considerados de la incertidumbre (control predictivo mín-max), es decir, la secuencia óptima de actuaciones del controlador se calcula como:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} \max_{\theta \in \Theta} J(u, \theta)$$

donde U es el conjunto de secuencias de actuaciones admisibles, θ representa la incertidumbre y Θ es el conjunto de valores considerados de la incertidumbre.

Durante 2004 se ha implementado también un servidor de datos OPC (OLE for Process Control) en el sistema de control y adquisición de datos (SCADA) de la planta DISS de la PSA. El uso de OPC nos permite comunicar en tiempo real el SCADA de la planta DISS (ABB Infi90) con las herramientas de modelado y simulación que utilizamos para el desarrollo e implementación de controladores (Modelica/Dymola o Matlab/Simulink).

OTRAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL 2004

Adicionalmente a las actividades llevadas a cabo por la PSA dentro del marco de los proyectos INDITEP, FASOL, DISTOR y PREDINCER, cabe mencionar también nuestra participación dentro de la Tarea 33/4 ('Solar Heat for Industrial Processes', SHIP; www.iea-ship.org) de la Agencia Internacional de la Energía, con el fin de aprovechar las experiencias y conocimientos que sobre energía solar térmica aplicada a procesos industriales poseen otras entidades internacionales. Nuestra participación en la Tarea 33/4 de la IEA se enmarca principalmente dentro de las Subtareas C (Collectors and Components) y D (System Integration and Demonstration), compartiendo experiencias con el resto de participantes en el campo de las aplicaciones de la energía solar a procesos industriales de calor que funcionan en el rango de temperaturas 100°C – 250°C. A finales de 2004 comenzamos a preparar el Workshop previsto para celebrarse en Madrid a finales de febrero de 2005, coincidiendo con la Feria de la Climatización GENERA'05.

El nuevo marco legal definido en España para las plantas solares termoeléctricas, a partir de las condiciones definidas por los Reales Decretos 436/2004 (BOE del 27/03/2004) y 2351/2004 (BOE del 24/12/2004), ha supuesto un impulso importante para la actividad industrial española en relación con este tema. La prima de 0,18 €/kWh establecida para la electricidad producida con plantas solares de concentración en cualquiera de sus tres variantes (cilindro-parabólicos, receptor central o discos Stirlings), junto con la posibilidad de hibridar con gas entre un 12% y un 15% en base anual, ha afianzado el interés de los sectores inversor e industrial por las tecnologías de concentración solar. Estas atractivas condiciones han motivado que un elevado número de empresas hayan acudido a la PSA en busca de asesoramiento y colaboración. Esto ha requerido un importante esfuerzo por parte de la PSA para dar el apoyo y asesoramiento pedidos en relación con la tecnología de colectores cilindro-parabólicos. En esta línea, la PSA organizó un curso intensivo sobre este tema durante la primera semana del mes de noviembre de 2004. La asistencia a dicho curso fue numerosa y estuvo constituida por alumnos de los diversos sectores involucrados en el mercado español de la energía.

Aplicaciones Mediambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar

INTRODUCCIÓN

Durante el año 2004, el "Programa" anteriormente denominado "Aplicaciones Químicas de la Radiación Solar" ha pasado a denominarse "Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar". Este cambio de nombre no solo no ha supuesto ninguna modificación significativa en las actividades que se están desarrollando sino que estas se han reforzado y ampliado, con el objetivo de potenciarlas y complementarlas entre sí en todo lo posible.

El caso más claro quizás sea el de los procesos asociados al uso de la radiación solar para abordar diversas problemáticas del agua. En este campo, la amplia experiencia acumulada en el campo de la fotocatalisis solar para la detoxificación de aguas ha resultado muy útil para promover otro tipo de iniciativas, como es el caso de la desinfección de agua potable o la desalación solar de agua de mar, que han permitido una remarkable complementariedad en los desarrollos tanto científico como tecnológico, realizados en el marco de diversos proyectos. Este tema del agua se pretende que sea una de las áreas de investigación centrales de este programa dada la importancia y el impacto social del tema. En este sentido, todos los organismos internacionales reconocen claramente que la escasez o la falta de agua va a ser uno de los principales retos a los que se va a enfrentar la Humanidad en la primera mitad del presente Siglo XXI. Todo ello conlleva el que tanto los retos, como las oportunidades y posibilidades que van a existir en un futuro inminente para el desarrollo de tecnologías medioambientalmente benignas relacionadas con el agua 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 2004 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.

La novedad más destacada de la reorganización del CIEMAT implementada en este año 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 programa de "Evaluación de Recursos de Energías Renovables"). Las posibilidades y potencialidades que esta incorporación supone para el conjunto del gru-

po 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. Sin embargo, claramente, el campo de mayor actividad de este grupo está centrado en la caracterización y determinación de la radiación solar disponible para la potencial instalación de plantas solares de producción de energía eléctrica, campo actualmente en pleno auge y desarrollo, con una continua demanda por parte de empresas interesadas.

Muchos y muy destacados han sido los hitos conseguidos dentro del año 2004. Sin embargo, si hubiera que destacar alguno habría que citar dos como los más relevantes. El primero sería la inauguración formal 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, promovido por la empresa Albaida Recursos Naturales y Medioambiente, se basa en los desarrollos científicos y tecnológicos realizados en la Plataforma Solar de Almería durante los últimos años. El segundo hito ha sido la concesión a dos de los miembros del grupo (los doctores Julián Blanco y Sixto Malato) del Gran Premio Europeo de Innovación 2004 (European Gran Prix for Innovation Awards), en su modalidad de "Premio del Jurado". Este premio supone, además de la satisfacción obvia por el mismo a los científicos galardonados, un importante reconocimiento internacional de la labor que el grupo en su conjunto viene desarrollando durante los últimos años.

En las siguientes secciones se describen de forma resumida los principales proyectos y actividades desarrollados durante 2004.

- 1) Procesos de detoxificación solar de efluentes líquidos
- 2) Procesos de desinfección solar de agua potable
- 3) Procesos de desalinización solar de agua de mar
- 4) Caracterización y medida de la radiación solar
- 5) Almacenamiento de la energía solar

1) PROCESOS DE DETOXIFICACIÓN SOLAR DE EFLUENTES LÍQUIDOS **TRATAMIENTO COMBINADO FOTOCATÁLISIS-OZONIZACIÓN (FOTOZON)**

Este proyecto aborda el estudio de la eliminación de compuestos contaminantes recalcitrantes en fases acuosas, a partir de la utilización de Procesos Avanzados de Oxidación (PAO's). La originalidad del proyecto estriba en investigar la combinación Fotocatálisis-Ozonización, para la cual se ha observado, en experiencias preliminares, que se produce una sinergia importante, aumentando de forma significativa la capacidad detoxificante de ambas metodologías cuando se utilizan por separado [Farré y col., 2004].

Los objetivos generales del proyecto son los siguientes:

- 1) Investigación de las sinergias fotocatalisis (homogénea y heterogénea) + ozonización. Obtención de los parámetros óptimos de operación.
- 2) Obtención de las condiciones que llevan a la detoxificación. Combinación de la tecnología propuesta con un tratamiento biológico. Aplicación a la detoxificación de una agua residuales.
- 3) Preparación de fotocatalizadores a base de TiO₂ que mejoren su respuesta a la luz solar.
- 4) Realización de ensayos en planta piloto, con aprovechamiento de la luz solar. Validación a escala real de los experimentos de laboratorio. Aplicación a la depuración solar de efluentes residuales industriales.
- 5) Diseño o pre-diseño de una instalación para el tratamiento de efluentes.



Figura 67. Vista del sistema de ozonización instalado en la Plataforma Solar de Almería. 1, Generador de ozono. 2, Columna de contacto. 3, Bomba recirculación. 4, Analizador de ozono. 5, Destructor de ozono.

El proyecto tiene una duración de 3 años (2003-2005), en los cuales la Plataforma Solar de Almería interviene fundamentalmente en el segundo y tercer año. De hecho, durante 2004 se realizaron experimentos con la planta piloto instalada al efecto y que aparece en Figura 67. El sistema completo consta de un generador de ozono (hasta 15 g O₃/h), un analizador de ozono, botella de oxígeno a presión, columna de ozonización, bomba de recirculación, rotámetro para agua y destructor de ozono residual en cabeza de columna de ozonización (para evitar la emisión de ozono a la atmósfera). Las tuberías y válvulas por las que circula en agua (con o sin ozono disuelto) están fabricadas en polipropileno y se ha utilizado PTFE para las tuberías por las que circulan O₂ y O₃. La columna de contacto es de PVC, opaco en la base (y de mayor diámetro, 200 mm D.E.) y transparente en la parte superior (160 mm D.E.). Esto se ha hecho así al no ser posible encontrar en el mercado PVC transparente de 200 mm de D.E. El volumen total del sistema es de 50.7 L, pero dependiendo del nivel de líquido en el sistema puede trabajarse como mínimo a 35 L, y como máximo a 46 L.

Se ha evaluado la idoneidad de este tratamiento (ver Figura 68) con los compuestos Alachlor, Atrazina, Clorfeninfos, Diuron e Isoproturon, todos ellos considerados como prioritarios por la UE (Decision No 2455/2001/EC of the European Parliament and of the Council of 20 November 2001 Establishing the List of Priority Substances in the Field of Water Policy and Amending Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 15.12.2001.). Al inicio de la

ozonización (los primeros 30 minutos) el agua adquiere un amarillo intenso (procedente de los intermedios de la degradación de los plaguicidas) que va desapareciendo conforme el tratamiento continúa. De la misma forma, el pH disminuye hasta un valor cercano a 3 (generación de ácidos inorgánicos a partir de los heteroátomos contenidos en las moléculas de plaguicidas) y los compuestos son degradado totalmente (evidenciado por medidas de Cromatografía Líquida). Es necesario remarcar que si bien los compuestos son degradados sustancialmente (de hecho, la decoloración es completa), la medida del Carbono Orgánico Total (COT) evidencia una reducción de únicamente un 20%. Por tanto, el ozono ha sido responsable fundamentalmente de una oxidación parcial de los compuestos contenidos en el agua de ensayo, pero no de su oxidación completa a dióxido de carbono. La conclusión más importante de este estudio preliminar es que el ozono por si solo no es capaz de degradar los compuestos aunque sí transformarlos en intermedios más oxidados.

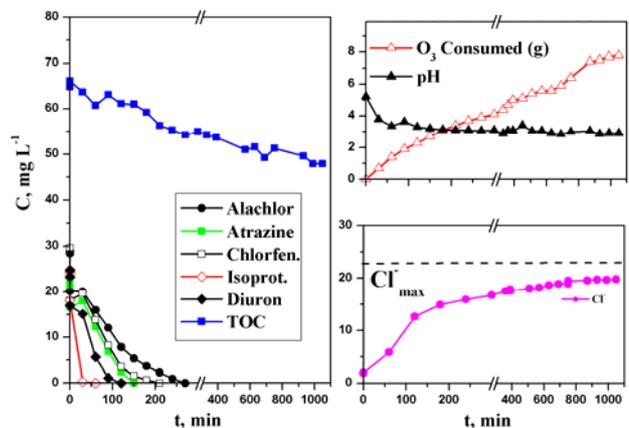


Figura 68. Degradación de diferentes plaguicidas por ozonización (izquierda). Producción de cloruro, ozono consumido y variación de pH durante la ozonización (derecha)

Por tanto, la intervención del foto-Fenton en planta solar como tratamiento complementario queda totalmente justificada, más si cabe al haberse alcanzado mediante la ozonización un pH cercano a 3, que es el pH óptimo de trabajo del proceso de foto-Fenton [Agüera y col., 2004; Gummy y col., 2004; Gernjak y col., 2004a, 2004b, 2004c; Pérez-Estrada y col., 2004; Sarriá y col., 2004a].

ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES PERSISTENTES MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA (FOTODETOX).

<http://www.psa.es/webespprojects/fotodetox/index.html>

Este proyecto, financiado con el Plan nacional de I+D+I de España, ha comenzado en 2004 y es coordinado por el grupo Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar de la PSA. Además cuenta como colaboradores con el Dep. de Ingeniería química de la Univ. de Almería y con el Dep. de Ingeniería Textil y Papelera de la Univ. Politécnica de Valencia. Tiene como objetivos fundamentales los siguientes:

- 1) Tratamiento de aguas conteniendo plaguicidas mediante procesos fotocatalíticos solares (foto-Fenton y TiO_2) en planta piloto. Obtención de los parámetros óptimos de operación.
- 2) Estudio de la biodegradabilidad mediante cultivos monoespecíficos de bacterias (seleccionados de entre aquellos habituales en las EDAR) de aguas contaminadas con plaguicidas y tratadas parcialmente mediante fotocatalisis. Se evaluarán qué cepas de bacterias se muestran más activas en biodegradabilidad de contaminantes.
- 3) Desarrollo de modelos para predecir la biodegradabilidad de aguas tratadas parcialmente mediante fotocatalisis.
- 4) Estudio de la biodegradabilidad (mediante fangos activados reales procedentes de diferentes EDAR) de aguas contaminadas con plaguicidas y tratadas parcialmente mediante fotocatalisis.
- 5) Desarrollo de un biorreactor especialmente adaptado a este tipo de aguas tratadas parcialmente mediante fotocatalisis.
- 6) Prediseño de una planta de tratamiento de aguas, mediante fotocatalisis solar, con el objetivo de pre-tratar aguas conteniendo contaminantes persistentes y hacerlas compatibles con los requerimientos de entrada de una EDAR municipal.

Durante este primer año se ha realizado un minucioso estudio de los principales plaguicidas utilizados en la agricultura intensiva en la provincia de Almería, y el uso que se hace de ellos en prácticas agrícolas, aguas de lavado de equipos de tratamiento, vertidos procedentes de industrias agrarias, vertido incontrolado de envases, etc. En la Figura 69 se muestran las estructuras de aquellos finalmente seleccionados. Además, se han puesto a punto las técnicas analíticas necesarias para evaluar su degradación y se ha comprobado la no biodegradabilidad de aquellos seleccionados. Una de las primeras tareas ha sido el estudio de viabilidad de fotocatalisis con TiO_2 de cada plaguicida en planta piloto solar, una parte del cual se muestra en la Figura 70.

Los cuatro plaguicidas que se muestran en la Figura 69, y todos los demás son degradados mediante TiO_2 totalmente y la mineralización (degradación del COT) también es muy sustancial, alcanzándose valores superiores al 80% en todos los casos. La concentración inicial ha sido siempre la misma (50 mg/L) y la adsorción en la superficie del catalizador no ha sido relevante en ningún caso. En la figura puede apreciarse que el periodo en la oscuridad de 15 minutos ($t < 0$) no produce ninguna variación en la concentración y ésta disminuye solo cuando se inicia la iluminación ($t=0$). La cinética de la reacción de degradación ha sido siempre la misma, es decir, aparente orden 1. Esto es, la velocidad disminuye a medida que disminuye la concentración del contaminante. La mineralización, sin embargo, no sigue una cinética definida ya que la descomposición del COT viene gobernada por la descomposición de una amplísima variedad de compuestos que se

TRATAMIENTO DE AGUAS CONTENIENDO CONTAMINANTES ORGÁNICOS PERSISTENTES MEDIANTE COMBINACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA Y BIOLÓGICOS (CADOX).

<http://www.psa.es/webeng/projects/cadox/index.html>

De acuerdo a los objetivos del proyecto, definidos en el informe anual de la PSA de 2003, las primeras tareas del proyecto han sido diseñadas para determinar los principales parámetros relativos a la degradación de los compuestos objetivo mediante cada método de oxidación (TiO_2 , foto-Fenton y ozono) usado en el proyecto [Maldonado y col., 2004a]. Se ha demostrado que todos los compuestos objeto de este trabajo pueden ser tratados exitosamente mediante foto-Fenton, TiO_2 y ozono [Malato y col., 2004n]. El compuesto inicial es degradado rápidamente y la mineralización del COT es más lenta con los métodos fotoquímicos (sobre todo con TiO_2), pero mediante ozonización la mineralización es muy pequeña. El tiempo de tratamiento (para el 90% de mineralización) usando 2 mg/L de Fe no ha sido superior a 3 horas para los compuestos ensayados. Cuando se ha utilizado una concentración de 1 mM de Fe la mineralización ha sido alcanzada en menos de 1 hora. Esto indica que 2 mg/L de Fe puede ser una buena elección para garantizar una degradación suficiente mediante foto-Fenton. Puede ser especialmente útil para un acoplamiento con tratamiento biológico ya que la separación del Fe no es necesaria a esa concentración. 1 mM de Fe podría ser necesaria para el tratamiento de aguas residuales con cientos de mg/L de COT [Malato y col., 2004i, 2004l, 2004m; Maldonado y col., 2004b, 2004c]. Durante 2004 se han instalado dos prototipos construidos (uno en la PSA y otro en INETI, Portugal) durante el proyecto y cuyas características principales se muestran en Figura 71, Figura 72 y Figura 73.

El objetivo principal de la construcción de estos prototipos ha sido demostrar que es posible poder tratar fotocatalíticamente un agua hasta un nivel de degradación de los contaminantes contenido en ella que permita un tratamiento biológico. Además, se ha planteado la posibilidad de que la ozonización sea beneficiosa como pretratamiento al

foto-Fenton o incluso la combinación de hierro y ozono como alternativa al hierro y peróxido de hidrógeno (foto-Fenton). Además de esto, se ha conseguido diseñar y construir un fotoreactor (Figura 72) mejor adaptado al proceso de foto-Fenton que los existentes con anterioridad al inicio del proyecto. Fundamentalmente mediante el incremento del diámetro del absorbedor y, por tanto, de la apertura del CPC [Malato y col., 2004k]. El re-

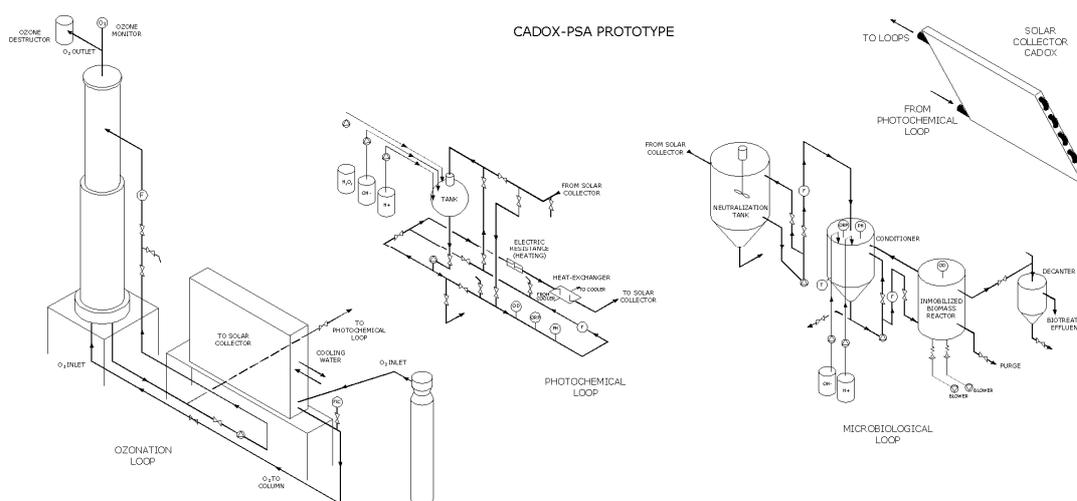


Figura 71. Esquema del prototipo construido en la PSA en proyecto CADOX y que consta de un ozonizador, un reactor fotocatalítico termostatzado y un reactor biológico con biomasa en lecho fijo



Figura 72. Nuevo colector CPC desarrollado en proyecto CADOX para aplicaciones con foto-Fenton.

actor fotocatalítico construido tiene como principal característica, además del nuevo CPC, la posibilidad de realizar experimentos con control de temperatura. Esto se ha hecho con la intención de poder evaluar correctamente la influencia que este parámetro tiene en el proceso de foto-Fenton. Además se ha dotado al mismo de la instrumentación necesaria para un correcto control del pH y de la concentración de peróxido de hidrógeno, parámetros que deben controlarse de la mejor forma posible en foto-Fenton. Todo esto permitirá realizar los ensayos en las mejores condiciones posibles.

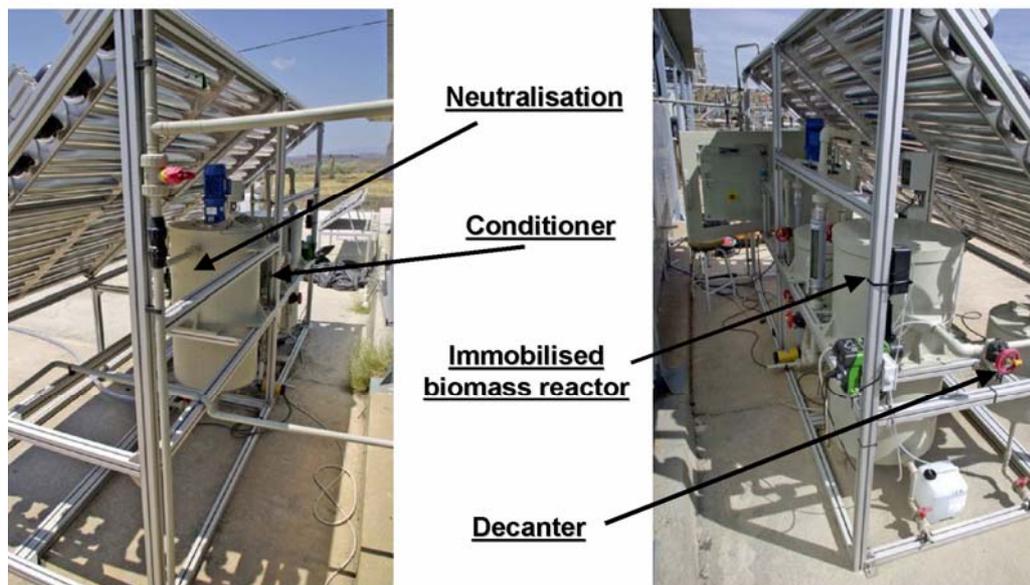


Figura 73. Reactor biológico instalado en la PSA (debajo de nuevo colector CPC) y conectado con éste.

La instalación de un reactor biológico permitirá realizar experimentos con éste lo más reales posible y que demuestren la idoneidad del pre-tratamiento fotocatalítico para poder alimentar un reactor biológico con agua procedente de él. El reactor (Figura 73) consta de un tanque de neutralización, dónde se recibe el agua procedente del tratamiento fotocatalítico para un correcto ajuste del pH. De este tanque, el agua se transfiere al tanque de acondicionamiento (dónde se adicionan todos los reactivos necesarios para el biotratamiento) que está continuamente en recirculación con el reactor que contiene la

biomasa inmovilizada. La biomasa inmovilizada (sobre un soporte plástico inerte) se genera "in-situ" mediante la recirculación durante unos días de fangos activados procedentes de una depuradora municipal. A lo largo de todo el proceso se debe mantener el pH entre los valores de 6,5 – 7,5.

RECOGIDA Y RECICLADO MEDIOAMBIENTAL DE ENVASES PLÁSTICOS DE PRODUCTOS FITOSANITARIOS MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR (ALBAIDA)

Durante 2004 se ha conseguido la instalación definitiva, puesta en marcha y evaluación preliminar de la planta [Blanco y col., 2004b, 2004h, 2004i, 2004j, 2004k; Malato y col., 2004h]. La planta de fotocátalisis de colectores solares CPCs consta de 4 líneas de 14 módulos iguales (20 tubos/módulo, 2,7 m²/módulo) cada una (superficie total de colectores 150 m², volumen del fotorreactor 1061 L) montados en una plataforma fija inclinada 37° respecto a la horizontal (latitud local). La configuración del sistema se muestra en la Figura 74. Cada línea de 14 módulos está conectada en serie y el agua fluye directamente de uno a otro, y finalmente al tanque, de manera independiente cada una de las líneas, aunque utilizando la misma bomba. Cada una de las 4 líneas instaladas en paralelo se puede operar de manera independiente, cerrando la válvula de entrada, aunque lo habitual es que esté todo el sistema operativo. El sistema se opera de manera discontinua por recirculación del agua mediante un tanque (tanque de recirculación de unos 2000 L, 150 L en la parte cónica y 15 L/cm en el resto) y una bomba centrífuga. Cuando se ha terminado el tratamiento de una carga de agua procedente del lavado de envases de plaguicidas, ésta se devuelve al sistema de lavado mediante otra bomba. Este agua es trasferida a unos tanques dispuestos al efecto en la planta de lavado de envases. Una vez vacío, el sistema se llena de nuevo con agua procedente de la planta de lavado de envases y una bomba instalada en la nave de lavado de envases, que impulsa el agua contenida en los tanques anteriormente referidos. Una vez llenado el tanque (o cuando el nivel del mismo lo permita), se procede al llenado de la planta de fotocátalisis. Una vez llena la planta, se recircula el agua hasta que ésta tenga la calidad requerida, lo cual se determina mediante el análisis de las muestras tomadas en la válvula de muestra dispuesta al efecto. Además de lo anteriormente descrito, durante el tratamiento se dosifica peróxido de hidrógeno (agua oxigenada). Como los CPCs tienen un factor de concentración aproximadamente de 1, el sistema está al aire libre y sin aislamiento térmico, la temperatura máxima alcanzada dentro del fotorreactor es de 40°C.

Con el objeto de determinar las mejores condiciones de operación de la planta, así como los posibles problemas relacionados con el tratamiento del agua, se realizaron ensayos preliminares, como el siguiente: Adición de una mezcla de 8 plaguicidas comerciales en agua procedente del lavado de envases de ácidos (nitríco, sulfúrico y fosfórico, mayoritariamente). La intención de este ensayo era doble. Por un lado demostrar que sobre un agua "real" procedente de la planta de lavado de envases era posible conse-



Figura 74. Vista del campo de colectores CPC (150 m²) instalados en planta de reciclaje de residuos plásticos en La Mojonera (Almería)

guir una eficiencia adecuada. Por el otro, comprobar que era posible fijar el pH inicial requerido sin la adición de H_2SO_4 , si no que el ajuste de pH se consiga a partir de lavar envases de ácido vacíos, que también se tratan en la planta. El agua "real" además contiene sólidos en suspensión, cuyo origen es: tierra y polvo adherido a los envases, pequeños restos de plástico, restos de etiquetas, etc. A pesar de realizarse un filtrado del agua en la planta de lavado, éste no consigue retirar la mayoría de las partículas de tamaño muy pequeño. Los sólidos en suspensión confieren al agua una opacidad que no es deseable para un tratamiento basado en la absorción de luz.

En el tratamiento mostrado en la Figura 75 no se consiguió el correcto tratamiento del agua en un principio. Como se puede apreciar, no se consiguió degradación alguna del TOC durante las primeras 22 horas de tratamiento. Durante ese intervalo de tiempo el consumo de peróxido de hidrógeno también fue bajo, lo cual es consistente con la poca degradación del TOC. De hecho, el peróxido de hidrógeno se fue acumulando en la planta (concentración en ascenso progresivo), siendo necesario detener su dosificación. Por otro lado, también se comprobó que la gran mayoría del Fe adicionado al principio no estaba en disolución (se había perdido más del 75%). Después de apreciar este comportamiento anómalo, se procedió a un análisis detallado del agua y se comprobó que existía una elevada concentración de fosfato (procedente del lavado de envases de ácido fosfórico, ya que no existe en el agua bruta). Es conocida la posible formación de fosfato de hierro insoluble [Wiszniewski et al., 2004]. Esto se demostró mediante el filtrado a vacío de un volumen conocido de agua tratada y la redisolución a pH muy ácido del sólido retenido en el filtro. Mediante análisis de PO_4^{3-} y Fe en esa muestra se determinó la presencia equimolar de ambos. Además, mediante un cálculo detallado se determinó que había precipitado todo el Fe que no se encontraba en disolución. Por tanto, se decidió añadir cantidades perfectamente conocidas de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (simbolizadas como "1" en la Figura 75) en varias tandas y seguir el comportamiento del Fe en disolución.

En el momento que todos los fosfatos son eliminados del agua, las siguientes cantidades de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ añadidas aportan al agua el Fe necesario para el tratamiento. Puede apreciarse que a partir de 25 h, la concentración de Fe sube hasta valores cercanos a 100 mg/L, más que suficiente para que el tratamiento fotocatalítico funcione. De hecho, en ese momento el consumo de peróxido de hidrógeno se acelera y la mineralización del TOC también.

2) PROCESOS DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA POTABLE

Resulta evidente que la desinfección de agua es una necesidad absolutamente básica para el desarrollo de la actividad humana ya que el agua es, a su vez, el principal vector de transmisión de enfermedades. Esta necesidad está más o menos resuelta en los países desarrollados y en todas las grandes urbes del planeta. Sin embargo, el tema dista mucho aún de estar resuelto en una gran cantidad de entornos rurales de los países denominados "en vías de desarrollo", con una importante problemática de salud asociada. Todos los indicadores, además, parecen apuntar a que el problema va a ir creciendo en las próximas décadas debido a factores como el aumento de la población o el cambio

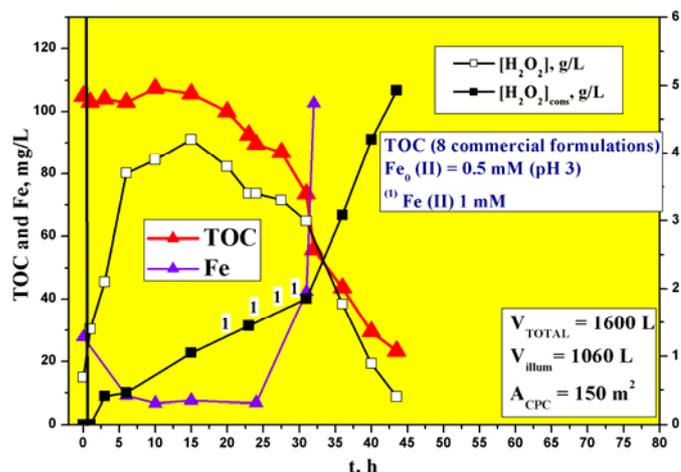


Figura 75. Degradación de TOC, consumo de peróxido de hidrógeno y evolución de hierro disuelto durante ensayo en planta de Albaida de diferentes plaguicidas comerciales

climático, que acentuarán de forma notable las problemáticas asociadas a la escasez o falta de calidad del agua, dificultando aún más el desarrollo social y económico de las zonas más deprimidas del planeta.

Precisamente es esta falta de desarrollo social y económico la que dificulta la implementación de infraestructuras que permitan ayudar a resolver o paliar el problema. 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 pero requiere la existencia de una infraestructura mínima. Es por ello que el desarrollo de tecnologías simples y eficaces de desinfección de agua potable que, a la vez, puedan ser totalmente autónomas y económicamente viables, resultan especialmente interesantes.

Es en este contexto en el cual la PSA se encuentra abordando en la actualidad diversas iniciativas encaminadas a desarrollar una tecnología que permita la desinfección de agua mediante el uso de la radiación solar como única fuente de energía. Se describen a continuación las actividades desarrolladas en este campo en el año 2004 dentro del contexto de dos proyectos europeos: SOLWATER y AQUACAT [Fernández y col., 2004a, 2004d, 2004e, 2004g].

DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA POTABLE (SOLWATER)

<http://www.psa.es/webeng/solwater/index.html>

El proyecto SOLWATER (cuyo título formal es "Cost effective solar photocatalytic technology to water decontamination and disinfection in rural areas of developing countries"), es un proyecto financiado por la Comisión Europea (contrato n°: ICA4-CT-2002-10001) dentro del programa INCO (EU-DG Research, Confirming the International Role of Community Research for Development). Su presupuesto total es de 1818,6 k€, y se encuentra coordinado por el Grupo de Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar; su duración es de 3 años (noviembre de 2002 a octubre de 2005) 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 sudamericanos (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA-México, COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA-Argentina, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA-Perú, TINEP S.A. de C.V.-México), dado que el área de aplicación potencial de los resultados del mismo es América Latina.

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un sistema solar totalmente autónomo para la desinfección de agua potable en entornos rurales y sin la utilización de aditivo químico alguno [Blanco y col., 2004g; Sarriá y col., 2004b, 2004c]. El sistema final realizará el tratamiento de agua basado en la combinación de dos procesos fotocatalíticos activados ambos mediante la luz solar para la generación de especies altamente oxidantes que puedan resultar eficaces para la inactivación y eliminación de elementos patógenos en agua. El primero de estos procesos es el uso del dióxido de titanio inmovilizado sobre una matriz inerte para generar radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) y el segundo es la generación de oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$) a partir de un fotosensibilizador basado en complejos de Rutenio (II) fijado sobre una matriz polimérica. Adicionalmente, se espera que el sistema final sea también capaz de eliminar potenciales contaminantes orgánicos persistentes que puedan estar presentes a nivel de trazas [Augugliaro y col., 2004a, 2004b, 2004c; Di Paola y col., 2004; Fernández-Alba y col., 2004].

Para llevar a cabo el desarrollo de este sistema final, se han diseñado y construido diversos prototipos (ver Figura 76) para poder comparar experimentalmente el comportamiento y eficiencia de dos conceptos diferentes de fotorreactor: uno concéntrico con un tubo dentro del reactor cilíndrico donde va fijado el catalizador y otro plano dispuesto verticalmente en el interior del tubo. En ambos casos, la óptica utilizada estaba basada



Figura 76. Prototipo de captador solar para aplicaciones de desinfección de agua con catalizador fijado sobre una placa plana dispuesta verticalmente en el interior del tubo de vidrio

en colectores solares tipo CPC de 1 m² de área captadora. A su vez, para cada uno de estos conceptos de fotorreactor se han utilizado dos catalizadores distintos: TiO₂ soportado en un papel especial desarrollado por la empresa Ahlstrom Paper Group (Francia) y complejos de Ru(II) con ligandos poliazoheterocíclicos inmovilizados en soportes poliméricos, proceso este último desarrollado por la Universidad Complutense de Madrid. Durante el año 2004 se ha procedido al ensayo de estos prototipos utilizando *E. Coli* como referencia para estudiar la eficiencia desinfectante de los diferentes sistemas [Duffy y col., 2004; Gill y col., 2004; McGuigan y col., 2004; McLoughlin y col., 2004a, 2004b].

La Figura 77 muestra algunos de los resultados obtenidos en la inactivación de bacterias de *E. Coli* mediante complejos de Ru(II) inmovilizados sobre silicón porosa frente a los obtenidos con el papel KN47, conteniendo 19.3 g de TiO₂ P25 por metro cuadrado de superficie. El experimento denominado blanco se corresponde con papel KN47 pero sin contener catalizador, mientras que los ensayos de control se realizaron en las mismas

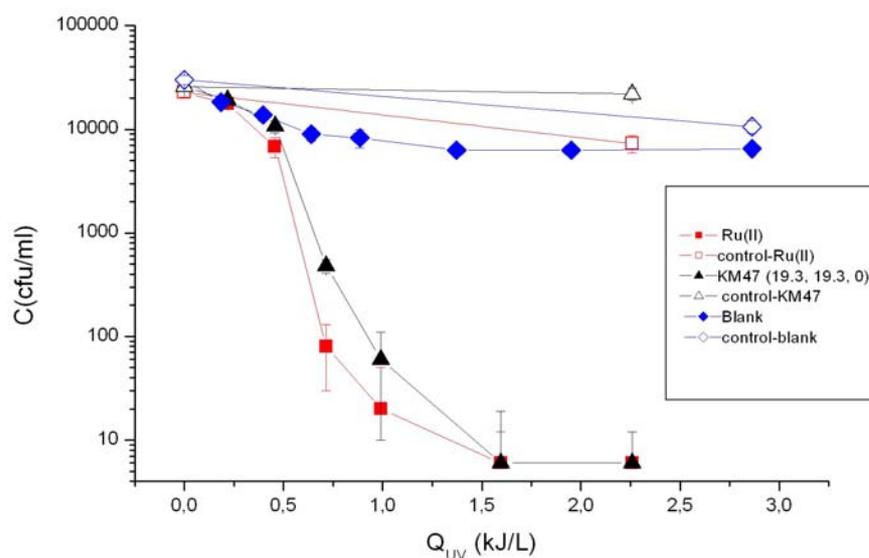


Figura 77. Actividad desinfectante de complejos de Ru(II) fotosensibilizados comparados con óxido de titanio Degussa P25 soportado sobre papel de Ahlstrom KN47. La evolución en la concentración de *E. Coli* es representada frente a Q_{UV} (energía UV introducida en el interior del fotorreactor por unidad de volumen del mismo)

condiciones pero sin irradiación solar (sistemas cubiertos para evitar la llegada de luz). Como puede apreciarse, los resultados obtenidos han sido muy similares con ambos sistemas.

En función de los resultados experimentales obtenidos por la PSA, conjuntamente con los de otros participantes en el proyecto (UCM, NTUA, EPFL y LACE), se ha procedido a diseñar el sistema final que, en el marco del proyecto SOLWATER, serán ensayados en 2005 en áreas rurales aisladas de tres localizaciones Sudamericanas diferentes de Argentina, Perú y México, respectivamente. El objetivo es el de analizar posteriormente los resultados obtenidos en 3 entornos socio-económicos y de latitud solar diferentes.

DETOXIFICACIÓN Y POTABILIZACIÓN DE AGUA MEDIANTE FOTOCATÁLISIS EN PAÍSES SEMI-ÁRIDOS (AQUACAT) <http://aquacat.univ-lyon1.fr/>

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. Los objetivos del proyecto AQUACAT son básicamente los mismos que los del proyecto SOLWATER con la principal salvedad que la región a la cual va dirigida el sistema final que se desarrolle es, en este caso, el área mediterránea. Dicho sistema final aquí será finalmente probado en comunidades de localidades específicas de Egipto, Marruecos, Grecia y Túnez. La Figura 78 muestra el concepto del sistema final a desarrollar y la Figura 79 una foto de este sistema ya construido y preparado para su ensayo.

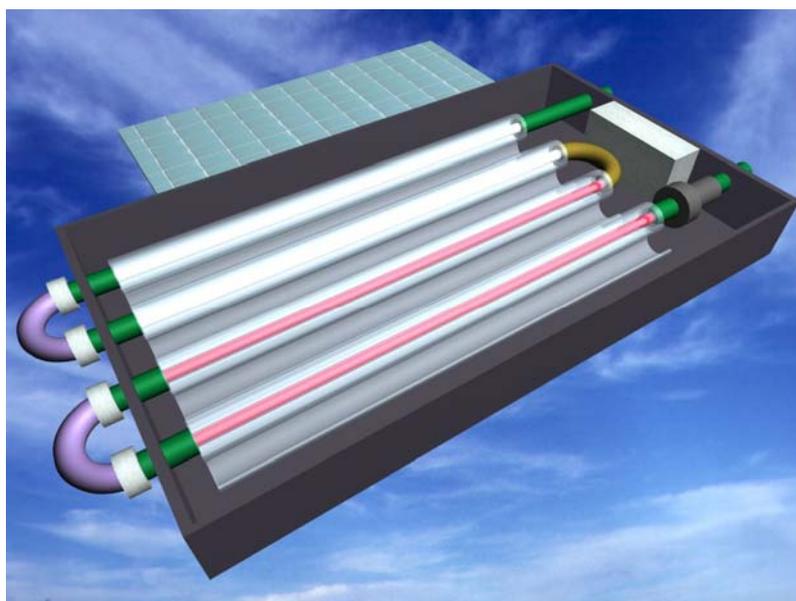


Figura 78. Diagrama conceptual del sistema final desarrollado basado en 2 foto-reactores para generación de radicales hidroxilo mediante fotocatalisis con TiO_2 y 2 foto-reactores para generación de oxígeno singlete mediante fotoexcitación de complejos de $Ru(II)$. Una placa fotovoltaica proporciona la energía necesaria para impulsar el agua cuando existe irradiación solar

Los participantes del proyecto AQUACAT son: UNIV. LYON-1 (Francia, coordinador), CIEMAT-PSA (España), ECOSYSTEM S.A. (España), AO SOL Lda. (Portugal), UNIV. POITIERS (Francia), AHLSTROM (Francia), ENIG (Túnez), UNIV. DE FES (Marruecos), PROJEMA, S.A. (Marruecos), PHOTOENERGY CENTER (Egipto), UNIV. COMPLUTENSE (España), EPFL (Suiza). El presupuesto total es de 1.700 k€ con una contribución de la Comisión Europea de 1.000 k€. El proyecto concluirá a finales del año 2005.



Figura 79. Vista del sistema final desarrollado preparado para su ensayo en Argentina (Comisión Nacional de Energía Atómica)

PROCESOS DE DESALINIZACIÓN SOLAR DE AGUA DE MAR

PROYECTOS AQUASOL <http://www.psa.es/webeng/aquasol/index.html> Y SOLARDESAL <http://www.psa.es/webesp/solardesal/index.html>

Durante el año 2004, en el campo de la desalación de agua de mar con energía solar, se han desarrollado actividades en el marco de dos proyectos de investigación, 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). Ambos proyectos tienen los mismos objetivos con la única salvedad de que el proyecto de ámbito nacional tiene un alcance y presupuesto mucho más reducido. El proyecto SOLARDESAL, además, ha concluido dentro del año 2004.

Las entidades participantes en el proyecto SOLARDESAL son: CIEMAT (coordinador), Universidad de la Laguna, INABENSA y ECOSYSTEM. Este proyecto, con una duración total de tres años, se inició en noviembre de 2001 y sus actividades han concluido durante el año 2004.

Las entidades integrantes del Proyecto AQUASOL son: CIEMAT (coordinador), INABENSA (España), Ao Sol Energias Renováveis (Portugal), National Technical University of Athens (Grecia), INETI (Portugal), 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 se sitúa 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 [Alarcón y col., 2004a, 2004b; Blanco, 2004d, 2004e].

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 captadores solares estáticos parabólicos compuestos (CPC) de alta eficiencia y bajo coste.
- 2) Desarrollo de una bomba de calor de absorción de doble efecto (LiBr/H₂O) optimizada para su acoplamiento al proceso MED que permita reducir a la mitad el consumo energético requerido por una planta MED convencional.
- 3) Reducción a cero de cualquier tipo de vertido del proceso de destilación mediante la recuperación de la sal procedente de la salmuera.

Durante el año 2004 se ha concluido la fase de investigación del proyecto que ha dado como resultado la especificación final de los subsistemas que constituyen la planta de desalación AQUASOL (bomba de calor por absorción de doble efecto, campo de captadores solares de tipo CPC, tanques de almacenamiento térmico, caldera de gas y secador solar). La Figura 80 muestra la configuración escogida para la interconexión de dichos subsistemas. 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 captadores 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 captadores solares estáticos es mayor cuanto menor es la diferencia entre la temperatura del fluido y la temperatura ambiente. La conexión en serie de dos tanques de almacenamiento tiene como objeto mejorar la controlabilidad del sistema, así como mantener 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 captadores 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 (30%-100%) en combinación con un aporte complementario del campo solar [Hublitz y col., 2004].

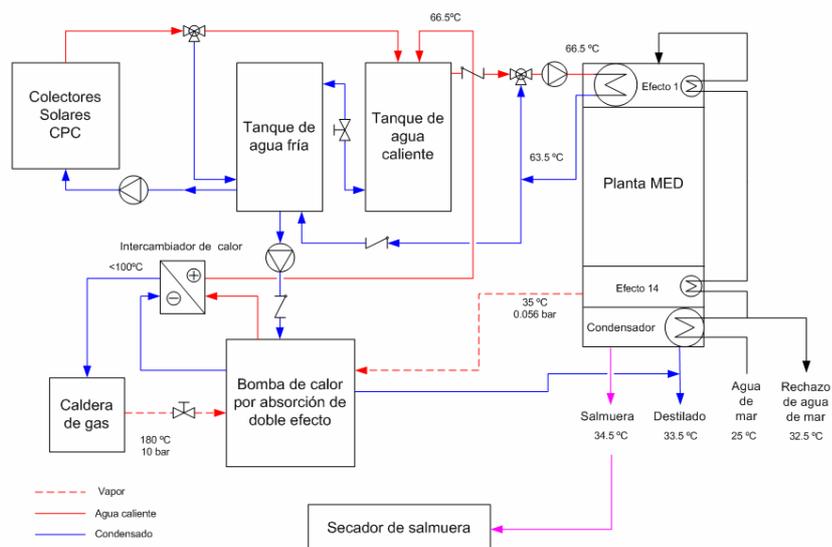


Figura 80. Configuración final del sistema de desalación a implementar dentro del Proyecto AQUASOL



Figura 81. Vista frontal del edificio que alberga la planta de destilación MED, con los dos tanques de almacenamiento térmico, el depósito de gas propano (derecha) y vista parcial de la conexión hidráulica.

En el mes de septiembre se ha iniciado la fase de demostración del proyecto, cuyas primeras tareas han consistido en la fabricación e instalación de algunos de los subsistemas anteriormente citados. La Figura 81 muestra los dos tanques de almacenamiento (con una capacidad individual de 12 m³) situados enfrente del edificio que alberga la unidad de destilación, el depósito de gas propano a la derecha, y parte del subsistema hidráulico que conecta los citados tanques y la planta de destilación con el campo de captadores solares.

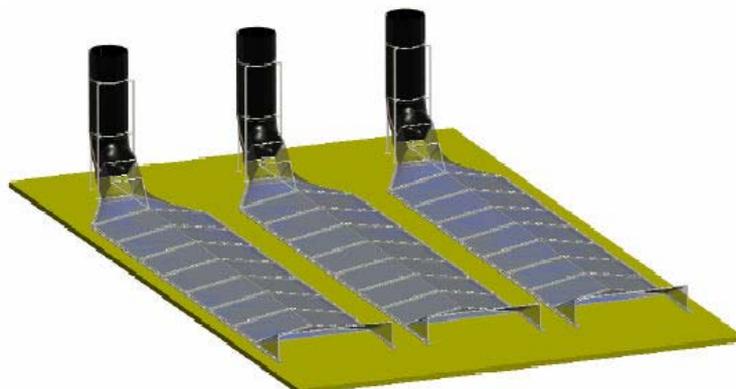
El campo solar (Ver Figura 82) está compuesto por 252 captadores solares estáticos (CPC Ao Sol 1.12x) con una superficie total de 500 m² aproximadamente. Los captadores se disponen en cuatro filas de 63 captadores. Cada una de estas filas está constituida por módulos de tres captadores conectados en paralelo, y estos módulos se encuentran a su vez conectados en serie en grupos de tres. La salida del último de los tres módulos se conecta en paralelo a la conducción general de salida de su fila correspondiente. La inclinación del captador es de 35° y la orientación sur [Blanco y col., 2004a].



Figura 82. Campo de colectores solares estáticos de tipo CPC de la Planta AQUASOL

El secador solar avanzado tendrá como objetivo aumentar la concentración de la salmuera producida en el proceso de destilación, hasta alcanzar el punto de saturación del carbonato cálcico (16°Be, escala Baumé). Durante 2004 se ha llevado a cabo la evaluación experimental de una serie de pequeños prototipos en las instalaciones de INETI y de la National Technical University of Athens (NTUA), lo que ha permitido estudiar la influencia de diversas modificaciones introducidas en los diseños preliminares. Todo esto ha

conducido finalmente a la propuesta de un diseño final de secador solar avanzado que será instalado en la isla griega de Lesvos durante el año 2005 para su evaluación dentro de la fase de demostración del Proyecto AQUASOL.



Cortesía de INETI

Figura 83. Vista simulada de los tres módulos de secador solar avanzado propuestos en el Proyecto AQUASOL

Dicho prototipo final consistirá en tres canales de evaporación paralelos (4 m x 17 m) interconectados entre sí con un flujo forzado de salmuera circulando por su interior; dichos canales estarán dotados de una cubierta de plástico, una sección de precalentamiento de aire a la entrada, y una chimenea solar ubicada a la salida, la cual tiene como finalidad promover la evacuación del aire en los canales por convección (Ver Figura 83). Un cuarto canal a cielo abierto será construido en paralelo junto a los tres anteriores, con objeto de poder comparar de manera realista el rendimiento de nuevo prototipo propuesto. La orientación escogida ha sido norte-sur, debido a la dirección de los vientos predominantes en la ubicación final donde se instalará el prototipo. Los modelos de simulación propuestos implementados prevén una mejora de la eficiencia de 2,5 veces en comparación con el rendimiento del conjunto de estanques a cielo abierto de una salinera tradicional.

4) CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Durante el año 2004, las actividades relacionadas con el estudio y la caracterización de la Radiación Solar se han centrado en la participación en Proyectos relacionados con la:

- Medida de la radiación solar.
- Tratamiento de imágenes de satélite para cálculo de la radiación solar.

La estación meteorológica de la Plataforma Solar de Almería (PSA) está localizada en la latitud 37°5'N, longitud -2°21'W y a una altitud sobre el nivel medio del mar de 497m. La PSA se encuentra entre las Sierras de Filabres al norte, Sierra de Gádor al sureste y Sierra Alhamilla al sur, en un área de clima semiárido.

Las señales de los sensores son registradas cada segundo y, a partir de esa muestra de datos, se han obtenido las medias horarias. En el caso de la velocidad y dirección del viento, las medias se han obtenido operando con ambas magnitudes conjuntamente, previa conversión a coordenadas cartesianas.

El presente informe meteorológico ha sido elaborado con los datos recogidos durante el 2004 en esta estación meteorológica. En todas las gráficas, la hora está expresada no como hora local sino como la hora GMT. Se ofrecen los valores medios correspondientes a los meses de enero y julio por ser los meses representativos de las estaciones de invierno y verano respectivamente.

RADIACIÓN SOLAR

En la Figura 84 se muestran las medias horarias mensuales de radiación global. En ella se aprecia que los valores mayores de radiación media se alcanzan en las horas centrales del día en los meses de verano: junio, julio y agosto. Valores altos, aunque menores que los anteriores, se encuentran también en el mes de abril. El valor máximo de radiación directa registrado durante el 2004 ha sido **1080 W/m²**, el 2 de marzo, al mediodía. El valor medio diario anual de radiación global ha sido **5200 W/m² día**, siendo en enero de **2900 W/m² día** y en julio de **8370 W/m² día**.

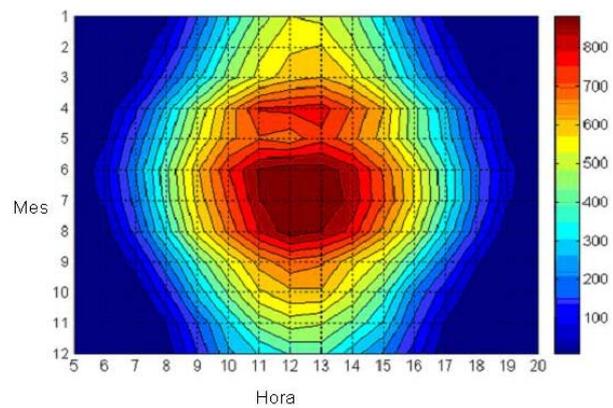


Figura 84. Perfil e medias horarias mensuales de radiación global.

TEMPERATURA

En las Figura 85 y Figura 87 se muestran los valores medios, máximos y mínimos mensuales conjuntamente y el perfil de medias horarias mensuales respectivamente. Los valores máximos registrados de temperatura han sido de **41.5 °C** en el sensor situado a 2m y de **41.4°C** en el sensor de 10m, ambos registrados el 24 de agosto después del mediodía. Los valores mínimos son, respectivamente, de **-2.69°C** en el amanecer del 2 de marzo, y de **-0.78°C** a la misma hora, el 28 de diciembre. La media anual es de **16.3°C**, en enero es de **11.3°C** y en julio, de **25.4°C**.

En la Figura 86, se aprecia la inercia de las altas temperaturas, que se prolongan en las tardes en los meses de verano, especialmente en el mes de agosto. Además, se observa un mayor gradiente en el cambio de temperaturas en todas las horas de los meses de mayo y octubre, que son los meses representativos de las estaciones de transición, primavera y otoño.

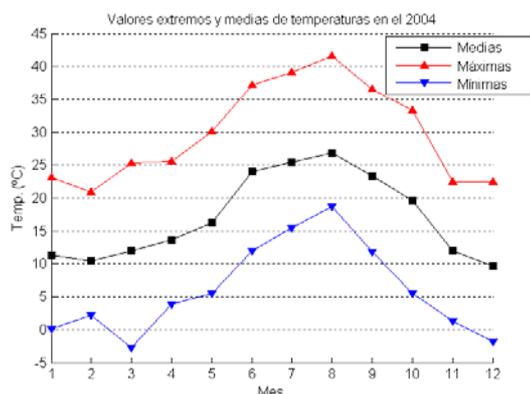


Figura 85. Representación de los valores máximos, medios y mínimos mensuales de temperatura.

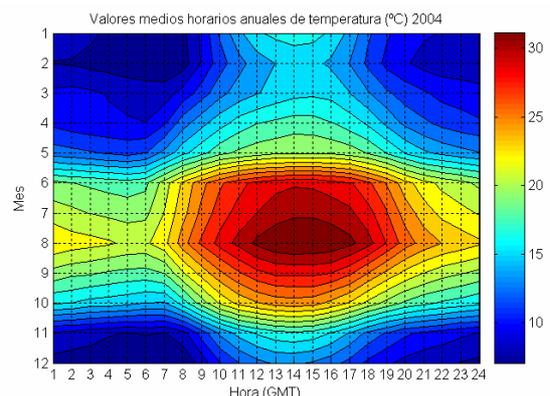


Figura 86. Perfil de medias horarias mensuales de temperaturas.

HUMEDAD

En las Figura 87 y Figura 88 se muestran los valores medios, máximos y mínimos mensuales conjuntamente y el perfil de medias horarias mensuales de humedad respectivamente. Los valores máximos registrados han sido de **93.3%** en el sensor situado a 2m, registrado en el amanecer del 20 de marzo, y de **95.5%** en el sensor de 10m, registrado en la no-

che del 6 de febrero. Los valores mínimos son, respectivamente, de **8.6%** y **10.0%**, ambos registrados el 24 de octubre. La media anual a 2m es de 59%; en enero, **55.4%** y en julio, **53.0%**.

En la Figura 87, se aprecia que los valores más bajos de humedad se concentran en las horas centrales del día de los meses de verano. Se observa, además, que el primer tercio del 2004 es el periodo que presenta los valores medios de humedad generales más altos, mayores respecto al resto del año.

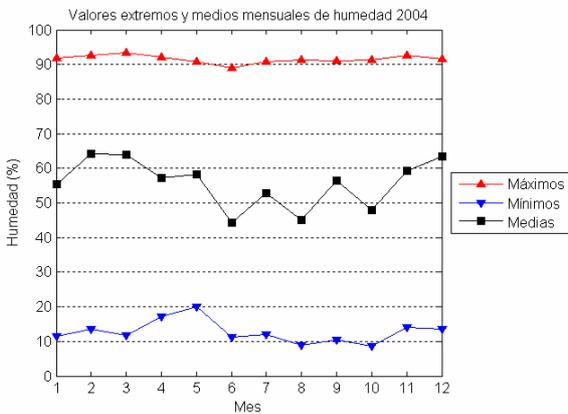


Figura 87. Representación de los valores máximos, medios y mínimos mensuales de humedad.

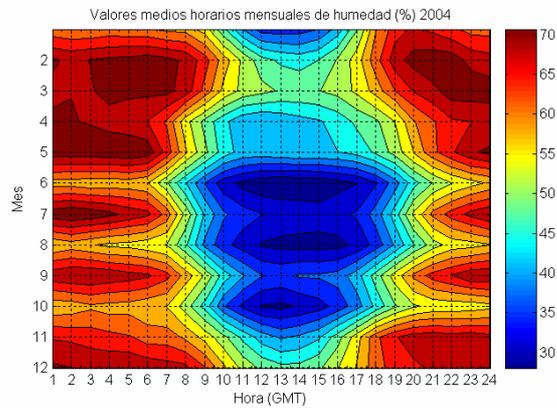


Figura 88. Perfil de medias horarias mensuales de humedad.

VIENTO

En las Figura 89 y Figura 90 se muestran los valores medios y máximos mensuales de la velocidad de viento registrados a 2m y los porcentajes de ocurrencia en la dirección de proveniencia del viento. La ráfaga de viento más fuerte registrada fue de **22.1 m/s** (79.6km/h) en el anemómetro de 2 m y de **24.5 m/s** (88.2 km/h) a 10m, ambos valores registrados el 5 de mayo, después del mediodía. La media horaria anual de la velocidad del viento durante el 2004 es de **1.8 m/s**.

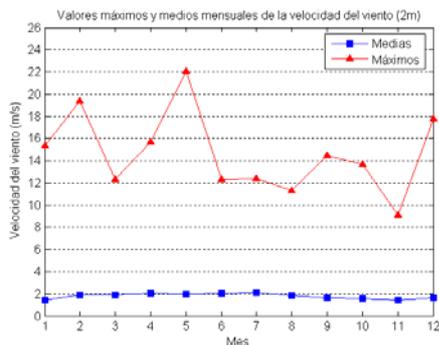


Figura 89. Representación de los valores máximos, medios y mínimos mensuales de la velocidad del viento a 2m

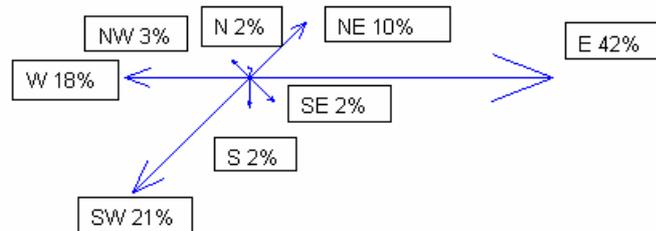


Figura 90. Porcentajes de ocurrencias de la dirección de proveniencia del viento

En cuanto a la dirección de proveniencia del viento, durante el 2004 se ha registrado un predominio del viento del este con el 42% de los casos. Las procedencias más comunes, aparte de la del este, son del suroeste, oeste y noreste por este orden. El predominio de estas direcciones se atribuye a la disposición de las Sierras que se localizan alrededor de la PSA.

PRECIPITACIÓN

Durante el año 2004 se han recogido un total de **237 l/m²** en los 50 días en los que hizo acto de presencia este fenómeno meteorológico. No se han registrado precipitaciones durante los meses de enero y agosto. Los meses en los que se ha recogido mayor cantidad de precipitación han sido marzo y abril, en primavera. Sin embargo, el mes en el que en más días ha llovido ha sido el mes de diciembre. El día en el que se registró el máximo de lluvia fue el 9 de abril, con **35.5l/m²** recogidos.

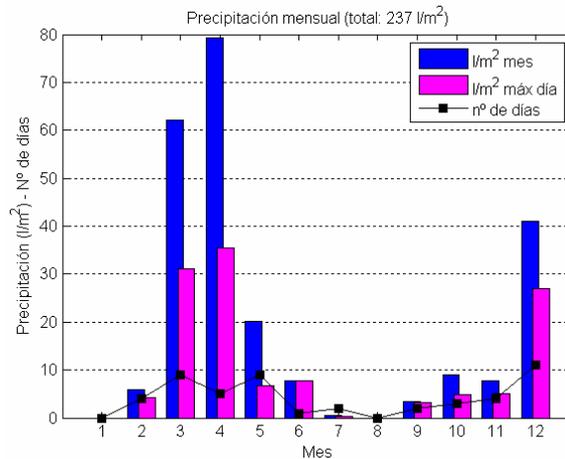


Figura 91. Representación los valores de precipitación recogidos mensualmente, así como el valor máximo de precipitación recogida y el número de días de precipitación en cada mes.

ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE

En la línea de Adquisición y tratamiento de Imágenes de Satélite, durante 2004 las actuaciones se han centrado en dos Proyectos específicos:

- Proyecto SOLSAT: Desarrollo de modelos de cálculo para el estudio de sistemas fotovoltaicos conectados a red. Caracterización estadística del recurso energético.

Se trata de un Proyecto financiado por el Plan Nacional de I+D+I, de tres años de duración (2002-2004). El objetivo global del proyecto es el desarrollo y puesta a punto de modelos de cálculo para la estimación de la distribución espacial de la radiación solar. Se pretende conseguir modelos que permitan determinar la distribución espacial de la radiación solar global y directa con un nivel de precisión superior al 90% en valores diarios. Esta información está siendo muy demandada en la actualidad tanto por el carácter de variable medioambiental en sí mismo, como de cara a las posibles aplicaciones de explotación de la energía solar. La metodología aplicada parte de la recopilación, análisis y validación de los datos registrados en estaciones radiométricas terrestres, a partir de los cuales se determinarán los modelos de cálculo óptimos para ser aplicados con carácter general a la ventana de trabajo de la imagen. Por otro lado, se realizará el tratamiento de las imágenes del satélite Meteosat, se tratará un mínimo de diez años de imágenes primarias del canal visible y una vez seleccionada la ventana de trabajo, se aplicarán los tratamientos necesarios para la determinación de las variables relacionadas con la radiación solar. A partir de los valores simultáneos registrados en estaciones terrestres y en los píxeles correspondientes de las imágenes de satélite, se podrán diseñar los modelos de inferencia de la radiación solar aplicables al total de la imagen. La aplicación por tanto de los modelos desarrollados permitirá obtener unos resultados con una resolución espacial inalcanzable por medio de medidas radiométricas. Estos objetivos se llevarán a cabo mediante el desarrollo de un sistema informático que cubra los siguientes requerimientos: obtención y almacenamiento de forma eficiente de la información en tiempo real reci-

bida por la estación de recepción de imágenes de satélite del CIEMAT; gestión de la información satelitaria y piranométrica; implementación de los algoritmos correspondientes a los modelos de cálculo óptimos; análisis de diferentes variables objeto de estudio y visualización de la información resultante. Este sistema estará compuesto de una interfase gráfica de usuario funcionando sobre el sistema operativo Windows 95/98/NT/2000 y una base de datos en un servidor central, con el software necesario para la gestión de grandes volúmenes de información con dimensión espacial.

➤ Mapas de Radiación Solar de Andalucía y Extremadura.

Se trata de un Proyecto financiado por AICIA. El objetivo general del presente acuerdo es la obtención de mapas de radiación global sobre superficie horizontal en Andalucía y Extremadura. Para conseguir este objetivo, se empieza estudiando las imágenes del satélite y calculando un coeficiente de nubosidad de cada píxel de la imagen. A partir de este coeficiente de nubosidad se realiza el ajuste de modelos mediante técnicas estadísticas (regresión) y de aprendizaje automático (lógica borrosa). Una vez que los modelos han sido ajustados, se implementa el nuevo modelo para calcular la radiación global horaria en cada píxel. Para el estudio, se parte de 5 imágenes de satélite de cada día, a partir de las cuales se calculan 5 imágenes de radiación global diaria. Con ellas, se estima una imagen de radiación global diaria. Finalmente, en el presente proyecto se va a trabajar con 10 años comprendidos entre 1994 y 2003, por lo que se obtendrá una imagen de radiación global diaria para cada día de los 10 años estudiados. Con esta serie de imágenes se podrá estudiar la serie de datos de radiación global diaria en cada píxel durante este periodo, e igualmente calcular los estadísticos que creamos representativos de la serie total (media, mediana, etc.) en cada uno de los píxeles (correspondientes a localizaciones concretas y áreas de 5x5 Km) así como del global de la imagen.

5) OTROS PROCESOS MEDIOAMBIENTALES DE LA RADIACIÓN SOLAR **PROCESOS DE ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR CON IMPACTO** **MEDIOAMBIENTAL**

En línea con los problemas mencionados por la utilización de combustibles fósiles y su efecto perjudicial para el medio ambiente, uno de los procesos que ofrecen más oportunidades a medio plazo es el estudio de reacciones que permitan la transformación de CO₂ en sustancias con un mayor contenido de energía y que pueden ser utilizadas como combustibles. Estos procesos tendrían el potencial de permitir el uso continuo de materiales carbonosos sin contribuir a un aumento neto de la cantidad de CO₂. Este aspecto es de indudable interés dada la creciente preocupación medioambiental relativa a las emisiones de CO₂ antropogénico que están originando el efecto invernadero [R. Maestro y A. Vidal, 2004].

En este sentido, la aplicación de la tecnología fotocatalítica para promover selectivamente la reducción de CO₂ 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 CO₂ a la atmósfera.

Las investigaciones realizadas hasta el momento demuestran que la modificación del semiconductor mediante metales u óxidos metálicos afecta de forma importante a su eficiencia en este tipo de procesos. En concreto, se ha demostrado que el óxido de rutenio facilita la transferencia de huecos de la banda de valencia, los cuales están involucrados en las primeras etapas del proceso de oxidación del H₂O.

En general, la reducción fotocatalítica de CO₂ produce pequeñas concentraciones de una gran variedad de productos de reducción del tipo C₁ y C₂, a través de procesos de reducción que intercambian 2-, 4-, y 6- electrones. Se ha observado que la concentración de productos de reacción depende del pH de la disolución y de su composición,

principalmente. Los resultados obtenidos hasta el momento arrojan valores de rendimiento energético de 0.42 % cuando se trabaja a pH básicos y cercanos al 5% cuando la reacción tiene lugar a pH ácidos (valores calculados a partir del calor de combustión del producto puro). Aunque estos valores podrían considerarse aparentemente bajos, es necesario indicar que la eficiencia neta de conversión de la energía solar en energía almacenable químicamente en sistemas reales es improbable que exceda del 12 al 13%. Este estudio está siendo realizado en colaboración con investigadores del Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC [Vidal y col., 2004].

Eventos

El año 2004 ha sido particularmente intenso en lo que a este tipo de actividades se refiere.

En primer lugar, desde el punto de vista científico hay que reseñar la participación de los investigadores de la PSA en dos congresos de la 'comunidad solar' que han tenido lugar durante este año.

En orden cronológico, el primero de ellos ha sido el 'EuroSUN 2004', que tuvo lugar en la soleada ciudad alemana de Friburgo del 22 al 25 de junio, organizado por la rama europea de la Sociedad Internacional de Energía Solar (ISES Europa).



Figura 92. Asistentes al simposio de SolarPACES en Oaxaca

Algo más tarde, del 6 al 8 de octubre tuvo lugar el 'XII SolarPACES International Symposium on Solar Termal Concentrating Technologies' en la ciudad mexicana de Oaxaca. Durante la celebración de este simposio, la PSA y la Universidad de Sevilla tuvieron el honor de ser designadas para organizar conjuntamente la próxima edición de este simposio bianual. Este tendrá lugar en la ciudad de Sevilla, del 20 al 23 de junio de 2006.

La PSA estuvo representada en ambos congresos al máximo nivel, participando en la organización a través de los comités científicos y de manera intensa en las sesiones mediante multitud de artículos y posters.



Figura 93. Stand de la Plataforma Solar en la Feria de las Energías Renovables 2004

En lo que a actividades de divulgación se refiere y a un nivel local es necesario hacer referencia a nuestra participación, conjuntamente con el DLR, en la 'II Feria de las Energías Renovables y las Tecnologías del Agua', que tuvo lugar del 5 al 7 de febrero en el Palacio de Congresos de Aguadulce, organizada por la Cámara de Comercio de Almería. Aquí el DLR y PSA-CIEMAT presentaron al público en general sus actividades de investigación mediante un 'stand' donde se distribuyó información impresa y se proyectaban diversos videos divulgativos.

Ya a nivel europeo, ha sido especialmente relevante la organización de un evento mediático auspiciado por la Comisión Europea, que solicitó la colaboración de la PSA como anfitrión del mismo. Este evento, titulado 'New Energy Sources: Solar, Wave and Geothermal Energy' tuvo lugar el 16 de marzo y consistió en la presentación a los medios de comunicación europeos de varios proyectos de investigación sobre energías renovables que contaban con financiación del VI Programa Marco. La energía solar térmica (proyecto SOLAIR), la mareomotriz (proyecto WAVE DRAGON) y la geotérmica (proyecto HOT DRY ROCK ENERGY) estuvieron representadas. Al evento asistieron representantes de 47 medios de comunicación de toda Europa, incluyendo 12 cadenas de televisión, dando así un impacto mediático considerable a la PSA en general y al proyecto SOLAIR, con participación de CIEMAT y del DLR, en particular.

Dentro de las colaboraciones existentes, la 'Alianza Europea de Laboratorios Solares Europeos' (SolLAB) recibió el impulso definitivo el 20 de octubre con la firma del convenio por todas las partes en un evento que organizó uno de los socios, el laboratorio CNRS-PROMES en Odeillo (Francia). Con motivo de la firma, nuestros colegas de PROMES organizaron una jornada técnica que se denominó 'EURO-SOL Forum: Power and Hydrogen from Concentrating Solar Systems'.



Figura 94. D. Pablo Fernández Ruiz, de la Comisión Europea, se dirigió a los medios presentes



Figura 95. Periodistas científicos de toda Europa asistieron al evento organizado por la Comisión Europea

En nuestra faceta de anfitriones se debe de hacer referencia a la 'Internacional Conference on Solar Power from Space' (SPS'04). Esta conferencia, organizada por la Agencia Europea del Espacio (ESA) se celebró en Granada del 30 de junio al 2 de julio. Los organizadores nos solicitaron que, aprovechando la proximidad geográfica, la PSA acogiera las sesiones de uno de los días de la conferencia. Este día fue el 1 de julio, donde se realizaron varias presentaciones sobre energía solar de concentración y los asistentes tuvieron la oportunidad de visitar nuestras instalaciones.

Especialmente entrañable fue la visita de un grupo de escolares portugueses el 24 de septiembre. La sociedad portuguesa de energía solar (SPES) celebra cada año a nivel nacional el concurso 'Padre Himalaya' entre los estudiantes de primaria y secundaria. Este concurso consiste en el diseño de dispositivos que hagan uso de la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica. El premio a los ganadores es una visita a la PSA. Para nosotros fue un orgullo acoger a este entusiasta grupo de estudiantes y profesores y acompañarlos durante su visita a nuestras instalaciones.

Por último, mencionar el premio recibido por nuestros compañeros del grupo de Química Solar, Julián Blanco y Sixto Malato, dentro del 'European Grand Prix for Innovation Awards' en la categoría 'Grand Prix du Jury'. Este certamen se celebra cada año y nuestros compañeros lo recibieron en nombre de la PSA en una ceremonia que tuvo lugar en Mónaco, el 11 de diciembre. En la foto se les puede ver junto a los demás premiados en dicha ceremonia.



Figura 96. Ceremonia de entrega 'Grand Prix du Jury'

Referencias Documentación

- [1] Agüera A., M. Mezcuca, D. Hernando, S. Malato, J. Cáceres; A. Fernández-Alba. "Application of GC-MS and GC-AED to the evaluation of by-products formed by solar photo-Fenton degradation of methyl tert-butyl ether in water". *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 84 (1-3), 149-159, 2004.
- [2] Augugliaro V., Bianco Prevot A., Cáceres Vazquez J., García-Lopez E., Irco A., Loddo V., Malato Rodríguez S., Marci G., Palmisano L., Pramauro E. "Photocatalytic oxidation of acetonitrile in aqueous suspension of titanium dioxide irradiated by sunlight". *Adv. Environ. Res.*, 8, 329-335, 2004a.
- [3] Augugliaro V., E. García López, V. Loddo, S. Malato-Rodríguez, I. Maldonado, G. Marci, R. Molinari, L. Palmisano, M. Schiavello. Degradation of drugs in aqueous medium: Oxidation of lincosamin. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 141-142. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004c.
- [4] Augugliaro V., Elisa García-López, Vittorio Loddo, Sixto Malato-Rodríguez, Ignacio Maldonado, Giuseppe Marci, Raffaele Molinari, Leonardo Palmisano. Degradation of lincomycin in aqueous medium: coupling of solar photocatalysis and membrane separation. In: *The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2003 Access Campaign.* CIEMAT, ISBN 84-7834-474-8. pp. 43-52, 2004b.
- [5] Ballestrín J. (2004) "The MEPSOCON project". Romero M., S. Jones, A. Meier, C. Richter (Eds.) (2004). *Proceedings of SolarPaces Tasks Meetings, Oaxaca, México, October 5th 2004.* Pub. CIEMAT. ISBN: 84-7834-482-9..
- [6] Ballestrín J., Estrada C.A., Rodríguez-Alonso M., Pérez-Rábago C., Langley L.W., Barnes A. (2004). "High heat flux sensor calibration using calorimetry". *Metrologia*. 41, 4, 314-318.
- [7] Ballestrín J., Estrada C.A., Rodríguez-Alonso M., Pérez-Rábago C., Langley L.W., Barnes A. (2004). "Heat flux sensors: calorimeters or radiometers?". *Proceedings 12th SolarPACES International Symposium, 6-8 October 2004, Oaxaca, Mexico.* CD-Rom. Eds. C. Ramos and J. Huacuz. ISBN: 968-6114-18-1.
- [8] Ballestrín J., Monterreal R. (2004) "Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation". *Energy*. 29, 915-924.
- [9] Blanco J. Conferencia. Casos Prácticos de Proyectos Aprobados en el VI Programa Marco de la UE. Recomendaciones. Jornada Informativa CDTI sobre: Actividades de Cooperación Internacional en el Sexto Programa Marco de la UE. Madrid, 29 de Marzo de 2004f.
- [10] Blanco J., Malato S., Pulgarín C., Sarria V., Kenfack S. (Inventores). Dispositivo Integrado para descontaminación de agua y producción de energía eléctrica. Of. Española de Patentes y Marcas, nº P200401376. Solicitante: CIEAMT y Ecole Polytechnique de Laussane (Suisse). 2004g.
- [11] Blanco J., S. Malato, M. I. Maldonado, D. Alarcón, P. Fernández, M. Vincent. The Albaida plant: first commercial step in solar detoxification. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 309-310. Oral presentation. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004h.
- [12] Blanco J., S. Malato, M. I. Maldonado, I. Oller, W. Gernjak, D. Alarcón. P. Fernández. First Commercial Step in Solar Photocatalytic Applications. 12th Inter. Symp. Solar power and Chemical Energy Systems. Abstract S2-314. Oaxaca, Mexico, 6-8 October, 2004k.
- [13] Blanco J.. Conferencia. Detoxificación de efluentes líquidos y gaseosos mediante procesos de fotocatalisis solar. Curso: Tecnologías para la Utilización Sostenible de la Energía. Universi-

- dad de Extremadura. Escuela de Ingenierías Industriales. Badajoz, 27 de marzo de 2004c.
- [14] Blanco J.. Conferencia. Nuevas Aproximaciones a la Desalación Solar Térmica. Experiencias de la Plataforma Solar de Almería. Jornadas Técnicas sobre Energías Renovables y Agua. II Feria de Energías Renovables y Tecnologías del Agua. Aguadulce (Almería), 5-7 de febrero de 2004e.
- [15] Blanco J.. Conferencia. Water Desalination using Solar Energy. Curso AECl: Renewable Energy Systems. CIEMAT (Madrid), 9 de junio de 2004d.
- [16] Blanco J.; S. Malato; M. I. Maldonado; D. Alarcón; P. Fernández. The Albaida plant: first commercial step in solar detoxification. 2º Congreso Internacional Ambiental del Caribe. Centro de Convenciones, Cartagena de Indias (Colombia). Oral Presentation. 19-21 Mayo, 2004b.
- [17] Blanco J.; S. Malato; M. I. Maldonado; M. Vincent; J.P. Vincent; M. Sánchez; E. Myro. The Albaida plant: first commercial step in solar detoxification. "Global symp. on recycling, waste treatment and clean technology", Proceedings of REWAS 04. Madrid, 26-29 September 2004. I Gaballah, B. Mishra, R. Solozábla, M. Tanaka (Eds.). Volume II, 1425-1436. Oral presentation. Inasmet, San Sebastián, Spain 2004j.
- [18] Blanco J.; S. Malato; M.I. Maldonado; P. Fernández; I. Oller, W. Gernjak, D. Alarcón. Primer paso en la comercialización de la tecnología de fotocatalisis solar: planta solar de Albaida S.A. "Siguiendo el camino de las estrellas", Libro de actas de XII Congreso Ibérico y VII Iberoamericano de Energía Solar. 14-18 Septiembre 2004, Vigo, España. M. Vázquez Vázquez y J. Fernández Seara (Eds.). Volumen 1, 639-644. ETS Ingenieros Industriales de Univ. Vigo, 2004i.
- [19] Blanco, M.; Martín, J.G.; Alarcón-Padilla, D.C. "Theoretical efficiencies of angular-selective non-concentrating solar thermal systems". *Solar Energy* 76, 683-691, 2004.
- [20] Buck R., Heller P., Schwarzbozl P., Sugarmen C., Ring A., Téllez F., Enrile J. (2004). "Solar hybrid gas turbine plants: status and perspective". Proceedings EuroSun2004. Vol I. Pp. 822-831. Ed. DGS-Munich and PSE-Freiburg. ISBN: 3-9809656-1-9.
- [21] Cambronero, L.E.G.; Ruiz-Roman, J.M.; Cañadas, I; Corpas, F.A.; Martínez, D. (2004) "Characterization of Aluminum Foams Obtained through Solar Energy Foaming Treatment". PM 2004 Conference Proceedings Vol 5. 83-87. ISBN: 1899072152. EPMA - European Powder Metallurgy Association. Shrewsbury. United Kingdom.
- [22] Cañadas, I.; Martínez, D.; Rodríguez, J.. (2004) "Tratamiento Térmico de Materiales mediante Energía Solar Concentrada". *Revista Tratamientos Térmicos*. Vol. 84. 36-38. ISSN 1132-0346 Madrid.
- [23] Cañadas, I.; Martínez, D.; Rodríguez, J.. (2004) "Tratamiento Térmico de Materiales en el horno solar de la PSA: Líneas actuales de actividad". *Boletín Sociedad Española de Cerámica y vidrio*. 43 (2) 591-595.
- [24] Cañadas, I.; Martínez, D.; Rodríguez, J.; Gallardo, J. M.. (2004) "Sintering of Multilayered Copper Wires in a Solar Furnace". PM 2004 Conference Proceedings Vol 2 . 143-148. ISBN: 1899072152. EPMA - European Powder Metallurgy Association. Shrewsbury , United Kingdom.
- [25] D. Alarcón, J. Blanco, B. Sánchez , S. Malato, M.I. Maldonado, P. Fernández. Thermodynamic Simulation of an Advanced Hybrid Solar-Gas Seawater Desalination System. 12th Inter. Symp. Solar power and Chemical Energy Systems. Abstract S6-221. Oaxaca, Mexico, 6-8 October, 2004b.
- [26] D. Alarcón; J. Blanco; B. Sánchez; S. Malato; M.I. Maldonado; P. Fernández. Simulación termodinámica de un sistema híbrido solar/gas de desalación de agua de mar. "Siguiendo el camino de las estrellas", Libro de actas de XII Congreso Ibérico y VII Iberoamericano de Energía Solar. 14-18 Septiembre 2004, Vigo, España. M. Vázquez Vázquez y J. Fernández seara (Eds.). ETS Ingenieros Industriales de Univ. Volumen 1, 669-674. Vigo, 2004a.
- [27] Di Paola A., V. Augugliaro, E. García-López, V. Loddò, G. Marci, S. Malato, R. Molinari, L. Palmisano, M. Schiavello. Photocatalytic oxidation of drugs by using artificial and solar irradiation. 15th Int. Conf. On Photochemical Conversion and Storage of Energy. Book of abstracts. W6-o-08. Oral presentation. Paris, 4-9 July 2004.
- [28] Diego, G.; Gómez, D. "Ensayo destructivo del comportamiento en operación de cinco muestras obtenidas de colectores cilindro-parabólicos del lazo de ensayos DISS". Informe técnico INDITEP-SC-SF-03. Plataforma Solar de Almería. Marzo, 2004.
- [29] 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 TiO₂-assisted solar photocatalytic batch-process disinfection reactor for the treatment of biological and chemical contaminants in domestic drinking water in developing countries. *Solar Energy*, 77, 649-655, 2004.

- [30] Eck, M.; Zarza, E. "Saturated Steam Process with Direct Steam Generating Parabolic Troughs". Artículo presentado en congreso internacional EuroSun 2004, celebrado en Friburgo (Alemania) los días 20-23 de Junio de de 2004. Libro de proceedings del congreso, Vol. 1, pp. 839-848, publicado por PSE GMBH en Friburgo (Alemania) en 2004
- [31] Eck, M.; Zarza, E.; Eickhoff, M.; Rheinländer, J.; Valenzuela, L. "Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs". Artículo publicado en la Revista Solar Energy, nº 74, 2003: pp. 341-351.
- [32] Farré M. J., M.I. Franch, S. Malato, J.A. Ayllón, J. Peral, X. Domènech. Degradation of some bio-recalcitrant pesticides by homogeneous and heterogeneous photocatalytic ozonation. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 75-76. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004.
- [33] Fernández Ibáñez P., F. Javier de las Nieves, S. Malato. Propiedades coloidales de partículas de TiO₂: Aplicaciones al tratamiento fotocatalítico solar de aguas. Editorial CIEMAT, Madrid, Spain. ISBN 84-7834-467-5. 293 pag. 2004b.
- [34] Fernández Ibáñez, P. Tesis Doctoral: Propiedades Coloidales de partículas de TiO₂: Aplicación al tratamiento fotocatalítico solar de aguas. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada. Directores: F. Javier de las Nieves (Univ. Almería) y Sixto Malato. 22 Enero 2004c.
- [35] Fernández P., J. Blanco, D. Alarcón, S. Malato. Solar Photocatalysis Applied to Drinking Water Disinfection Using Low Cost Solar Collectors. 12th Inter. Symp. Solar power and Chemical Energy Systems. Abstract S2-308. Oaxaca, Mexico, 6-8 October, 2004d.
- [36] Fernández P., S. Malato and F. J. de las Nieves. Sedimentation Dynamics of TiO₂ Particles in Aqueous Suspensions: Relationship with Colloidal Stability. Boof of Abstracts, 420. Poster P7.18. 18th Int. Conf. of the European Colloid and Interface Soc. Almería, Spain, 19-24 September, 2004h.
- [37] Fernández P.; J. Blanco; S. Malato. E. Coli Deactivation by Solar Photocatalysis Using Colloidal Dispersions of TiO₂. Boof of Abstracts, 417. Poster P7.15. 18th Int. Conf. of the European Colloid and Interface Soc. Almería, Spain, 19-24 September, 2004g.
- [38] Fernández P.; J. Blanco; S. Malato; D.C. Alarcón; M.I. Maldonado. Water disinfection by solar photocatalysis using compound parabolic collectors. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 79-80. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004e.
- [39] Fernández P.; J. Blanco; S. Malato; M. I. Maldonado. Drinking Water Disinfection by Solar Photocatalysis. 2º Congreso Internacional Ambiental del Caribe. Centro de Convenciones, Cartagena de Indias (Colombia). 19-21 Mayo, Oral Presentation. 2004a.
- [40] Fernandez Pilar, Sixto Malato, Damien Gumy, Cesar Pulgarin, Octav Enea and John Kiwi. Supported Fe/C and Fe/Nafion/C catalysts for the photo-Fenton degradation of Orange II under solar radiation. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 263-265. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004f.
- [41] Fernández-Alba A.R., A. Agüera, I. Ferrer, M. Thurman, L. Pérez-Estrada, S. Malato. Degradation of diclofenac by photolysis and photocatalysis. identification of transformation products. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 41-42. Oral presentation. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004.
- [42] Garcia G., A. Egea, M. Romero (2004). "Performance evaluation of the first solar tower operating with autonomous heliostats: PCHA project", Proceedings 12th SolarPACES International Symposium, 6-8 October 2004, Oaxaca, Mexico. S3-231. CD-Rom. Eds. C. Ramos and J. Huacuz. ISBN: 968-6114-18-1.
- [43] Gernjak W., M.I. Maldonado, I. Oller, L. Yebra, M. Fühacker and S. Malato. Solar photo-Fenton treatment of pesticides on pilot-plant scale. Investigation of process parameters. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 107-108. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004c.
- [44] Gernjak W., M.I. Maldonado, S. Malato, J. Cáceres, T. Krutzler. A. Glaser, R. Bauer. Pilot-plant treatment of olive mill wastewater (OMW) by solar TiO₂ photocatalysis and solar photo-Fenton. Solar Energy, 77, 567-572, 2004a.
- [45] Gernjak W., T. Krutzler, S. Malato and R. Bauer. Solar photo-Fenton treatment of olive mill wastewater (OMW). Pre-treatment and subsequent use for fertirrigation. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 83-84. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004b.
- [46] Gill L.W., O.A. McLoughlin, K.G. McGuigan, E.F. Duffy, S.C. Kehoe, F. Al Touati, W. Gernjak, I. Oller,

- P. Fernandez, S. Malato. Solar disinfection of contaminated water: a comparison of three small-scale continuous flow reactors. In: The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2003 Access Campaign. CIEMAT, ISBN 84-7834-474-8. pp. 53-61, 2004.
- [47] 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.
- [48] Gumy D., Cesar Pulgarin, J. Kiwi, Pilar Fernandez, Leonidas Pérez, Sixto Malato and Octav Enea. Photo-Fenton degradation of model pollutants on Fe/C and Fe/Nafion/C supported catalysts under solar radiation. In: The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2003 Access Campaign. CIEMAT, ISBN 84-7834-474-8. pp. 61-68, 2004.
- [49] Heller P., Pfaender M., Denk T., Téllez F., A. Valverde, Fernández J., Ring A. (2004). "Test and evaluation of a solar powered gas turbine system", Proceedings 12th SolarPACES International Symposium, 6-8 October 2004, Oaxaca, Mexico. CD-Rom. Eds. C. Ramos and J. Huacuz. ISBN: 968-6114-18-1.
- [50] Hublitz A., Blanco J., D. Alarcón-Padilla, M. Spinnler. Comparative assessment of different configurations to supply solar thermal energy to a multi-effect distillation plant for solar seawater desalination. Editorial CIEMAT, Madrid, Spain. ISBN 84-7834-466-7. 136 pag. 2004.
- [51] Julián Blanco, Diego Alarcón. Tecnología híbrida de desalación avanzada solar-gas basada en colectores solares estáticos. Jornadas Nacionales sobre Desalación (Desalación'04), Libro de ponencias, pp. 65-68. Instituto de la Ingeniería de España, Madrid, 17-18 Noviembre 2004a.
- [52] Kositz M., A. Antoniadis, I. Poullos, I. Kiridis, S. Malato. Solar photocatalytic treatment of simulated dyestuff effluents. *Solar Energy*, 77, 591-600, 2004b.
- [53] Kositz M., Poullos I., Malato S., Cáceres J., Campos A. Solar photocatalytic treatment of synthetic municipal wastewater. *Water Res.*, 38, 1147-1154, 2004a.
- [54] Maestro R. y Vidal A.. "Tecnologías de Captura y Retención de CO₂ como una perspectiva de uso sostenible de los combustibles fósiles". Proyecto Final del Master Riesgos Climáticos e Impacto Ambiental". Septiembre 2004. Acuerdo de colaboración entre el CIEMAT y la Universidad Complutense (Ref. 04/136).
- [55] Malato Rodriguez S., J. Blanco Galvez, Claudio A. Estrada Gasca. Photocatalysis (Guest editorial). *Solar Energy*, 77, 443-444, 2004j.
- [56] Malato Rodriguez S., J. Blanco Galvez, M.I. Maldonado Rubio, P. Fernandez Ibañez, D. Alarcon Padilla, M. Collares Pereira, J. Farinha Mendes, J. Correia de Oliveira. Engineering of solar photocatalytic collectors. *Solar Energy*, 77, 513-524, 2004k.
- [57] Malato S. and Manuel I. Maldonado. The "CADOX" Project : A Coupled Advanced Oxidation-Biological Process For Recycling Of Industrial Wastewater Containing Persistent Organic Contaminants. *Applied Catalysis B: Environmental (News Brief)*, 54 (1), N2-N5, 2004i.
- [58] Malato S. Conferencia. Definición de los POAs: fotocatalisis (homogénea y heterogénea); aplicaciones de la luz solar en la fotocatalisis; tecnología de colectores solares. Curso "Investigación, desarrollo y aplicación de métodos heliofotocatalíticos para la descontaminación química y biológica de agua residuales". Universidad del Valle (Cali, Colombia), 7-8 Junio 2004. Univ. De Caldas (Manizales, Colombia), 11-12 junio 2004. Univ. de Antioquia (Medellín, Colombia) 16 Junio 2004e.
- [59] Malato S. Conferencia. Depuración de aguas residuales conteniendo plaguicidas mediante fotocatalisis solar. Feria de la Calidad Ambiental y Ecoeficiencia. Escuela de Calidad Ambiental (CEMACAM, Torre Guil). Murcia, 1-3 Junio 2004c.
- [60] Malato S. Conferencia. Uso de la fotocatalisis en el tratamiento de aguas residuales. Facultad de ingeniería de la Univ. Católica de la Santísima Concepción. Concepción, Chile. 22 Abril 2004b.
- [61] Malato S. Curso en "Advanced Oxidation Methods of the Treatment of Liquid and Air Waste". Aristotle Univ. of Tesseloniki, en cooperación con el Ministerio de Investigación y tecnología de Grecia. 9 a 20 Febrero 2004. 12, 13 y 16 febrero, 2004a.
- [62] Malato S., J. Blanco, M. I. Maldonado. Depuración de aguas residuales conteniendo plaguicidas mediante fotocatalisis solar. *TecnoEnergía*, 36, 62-71, 2004h.
- [63] Malato S., J. Blanco, M.I. Maldonado, D. C. Alarcón, P. Fernández, I. Oller, W. Gernjak. A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants (CADOX). Workshop on "Clean production technologies". A.

- Adjemian, J. Dutrizac, P. Negré, L. Yurramendi (Eds.). 367-381. Oral presentation. Madrid, 30 September-2 October 2004l.
- [64] Malato S., J. Blanco, M.I. Maldonado, D. C. Alarcón, P. Fernández, I. Oller, W. Gernjak A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants "CADOX". Main results. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 33-34. Oral presentation. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004m.
- [65] Malato S.. Solar detoxification and disinfection. In: Encyclopedia of Energy, Vol. 5. Elsevier, Oxford, UK. ISBN 0-12-176480-x-2004. pp. 587-596. 2004g.
- [66] Malato Sixto, Julián Blanco, Diego C. Alarcón, Manuel I. Maldonado, Pilar Fernández-Ibáñez, Wolfgang Gernjak. Photocatalytic Detoxification of water with Solar Energy. 4th Int. Seminar "New Challenges in Catalysis", Serbian Academy of Sciences and Arts, Book of abstracts, p 15, Belgrade, Serbia, 5 – 8 October 2004n.
- [67] Maldonado M. I., S. Malato, I. Oller, W. Gernjak, J. Blanco, D. C. Alarcón. "Proyecto CADOX: tecnología para el tratamiento de efluentes industriales". Ingeniería Química, 409, 121-126, 2004a.
- [68] Maldonado M.I., M. Hincapié, I. Oller, W. Gernjak, J.L. Casas and S. Malato. Solar photodegradation of EC priority substances on pilot-plant scale. Results of preliminary experiments. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 89-90. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004c.
- [69] Maldonado M.I., S. Malato, J. Blanco, D. C. Alarcón, P. Fernández, I. Oller, W. Gernjak. A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants. CADOX Project. 2º Congreso Internacional Ambiental del Caribe. Centro de Convenciones, Cartagena de Indias (Colombia). Oral Presentation. 19-21 Mayo, 2004b.
- [70] Marcos M.J., Pérez-Rábago C.A., Estrada C.A., Romero M. (2004) "Heat transfer in a conical cavity calorimeter to measure the thermal power of a point focus concentrator". Proceedings EuroSun2004. Vol I. Pp. 251-258. Ed. DGS-Munich and PSE-Freiburg. ISBN: 3-9809656-1-9.
- [71] Marcos M.J., Romero M., Palero S. (2004) "Analysis of air return alternatives for CRS-type open volumetric receiver". Energy, 29, 677-686
- [72] McGuigan K.G., E.F. Duffy, F. Al Touati, S.C. Kehoe, O.A. McLoughlin, L.W. Gill, W. Gernjak, I. Oller, M.I. Maldonado, S. Malato, R.H. Reed. Inactivation of bacterial contaminants in drinking water using a novel batch-process TiO₂-assisted solar photocatalytic disinfection (SPC-DIS) reactor for use in developing countries. In: The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2003 Access Campaign. CIEMAT, ISBN 84-7834-474-8. pp. 69-78, 2004.
- [73] McLoughlin O.A., P. Fernandez Ibañez, W. Gernjak, S. Malato Rodriguez, L.W. Gill. Photocatalytic disinfection of water using low cost compound parabolic collectors. Solar Energy, 77, 625-633, 2004b.
- [74] McLoughlin O.A., S.C. Kehoe, K.G. McGuigan, E.F. Duffy, F. Al Touati, W. Gernjak, I. Oller Alberola, S. Malato Rodriguez, L.W. Gill. Solar disinfection of contaminated water: a comparison of three small-scale reactors. Solar Energy, 77, 657-664, 2004a.
- [75] Osuna R., V. Fernández, S. Romero, M. Romero, M. Sanchez (2004). "PS10: A 11-MW solar tower power plant with saturated steam receiver", Proceedings 12th SolarPACES International Symposium, 6-8 October 2004, Oaxaca, Mexico. S3-102. CD-Rom. Eds. C. Ramos and J. Huacuz. ISBN: 968-6114-18-1.
- [76] Palero S., Romero M., Estrada C.A., Castillo J.L., Monterreal R., Fernández-Reche J. (2004) "Experimental study of temperature distributions inside metallic monoliths used as volumetric solar absorbers". Proceedings EuroSun2004. Vol I. Pp. 934-943. Ed. DGS-Munich and PSE-Freiburg. ISBN: 3-9809656-1-9.
- [77] Pérez-Estrada L., S. Malato, I. Maldonado, W. Gernjak, A. Agüera, A. R. Fernández-Alba. Degradation of diclofenac by solar driven photo-fenton at pilot plant scale. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 153-154. Poster. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004.
- [78] Rodríguez D., Alfredo Morales, Julian Blanco, Manuel Romero, Aldo Steinfeld (2004) "Conversión de Petróleo Pesado en Hidrógeno utilizando Energía Solar Concentrada". Ingeniería Química, 413, 125-128.
- [79] Rodríguez, D; Morales, A.; Blanco, J.; Romero, M.; Steinfeld, A. "Conversión de petróleo pesa-

- do en hidrógeno con energía solar concentrada. Proceso de gasificación solar de coque de petróleo". *Ingeniería Química*, 413, 125-128, 2004.
- [80] Romero M. (2004) "Energía solar térmica: Tecnologías, situación actual y perspectivas a corto y medio plazo para su implantación"; *Tecnología de la Energía*; Ed. Club Español de la Energía, Madrid, pp. 275-283. ISBN: 84-609-2563-3.
- [81] Romero M., Blanco J., Rivas H., Steinfeld A. (2004). "Proceso de gasificación solar para su aplicación en los crudos pesados de la Faja del Orinoco". Libro de Actas XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Vigo, España, 14-18 Septiembre 2004. Vol II. Pp. 689-694. Eds. M. Vázquez y J.F. Seara. Asociación Española de Energía Solar. ISBN: 84-609-2262-6
- [82] 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.
- [83] Romero M., C. Richter (Eds.) (2004). *Proceedings of SolarPaces Tasks Meetings*, Freiburg, Germany, June 23rd 2004. Pub. CIEMAT. ISBN: 84-7834-473-X.
- [84] Romero M., Martínez D., Zarza E. (2004). "Terrestrial Solar Thermal Power Plants: On the verge of commercialization". *Proceedings of the 4th Int. Conf. On Solar Power from Space-SPS '04*, Granada, Spain, 30 June-2 July 2004, pp 81-89. Ed. European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands. ISBN: 92-9092-878-6.
- [85] Romero M., Monterreal R., Fernández V. (2004) "New heliostats development in Spain". Romero M., S. Jones, A. Meier, C. Richter (Eds.) (2004). *Proceedings of SolarPaces Tasks Meetings*, Oaxaca, México, October 5th 2004. Pub. CIEMAT. ISBN: 84-7834-482-9..
- [86] Romero M., S. Jones, A. Meier, C. Richter (Eds.) (2004). *Proceedings of SolarPaces Tasks Meetings*, Oaxaca, México, October 5th 2004. Pub. CIEMAT. ISBN: 84-7834-482-9.
- [87] Sánchez M., M. Romero, V. Fernández (2004). "Potential of optimized non-tracking mirror concentrators for distributed solar applications", *Proceedings 12th SolarPACES International Symposium*, 6-8 October 2004, Oaxaca, Mexico. S7-229. CD-Rom. Eds. C. Ramos and J. Huacuz. ISBN: 968-6114-18-1.
- [88] Sanchez M., Marcos M.J., Romero M. (2004) "Design parameters influence on flux distribution through prismatic channels of volumetric absorbers". *Proceedings EuroSun2004*. Vol I. Pp. 953-962. Ed. DGS-Munich and PSE-Freiburg. ISBN: 3-9809656-1-9.
- [89] Sarriá V., Péringer P., Cáceres J., Blanco J., Malato S., Pulgarín C. "Solar degradation of 5-amino-6-methyl-2-benzimidazolone by TiO₂ and iron(III) catalyst with H₂O₂ and O₂ as electron acceptors". *Energy*, 29, 853-860, 2004a.
- [90] Sarriá V., S. Kenfack, S. Malato, J. Blanco and C. Pulgarín. New photocatalytic/photovoltaic hybrid system for simultaneous water decontamination and solar energy conversion. 3rd European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications. Book of Abstracts, 283-284. Oral presentation. Barcelona, 30 June and 1, 2 July 2004b.
- [91] Sarriá V., S. Kenfack, S. Malato, J. Blanco, C. Pulgarín. Solar hybrid photocatalytic photovoltaic system. 12th Inter. Symp. Solar power and Chemical Energy Systems. Abstract S6-335. Oaxaca, Mexico, 6-8 October, 2004c.
- [92] Téllez F., M. Romero, P. Heller, A. Valverde, J.F. Reche, S. Ulmer, G. Dibowski (2004). "Thermal Performance of "SolAir 3000 kWth" Ceramic Volumetric Solar Receiver", *Proceedings 12th SolarPACES International Symposium*, 6-8 October 2004, Oaxaca, Mexico. S9-206. CD-Rom. Eds. C. Ramos and J. Huacuz. ISBN: 968-6114-18-1.
- [93] Trommer D., F. Noembrini, M. Fasciana, D. Rodríguez, A. Morales, M. Romero, A. Steinfeld (2005), "Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power – I. Thermodynamic and kinetic analyses", *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 605 – 618.
- [94] Valenzuela, L.; Zarza, E. "Control Scheme Description for the Solar Field Predesign for Steam turbo-generator KKK - 5773 kWe". Informe INDITEP-EN-SF-04. Plataforma Solar de Almería, Febrero 2004.
- [95] Valenzuela, L.; Zarza, E.; Berenguel, M.; Fernández, E. "Direct steam generation in solar boilers". Artículo publicado en la revista *IEEE Control Systems*. Vol. 24, nº 2, Abril de 2004: pp. 15-29.
- [96] Vidal, A.; Jurado, J.R. and Colomer, M. "Photoassisted carbon dioxide reduction by TiO₂-RuO₂ catalysys" 14th Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy . 4- 9 Julio. París (Francia).
- [97] Wiszniowski J., Robert D., Surmacz-Gorska J., Miksch K., Malato S. and Weber J.V. Solar photo-

- catalytic degradation of humic acids as a model of organic compounds of landfill leachate in pilot plant experiments: influence of inorganic salts. *Appl. Catal. B: Environ.*, 53, 127-137, 2004.
- [98] Yebra L., Berenguel M., Romero M., Martínez D., Valverde A. (2004) "Automation of solar plants". *Proceedings EuroSun2004*. Vol I. Pp. 978-984. Ed. DGS-Munich and PSE-Freiburg. ISBN: 3-9809656-1-9.
- [99] Zarza, E. "Implementation of a EG-PCM storage system into a solar plant. Connection to the solar field and industrial process". Informe técnico DISTOR-CIE-01. Plataforma Solar de Almería,, Agosto de 2004.
- [100] Zarza, E.; Rojas. M.E.; González, L.; Caballero, J.M.; Rueda, F. " INDITEP: The First DSG Pre-commercial Solar Power Plant" . Artículo presentado en el 12th Solar PACES International Symposium celebrado en Oaxaca (México) los días 6-8 de octubre de 2004.

Lista de Acrónimos

AIE	Agencia Internacional de la Energía
ASINEL	Asociación para la Investigación Eléctrica
BOE	Boletín Oficial del Estado (Official State Bulletin) (E)
BMU	German Ministry of the Environment
CASA	Construcciones Aeronáuticas S.A.
CCD	charge-coupled device
CCP	colectores cilindro-parabólicos
CE	Comisión Europea
CEA	Comisariado de la Energía Atómica Francés
CESA-1	Central Eléctrico Solar Almería-1
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas
CLF	colector lineal Fresnel
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique (F)
COT	Carbono Orgánico Total
CPC	colector parabólico compuesto
CRS	Sistema de Receptor Central
DCS	Sistema de colectores distribuidos
DER	Dpto. de Energías Renovables (CIEMAT)
DISS	Direct Solar Steam
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (D)
DBO	demanda biológica de oxígeno
DQO	demanda química de oxígeno
EDAR	estaciones depuradoras de aguas residuales

ETH	Instituto Federal de Tecnología Zurich (CH)
FTIR	espectroscopía infrarrojo de transformación Fourier
FV	fotovoltaico
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
HST	Hocheffiziente Solarturm-Technologie -Tecnología de torre solar de alta eficiencia
HTF	fluido de transferencia de calor
INETI	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (P)
IPHE	Internacional Partnership on Hydrogen Economy
LEC	Levelized Electricity Cost
MBB	Messerschmitt Bolkow-Blohm (D)
MEC	Ministerio de Educación y Ciencia (E)
MED	destilación multi-efecto
MHD	magnetohydrodynamic energy conversion
NTUA	National Technical Univ. of Athens
PAO	Procesos Avanzados de Oxidación
PCHA	Primer Campo de Helióstatos Autónomos
Prohermes II	Programmable Heliostat and Receiver Measuring System II
PS10	Planta Solar 10
PSA	Plataforma Solar de Almería
PDVSA	Petróleos de Venezuela
PTC	colector cilindro-parabólico
RTU	Universidad Técnica de Riga
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition software
SBP	Schlaich Bergermann und Partner (D)
SEGS	Solar Electric Generating Systems
SENER	Empresa de Ingeniería SENER
SHIP	Solar Heat for Industrial Processes (Tarea 33/4 de la AIE)

SoILAB	'Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar'
SOLUCAR	Solúcar Energía S.A. (E)
SOTR	Sistemas Operativos de Tiempo Real
SSPS	Small Solar Power Systems project
TOC	carbono orgánico total
TSA	Programa Tecnológico de Receptor Solar de Aire
UAL	Universidad de Almería
UPC	Universidad Politécnica de Cataluña
USE	Universidad de Sevilla
VGB	Asociación Europea de Productores Eléctricos
WIS	Weismann Institute of Science (IL)
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (D)



PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

Carretera de Senés s/n
Apartado 22
04200 TABERNAS (Almería), Spain
Teléfono: +34 950 387900
Fax: +34 950 365300
e-mail: info@psa.es
web: www.psa.es