Plataforma
Solar de
Almería

Informe Anual 2005

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA

Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

ÍNDICE

Introducción 5

Presentación General 7

La PSA como gran instalación solar: Datos generales 7
Organigrama y Estructura Funcional 8
Recursos Económicos y Humanos 9
Entorno de Colaboración 11
Actividades de Formación 12

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 26
Instalaciones de Desalación Solar 28
Otras Instalaciones 30

Proyectos de I+D 35

Introducción 35
Unidad de Sistemas de Concentración Solar 37
Grupo de Media Concentración 39
Grupo de Alta Concentración 54
Grupo de Combustibles Solares y Procesos Industriales 73
Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar 78

Eventos 107

Referencias Documentación 111

Lista de Acrónimos 117

Introducción

A la hora de escribir estas líneas, la actividad investigadora de la PSA 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 Solares de Concentración' (SSC)** y '**Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar' (AMES**).

La nueva unidad SSC 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'.

En esta Unidad SSC 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 2005 se han consolidado 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 fín 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 por la Unidad SSC en relación con la tecnología de receptor central 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 a finales 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.

Nuestra actividad por parte de la Unidad de 'Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar' ha estado centrada en las líneas de destoxificación y desinfección de aguas, así como la desalinización de agua de mar.

Durante este año 2005 se ha consolidado 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 Zürich (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 formalizado 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 localiza físicamente en un nuevo edificio de laboratorios que, financiado parcialmente por el programa FEDER, ha sido inaugurado en el campus de la UAL durante este 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.

Eventos importantes de este año han sido la visita de la Sra. Ministra de Medio Ambiente, Dña. Cristina Carbona, y la recepción del 'Premio Sol y Paz' que otorga la 'Fundación Terra'.

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.

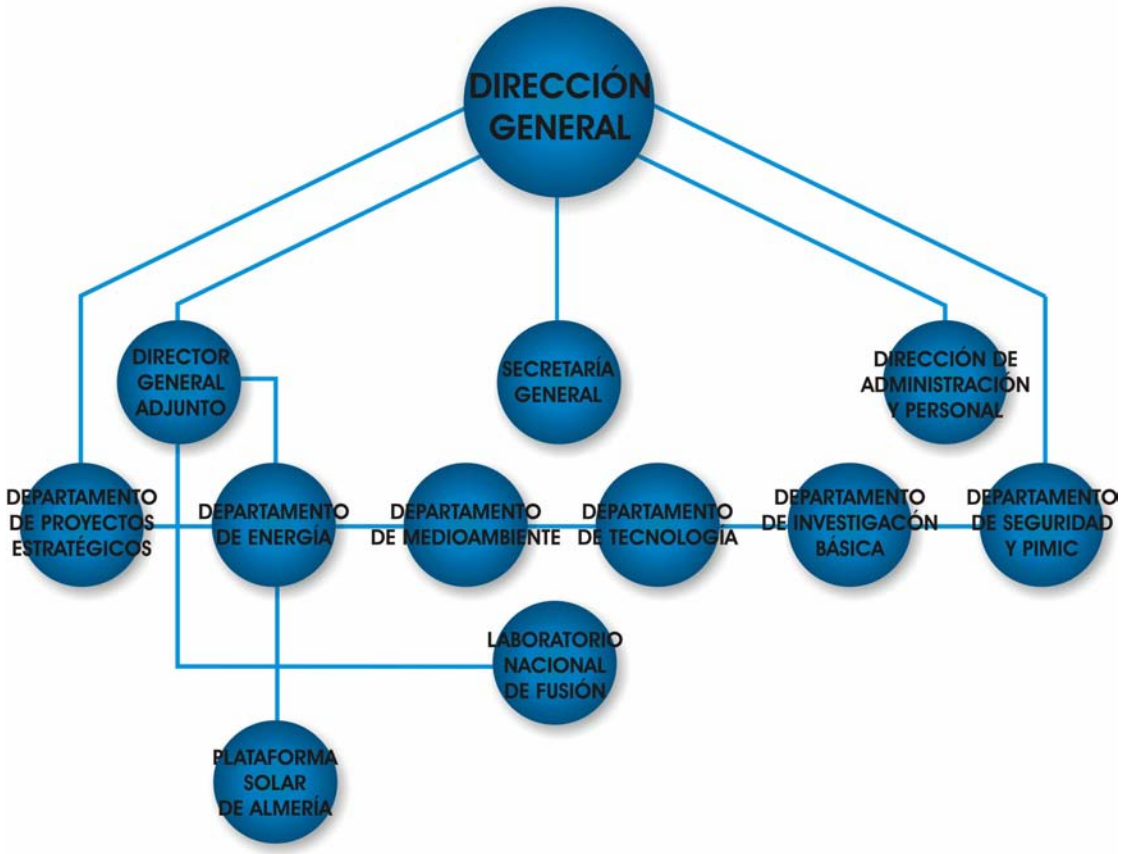


Figura 1. Integración de la PSA en la estructura orgánica del CIEMAT

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 2005 la actividad investigadora que se lleva a cabo en la Plataforma Solar de Almería se ha estructurado en torno a dos Unidades de I+D: Unidad de Sistemas Solares de Concentración y Unidad de Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización del Recurso Solar. La primera está dedicada al desarrollo de nuevas y mejores formas de producir electricidad por medios termosolares y la segunda a explorar las posibilidades químicas de la energía solar, sobre todo en lo que se refiere a su potencial para la destoxificación de efluentes industriales, la desalación y la desinfección de

aguas. Como apoyo a las Unidades 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.

Dentro de las Unidades, cada proyecto de I+D cuenta con un responsable de proyecto y un personal investigador 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, las dos Unidades 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 los servicios 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.

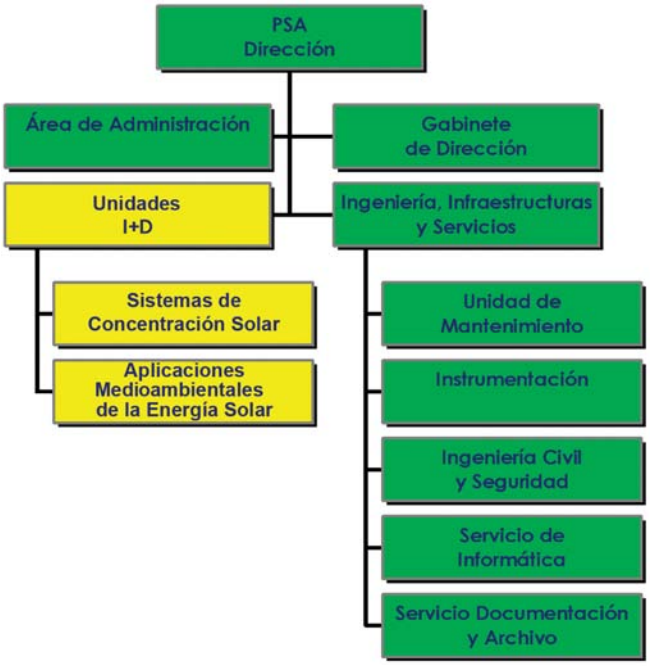


Figura 3. Organigrama PSA 2005. En color verde se recogen las unidades funcionales y servicios adscritos al Área de Dirección.

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 98 personas que constituye a diciembre de 2005 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 98 personas que diariamente desarrollan su trabajo en la PSA, un colectivo importante lo forman el personal de las contratas de operación, mantenimiento y limpieza de las distintas instalaciones (32 personas). Por otro lado, las contratas auxiliares están formadas por 8 administrativos y secretarias, 2 técnicos de servicio a usuarios de informática y 5 vigilantes de seguridad. En cuanto a las contratas de O+M se distribuyen en 9 operadores de instalaciones, 5 vigilantes de operación, 14 personas de mantenimiento mecáni-

co, eléctrico y electrónico y 4 limpiadoras. El resto del personal se distribuye en 51 personas de plantilla de la PSA (personal de CIEMAT), 20 de ellos ubicados en la sede del CIEMAT en Madrid. Además, hay que considerar la aportación del colectivo de 12 personas que constituyen la delegación permanente que DLR tiene en la PSA como consecuencia del desarrollo de los actuales compromisos del Convenio Hispano Alemán.

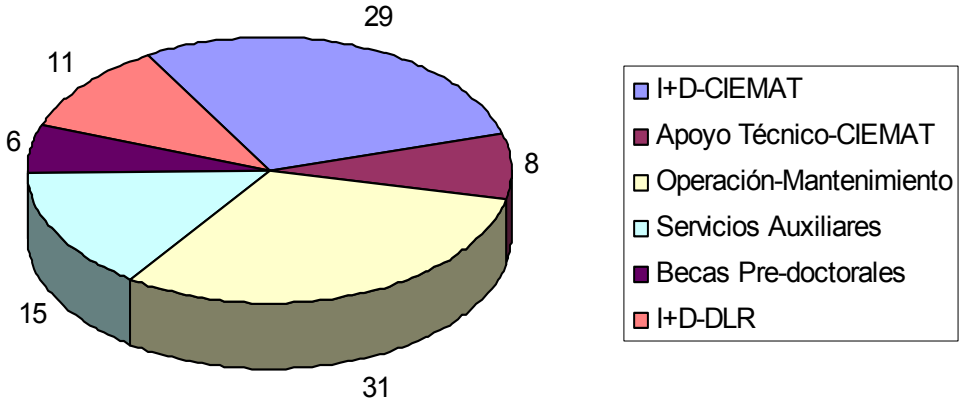


Figura 4. Distribución del personal que desarrolla su actividad en la PSA de forma permanente a Diciembre de 2005

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.

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 2005 los 5,34 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. Este plan está dedicado a mejoras de envergadura que son necesarias en las principales infraestructuras: edificios, campos de helióstatos, etc…

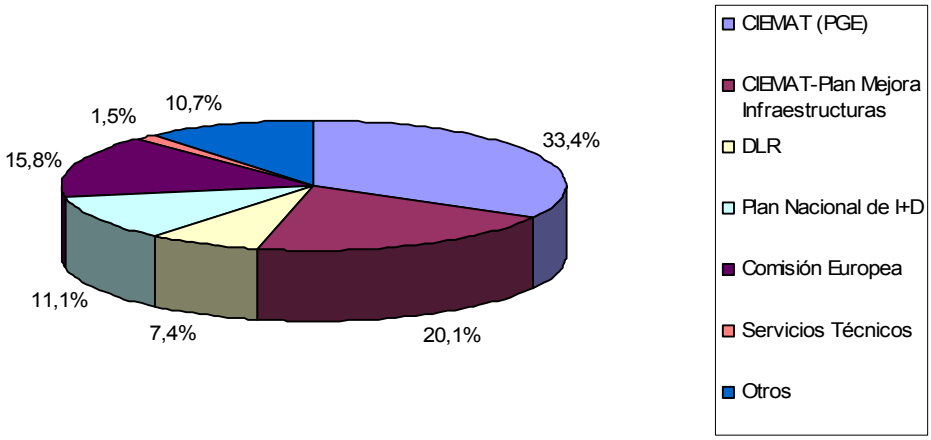


Figura 5. Distribución Ingresos PSA 2005

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 (Instituto de Investigación Aeroespacial Alemán), 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. Un nuevo Anexo V que cubre el periodo 2006-2008 ha sido firmado recientemente a la hora de escribir estas líneas.

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, Italia, Alemania, Francia, Suiza, Comisión Europea, Sudáfrica, Israel, Argelia y Egipto).

Durante este año 2005 se ha consolidado con el lanzamiento de sus primeras actividades 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 PROMES-CNRS de Odeillo (Francia), la división de energía solar del DLR (Alemania), el laboratorio de energías renovables del Instituto Tecnológico Federal de Zürich (Suiza) y el propio CIEMAT. 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 formalizado su adhesión a 'SolLAB'.

Con respecto a las actividades de formación, se cuenta con un convenio para la gestión de becas conjuntas con la Universidad de Almería (UAL) y acuerdos educacionales para recibir a estudiantes procedentes de universidades de toda Europa.

De hecho, esta duradera colaboración con la UAL se ha visto incrementada y consolidada con la creación del Centro Mixto CIEMAT-UAL para la Investigación en Energía Solar 'CIESOL'. Este año se ha inaugurado el edificio dedicado al CIESOL en el campus universitario de La Cañada. Este edificio estará dedicado a laboratorios y salas para reuniones y actividades formativas a celebrar conjuntamente entre ambas instituciones.

En cuanto a la Unidad de Sistemas Solares de Concentración, el entorno de colabora-

Figura 6. Edificio del Centro Mixto 'CIESOL' en el campus universitario de Almería

ción sigue siendo bueno, ya que la PSA tiene relaciones contractuales con un amplio abanico de instituciones nacionales e internacionales. Para los proyectos relacionados con al tecnología de colectores cilindro-parabólicos se siguió colaborando en el año 2005 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 y el Weizmann Institute of Science (Israel). 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 Ingenierie.

En el ámbito de los proyectos relacionados con la tecnología de receptor central 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 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 de la Unidad de Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización del Recurso Solar se mantiene y consolida la extensa lista de instituciones con las que se mantienen relaciones 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, Cohexpal, 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 puedan 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

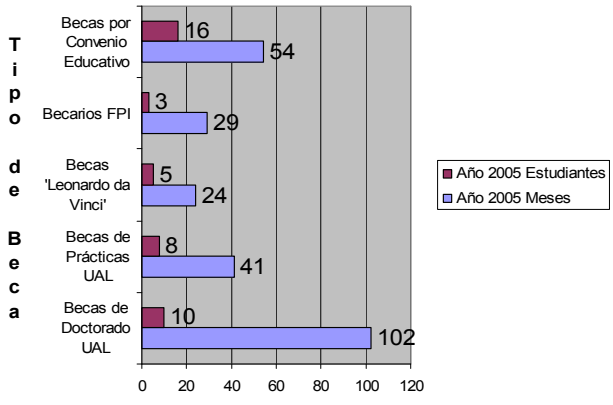


Figura 7. Becarios Año 2005

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 pre-doctorales 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.

El reciente establecimiento del laboratorio virtual europeo 'SolLAB' ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo científico de los investigadores en formación de la PSA. Una de las primeras actividades conjuntas iniciadas por SolLAB ha sido la celebración con frecuencia anual de un seminario para los estudiantes de doctorado de las cuatro instituciones. Los días 14 y 15 de junio de este año 2005 ha tenido lugar la primera edición de este seminario en la sede del DLR en Colonia.

Figura 8. Asistentes de la PSA al seminario celebrado en Colonia

Instalaciones e Infraestructuras

Descripción General de la PSA

La PSA está situada en el Sudeste de España en el Desierto de Tabernas a 37º05'27,8'' Latitud Norte y 2º21'19'' Longitud Oeste. Recibe una insolación directa anual por encima de los 1.900 kWh/(m^2·año) y la temperatura media anual está en torno a los 17ºC.

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 1,8 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.

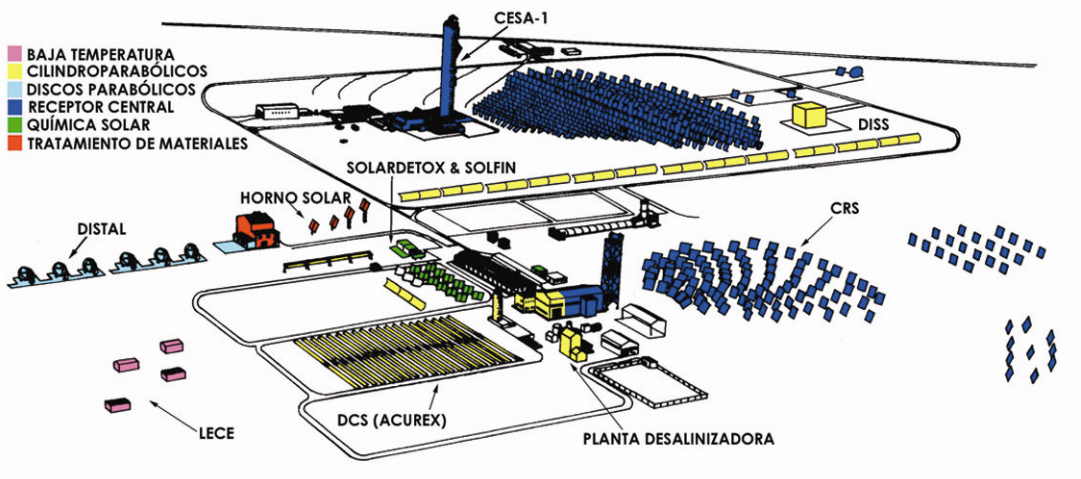


Figura 9. Ubicación de las principales instalaciones de ensayo de la PSA

- 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 m^2 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 10. 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/m^2, se obtiene un flujo pico de 3,3 MW/m^2 . El 99% de la potencia se recoge en un círculo con diámetro de 4 m y el 90% de la misma en un circulo 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 520ºC 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 m^2 de superficie cada una. Existe un segundo campo con 20 helióstatos de 52 m^2 y 65 m^2 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 11. 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/m^2, la potencia térmica total del campo asciende a 2,7 MW y se obtiene un flujo pico de 2,5 MW/m^2 . El 99% de la potencia se recoge en un círculo con diámetro de 2,5 m y el 90% de la misma en un circulo 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 introducidos por el equipo de visión y rectificación

Figura 12. Vista frontal del banco de ensayos de receptores volumétricos en la torre CRS, en el rango de 200-350 kW.

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 de explican, de forma resumida, las características principales de todas estas instalaciones.

LA PLANTA EXPERIMENTAL DISS

Esta instalación fue montada y puesta en funcionamiento en el año 1998, con el fin de llevar a cabo experimentos relacionados con la generación directa de vapor a alta presión y temperatura (100 bar/400ºC) en los tubos absorbedores 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 absorbedores.

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 13. Lazo DISS en operación

tubos absorbedores de una fila de colectores cilindro-parabólicos de 665 m de longitud y 3.838 m^2 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 14) 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 esta orientado en la dirección norte-sur. Los colectores están compuestos por módulos reflectantes cilindro-parabólicos de 12 m de largo y 5,76 m de ancho. El campo solar consta de dos partes: la sección de precalentamiento/evaporación, y la sección de sobrecalentamiento. Al final de la sección de precalentamiento/evaporación existe una bomba de recirculación y un separador agua/vapor que aumentan la flexibilidad operativa del sistema. El Sistema de Potencia consta de separadores de agua/vapor, condensadores, sistema de dosificación química, precalentadores, desgasificador y bombas de agua.

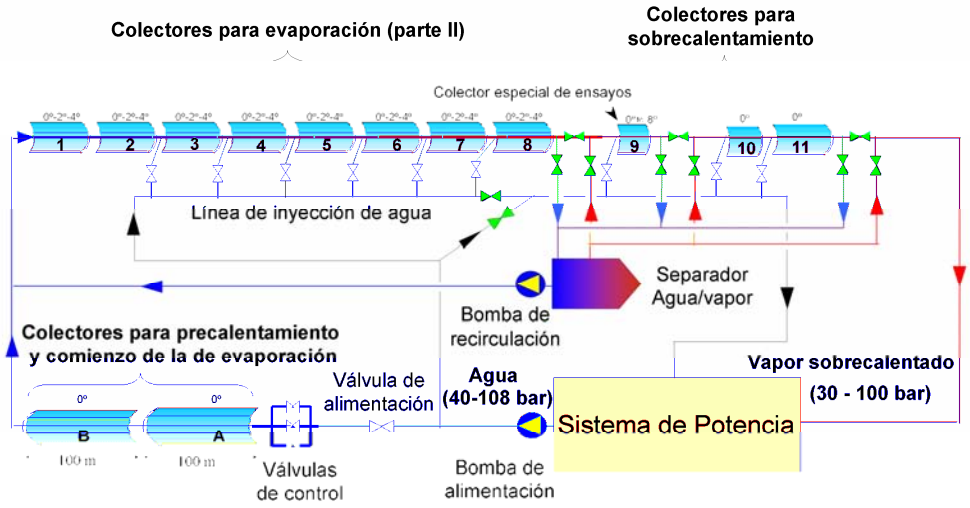


Figura 14. Esquema simplificado del lazo DISS existente en la PSA

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 15. 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 m^2. El aceite térmico usado en esta instalación (Syltherm 800) tiene una temperatura máxima de trabajo de 420ºC, y un punto de congelación de –40ºC. 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 5º.

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

- Tanque de expansión para el aceite, de 1m^3 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 150ºC – 425ºC. 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 m^2.

También dentro del lazo de ensayos, se ha insertado, para su evaluación, un sistema de almacenamiento térmico compuesto por cuatro módulos de 5 m^3 y 10-15 toneladas cada uno, dos de hormigón y dos de material cerámico, y 175 kWh de capacidad de almacenamiento por módulo (Figura 16). 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 16. 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:

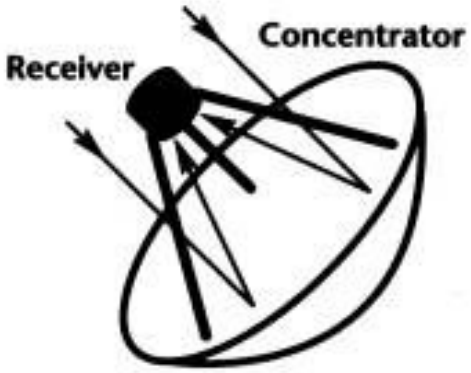


Figura 17. Esquema de funcionamiento de un disco parabólico con motor Stirling en el foco.

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

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

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

El rango óptimo de potencias para ser competitivo en el mercado energético estaría en el orden de unas decenas de kilowatios 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.

Figura 18. **Un sistema DISTAL I en operación en la Plataforma Solar de Almería**

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

DISTAL II

Como primer intento por obtener un sistema de mejores prestaciones y coste por kW_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.

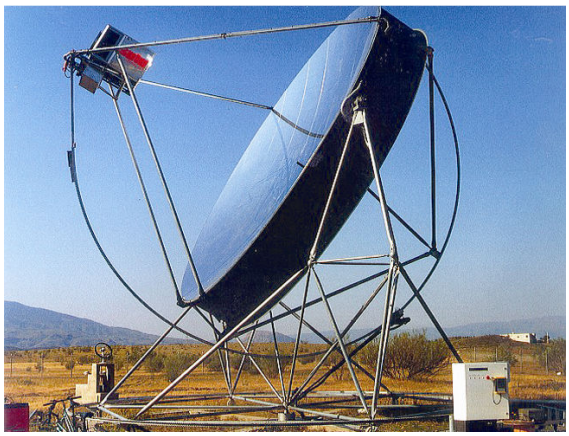


Figura 19. **Unidad DISTAL II**

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 20. 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 helióstato 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 –helióstato- 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 helióstato. Bajo el foco se encuentra la mesa de ensayos que tiene movimiento en las tres dimensiones espaciales (Este-Oeste, Norte-Sur, arriba-abajo), y sirve para posicionar las probetas con gran exactitud en el foco.

HELIÓSTATOS

Los 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 m^2, lo que da un total de 53,58 m^2. Cada una está compuesta por dos espejos con un 90% de reflectividad y van fijadas a un marco portante por 30 ventosas.

CONCENTRADOR

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

Está compuesto por 89 facetas esféricas con un total de 98,5 m^2 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.

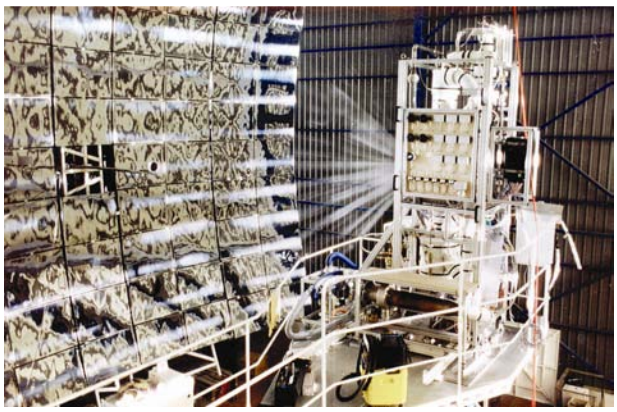


Figura 21. Disco concentrador del Horno Solar (izquierda) y receptor en operación dentro de la zona focal (derecha).

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 55º con la horizontal y en abierto 0º.

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 22. 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

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 absorbedor (vidrio borosilicatado de 56 mm de diámetro y 2 mm de espesor) tiene una longitud de 16 m por módulo, lo que totaliza 64 m.

Posteriormente se han instalado otras plantas piloto basadas en CPCs (colectores cilindroparabólico compuestos). Estos colectores son capaces de aprovechar tanto la radiación difusa como la directa. Los reflectores CPC están hechos de aluminio anodizado. En la PSA hay instaladas varias plantas empleando este tipo de colectores. La más antigua consta de tres módulos (Figura 23) cada uno con una superficie de 3 m^2 con una inclinación sobre la horizontal de 37º. Para la operación del sistema se dispone de un sistema de bomba-tanque-tuberías de interconexión. El volumen total del sistema es de aproximadamente 250 L y el del tubo absorbedor es de 108 L (volumen iluminado). 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 37º (latitud local). El volumen total del reactor es de 40 L, de los cuales 22 L es el volumen total irradiado y el resto formado por tuberías y tanque.

En el contexto del Proyecto Europeo CADOX 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 O_3/h)). Todo ello monitorizado (pH, T, ORP, O_2, caudal, H_2O_2, O_3) 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.

Figura 23. Vista general de las cinco instalaciones para aplicaciones de Fotoquímica Solar basadas en colectores CPC instaladas en la PSA.

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 37º (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.

LABORATORIO DE QUÍMICA SOLAR

El laboratorio de Química Solar de la PSA es un edificio de unos 75 m^2 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. Para el análisis de muestras microbiológicas existe un microscopio óptico de contraste de fases con fluorescencia acoplado a un sistema de fotografía digital. 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).

Instalaciones de Desalación Solar

PLANTA SOL-14 DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Esta instalación está constituida por los siguientes subsistemas:

- Una planta de destilación multiefecto (MED) de 14 etapas.
- Un campo de captadores solares estáticos de tipo CPC (concentrador parabólico compuesto).
- Un sistema de almacenamiento térmico basado en agua.
- Una bomba de calor por absorción (LiBr-H_2O) de doble efecto.
- Una caldera de gas pirotubular.

El sistema opera con agua como fluido caloportador, la cual es calentada a su paso por lo captadores solares y transportada al sistema de almacenamiento. El agua caliente procedente de dicho sistema de almacenamiento proporciona a la planta MED la energía térmica necesaria para su funcionamiento.

El campo solar está compuesto por 252 captadores solares estáticos (CPC Ao Sol 1.12x) con una superficie total de 500 m^2, dispuestos en cuatro filas de 63 captadores. Debido al diseño hidráulico empleado (retorno invertido) el caudal nominal total (14.97 m^3/h) se distribuye de manera uniforme entre las cuatro filas (3.74 m^3/h) sin necesidad de implementar ningún tipo de regulación adicional. Los captadores se organizan en grupos de nueve, estando conectados cada uno de estos grupos en paralelo dentro de cada fila, las cuales a su vez están conectadas también en paralelo con la línea de distribución a los tanques de almacenamiento. Cada grupo de nueve captadores se organiza de la siguiente manera: i) los captadores están orientados este-oeste con objeto de maximizar la captación de energía solar; ii) cada grupo se subdivide en tres subgrupos de tres captadores, iii) dentro de cada subgrupo los captadores están conectados en paralelo; iv) cada subgrupo se conecta con el siguiente en serie. La temperatura máxima de trabajo es de 100ºC ya que los captadores se encuentra conectados con los tanques de almacenamiento en circuito abierto los cuales se encuentran a presión atmosférica.

El sistema de almacenamiento térmico está constituido por dos tanques de agua interconectados entre sí con una capacidad total de 24 m^3. Este volumen permite la autonomía de operación suficiente para que el sistema de respaldo pueda alcanzar las condiciones nominales de operación.

El sistema fósil de respaldo está integrado por una caldera de gas propano de tipo pirotubular con una capacidad máxima de producción de 200 kg/h de vapor saturado a una presión de 10 bar. Dicha caldera permite garantizar las condiciones de operación de la bomba de calor (180ºC, 10 bar) así como la operación de la planta MED en ausencia de radiación solar. El gas se almacena en un tanque exterior con una capacidad de

Figura 24. Campo de captadores solares estáticos (500 m^2) de la planta SOL-14

Dimensiones	2012 x 1108 x 107 mm
Área de apertura	1.98 m²
Absorbedor	
Emisividad	0.10 - 0.15
Absorptividad	0.94 - 0.95
Peso (vacío)	38 kg
Presión de operación	6 bar
Presión de ensayo	12 bar
Eficiencia óptica	0.70 - 0.71
Factor de pérdidas térmica .... s	3.4 W/m²-K

Figura 25. Especificaciones técnicas del captador solar AoSol 1.12x y detalle del circuito hidráulico del campo de captadores solares

2450 litros, lo que permite una autonomía de operación de 143 horas.

La planta de desalación consiste en una unidad de destilación multi-efecto con 14 etapas, 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 2.326 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 40ºC, con una temperatura máxima de operación de 70ºC en la primera celda. El sistema de vacío está compuesto por dos hidroeyectores alimentados por agua de mar a 3 bar. Dicho sistema de vacío se utiliza para evacuar el aire de la unidad al comienzo de la operación y para compensar las pequeñas cantidades de aire y gases liberadas con el agua de alimentación, así como las pequeñas pérdidas que puedan producirse en las diferentes conexiones.

Durante el año 2005 se ha procedido a la instalación de un nuevo prototipo de bomba de calor por absorción de doble efecto (LiBr – H_2O), desarrollado específicamente para su acoplamiento a la planta de destilación multi-efecto de la PSA. Dicho dispositivo permite aumentar el valor del factor de rendimiento de la planta MED hasta un valor de 20 gracias a la recuperación de la energía resultante de condensar el vapor saturado de baja exergía producido en el último efecto de dicha planta.

Figura 26. Bomba de calor por absorción de doble efecto acoplada a la planta SOL-14

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 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.

Figura 27. Vista de la plataforma de ensayo de captadores solares estáticos

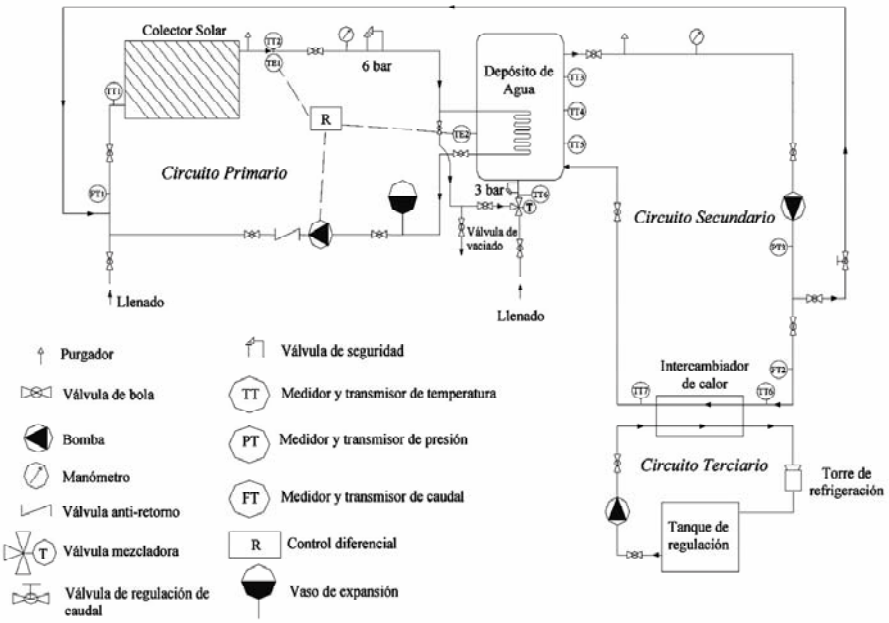


Figura 28. Esquema general de la plataforma de ensayo de captadores solares estáticos

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 mejorar los servicios suministrados por la antigua estación, instalando una nueva estación radiométrica cumpliendo los más estrictos requisitos de calidad y precisión en la medida de la radiación solar. La configuración de la nueva estación se ha

hecho siguiendo las directrices de la Organización Meteorológica Mundial en el marco de la red: Baseline Surface Radiation Network, a la que pertenece de pleno derecho desde octubre de 2005.

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

Figura 29. Visión global de la nueva estación radiométrica de la PSA

Los equipos de la estación radiométrica constan de tres partes fundamentales:

1) ***Los instrumentos de medida***. Los instrumentos de medida de la estación meteorológica de la PSA son instrumentos de la más 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. Los valores registrados en esta estación pueden ser utilizados como una referencia de calidad en el análisis y/o validación de modelos meteorológicos o medioambientales. Dentro de los instrumentos diferenciamos entre los destinados a:

   - Medida del balance radiativo terrestre. Se miden las radiaciones entrantes y salientes (a 30 m) de onda larga y corta.
   - Caracterización de la radiación solar: componentes (directa y difusa) y UV.
   - Medida del perfil vertical del viento: se miden la velocidad y dirección de viento a 2, 10 y 30 m.
   - Medida del perfil vertical de temperatura y humedad: a 2 y 10 m.
   - Información meteorológica varia: pluviómetro, barómetro y psicrómetro.

2) ***El espectrorradiómetro***, que por su distinta naturaleza debe de ser considerado como un sensor 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 puede trabajar con tres sondas alter-

Figura 30. Sondas del espectrorradiómetro para medida de la radiación global y difusa dispuestas en el seguidor solar

Figura 31. Detector del espectrorradiómetro con el *switcher* de conexión de las tres sondas

nativamente, 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 he programado de manera que registra un espectro (con una resolución aproximada de 2 nm en el UV y visible y de 10 nm 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.

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 minuto y promediados de todas las variables registradas. Durante 2005 se han terminado de implementar las herramientas de explotación de la base de datos. Actualmente, se accede a la información a través de la página web de la PSA. Para el acceso es preciso registrarse con la finalidad de conocer la demanda de información.

Figura 32. Acceso y registro de usuarios a la información de radiación solar.

EL LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ESPECTRAL

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

Figura 33. Ubicación del Laboratorio de Calibración Espectral.

Figura 34. Estación radiométrica en el CEDER (Soria)

caso, dado que queremos que el equipo opere de manera continua, se hacía preciso la calibración in situ, para:

- 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.

ESTACIÓN RADIOMÉTRICA DEL CIEMAT EN EL CEDER (SORIA).

Esta nueva estación permite 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 únicamente sensores de radiación solar de onda corta en un seguidor solar 2AP, para registrar la radiación global y sus dos componentes.

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

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

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

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.

Figura 35. Vistas del LECE: Células, edificios referencia y chimenea solar

Proyectos de I+D

Introducción

La actividad investigadora de los diversos grupos integrados en la PSA ha continuado gozando de buena salud durante el año 2005.

En la Unidad de Sistemas de Concentración Solar 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.

Durante el año 2005 han continuado 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 fín se desarrollará un sistema de almacenamiento basado en materiales con cambio de fase.

Dentro de la tecnología de receptor central, 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 a finales del año 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. Se ha iniciado una colaboración estratégica con SENER para el ensayo y validación de un panel del receptor que se usaría en dicha planta comercial.

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 iniciado su segunda fase, consistente en realizar la ingeniería y la fabricación de un receptor de 500 kW destinado a validar el escalado de la tecnología mediante una campaña de ensayos en la torre CRS.

El año 2005 ha sido especialmente relevante para el grupo de 'Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar' ya que ha supuesto una consolidación importante de las actividades que se definieron como objetivo después de la reestructuración realizada por el CIEMAT a principios del año 2004. Buena prueba de ello ha sido la aprobación, a finales de 2005, de un total de 5 proyectos eu-

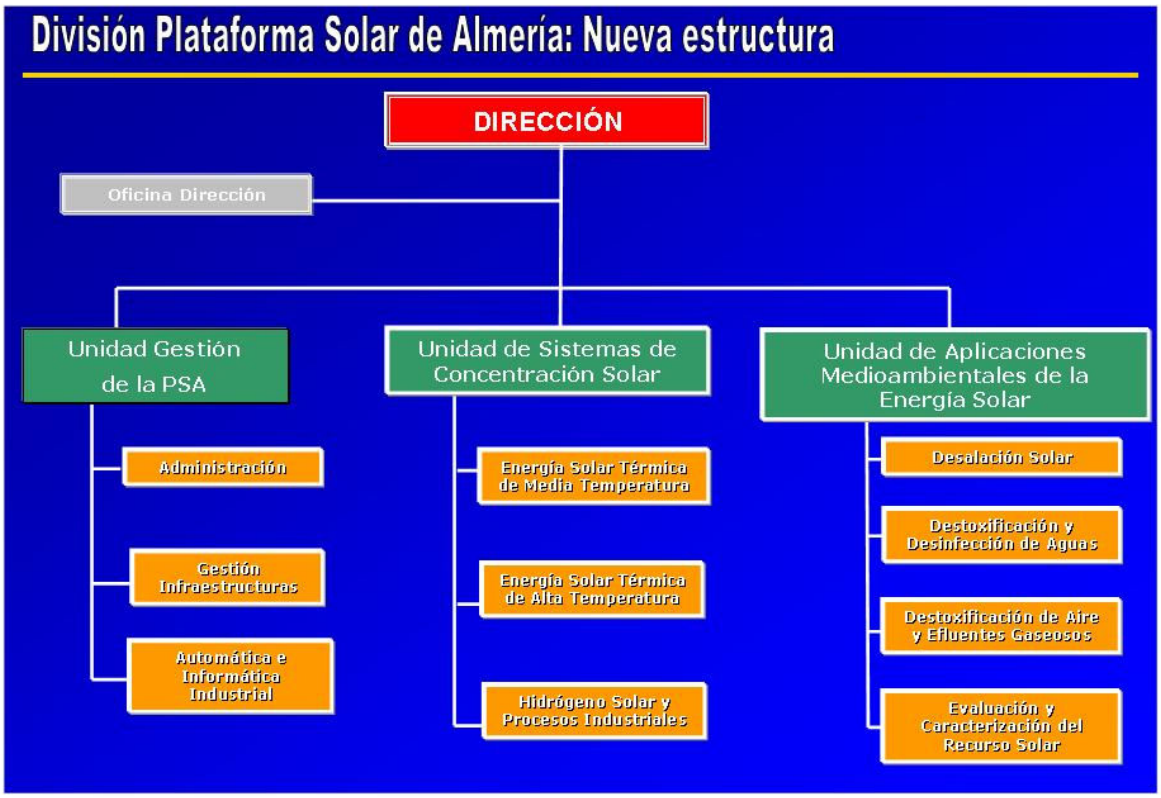


Figura 36. Unidades que configuran la actividad de I+D en la PSA

ropeos (VI Programa Marco de la Comisión Europea) más otro de excelencia de la Comunidad Autónoma de Madrid.

En lo referente a la actividad propiamente realizada durante el año 2005 hay que destacar, en el campo de la destoxificación solar, el continuo y creciente interés, tanto científico como industrial, hacia esta aplicación de la luz solar. Una prueba de ello ha sido la instalación de una nueva instalación industrial en la empresa DSM-Deretil, en el marco del proyecto CADOX, basada en la tecnología ya utilizada en otras plantas-piloto anteriores.

En el campo de la desinfección solar es de destacar la conclusión de los proyectos SOLWATER y AQUACAT, que han permitido desarrollar un sistema combinado (mediante la generación de diferentes especies oxidantes) para el control de elementos patógenos presentes en agua de consumo humano que se ha ensayado con éxito en México, Perú, Argentina, Marruecos, Túnez y Egipto. Aunque los resultados han sido altamente satisfactorios, estos sistemas tecnológicos se encuentran aún en una fase preliminar de desarrollo.

En cuanto a la desalinización de agua de mar cabe destacar la culminación, después de 4 años de desarrollo, del proyecto AQUASOL que ha permitido dotar a la PSA de una instalación experimental altamente innovadora y que, dada su complejidad y múltiples posibilidades, va a ser una herramienta muy útil para el diseño e implementación práctica de este tipo de sistemas basados en la tecnología de destilación multiefecto.

Unidad de Sistemas de Concentración Solar

INTRODUCCIÓN

El año 2005 ha sido el primero de andadura para la Unidad de Sistemas de Concentración Solar, USCS, de la PSA, ya que a principios de año se fundieron los anteriores Programas de I+D de "Energía Solar Térmica de Alta Temperatura" y "Tecnología de Colectores Cilindro-Parabólicos" para formar la actual USCS. Esta fusión ha obedecido al plan de re-estructuración puesto en marcha a finales del 2004 por la actual Dirección del CIEMAT con el fin de optimizar el uso de los recursos disponibles y fomentar la colaboración horizontal entre los diversos Departamentos, Divisiones y Grupos de I+D que integran el CIEMAT.

El objetivo general de la Unidad de Sistemas de Concentración Solar (SCS) es promover y contribuir al desarrollo de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar concentrada, tanto para la generación de electricidad como para la aplicación a procesos industriales que requieren concentración solar, independientemente de si es para producir medias temperaturas, altas temperaturas o altos flujos fotónicos.

La actividad en la USCS se ha estructurado, a su vez en tres Grupos de I+D: i) Media Concentración, ii) Alta Concentración y iii) Combustibles Solares y Solarización de Procesos Industriales; lo que permite una transición entre la situación anterior con actividades y personal diferenciado y la situación actual con un incremento de actividad que requiere atender el aumento de solicitudes tanto desde un sector comercial incipiente que precisa asesoramiento, como de participación en proyectos tanto de Investigación, Desarrollo y de Demostración. Esta situación sugiere mantener una cierta gestión distribuida en los tres Grupos o áreas de actividad mencionados, pero compartiendo personal, capacidades experimentales etc., para optimizar los recursos.

Con la nueva estructura se han implantado procedimientos internos para permitir un adecuado flujo de información y colaboración entre los tres Grupos que la integran, ya que se desea que la actividad de I+D de cada Grupo no constituya una parcela cerrada exclusiva de dicho Grupo, sino que permita la colaboración horizontal entre Grupos, lo cual redundará en un uso más eficiente de los recursos disponibles dentro de la Unidad.

La concentración de la radiación solar se hace necesaria cuando quiere aprovecharse la misma en procesos que requieran altas temperaturas y/o altas eficiencias. La forma del sistema concentrador y su relación con el receptor, donde se transfiere la radiación concentrada al proceso de interés, delimita unas pocas tecnologías, todas con presencia en la PSA, tales como: 1) los colectores cilindro parabólicos con foco lineal, que permiten obtener concentraciones medias (flujos de hasta unas 50 veces el flujo solar incidente) y temperaturas de hasta 450 ºC.; con aplicaciones tanto en calor industrial como en producción de electricidad; 2) los campos de helióstatos con receptor central en torre, que permiten obtener altas concentraciones (flujos de hasta unos 1500-2000 veces el flujo solar incidente) y temperaturas de hasta 1100 ºC.; con aplicaciones tanto en producción de electricidad como en la generación de combustibles (como reformado de metano, etc.); 3) los discos parabólicos, que permiten obtener altas concentraciones (flujos de hasta unos 2500-3000 veces el flujo solar incidente) y suelen aplicarse a la producción de electricidad (colocando un motor Stirling y generador en la zona focal); 4) finalmente los hornos solares permiten trabajar a las concentraciones de los discos (o mayores si se utiliza una segunda fase de concentración, pudiendo alcanzar flujos de hasta unos 10000 soles), pero en condiciones casi de laboratorio.

Dentro del Grupo de Media Concentración se llevan a cabo las actividades relacionadas principalmente con la tecnología de colectores solares cilindro-parabólicos (ya que es el tipo de colector más idóneo para este rango de temperaturas), mientras que las actividades dentro de los Grupos de Alta Concentración y Combustibles Solares & Solarización de Procesos Industriales están relacionadas con los Sistemas de Receptor Central, discos Stirling y Hornos Solares.

En persecución del objetivo general arriba mencionado, de promover y contribuir al desarrollo de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar concentrada, las actividades comunes en los tres grupos incluyen:

- Investigación aplicada o tecnológica; como diseño, desarrollo, ensayo y evaluación de componentes y procesos que representen o puedan representar mejoras de la relación prestaciones/coste respecto a los desarrollos de referencia,
- Mantenimiento de la calidad y mejora de las capacidades experimentales, que nos permitan seguir siendo referencia experimental a nivel internacional en todo tipo de tecnologías de concentración solar.
- Desarrollo y/o explotación de herramientas de análisis y diseño como apoyo a los estudios de prediseño de plantas y/o componentes; estudios de viabilidad; o estudios de optimización de 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.
- Contribuir al 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 estas tecnologías; la comunicación de las lecciones aprendidas mediante informes, publicaciones en revistas, contribuciones en congresos, impartición de cursos y seminarios, etc.

Además de los objetivos y actividades comunes, que acabamos de mencionar, cada uno de los tres grupos ha articulado su actividad, durante 2005, en función de unos pocos objetivos o campos de actividad, prioritarios de desarrollo. Estos han sido los siguientes:

Grupo de Media Concentración:

- Desarrollo de la *Generación Directa de Vapor* a alta presión y temperatura en los propios tubos receptores de colectores cilindro parabólicos, con el fin de eliminar el aceite que actualmente se utiliza como fluido de trabajo en las plantas solares con este tipo de colectores
- Desarrollo de nuevos diseños de colectores cilindro-parabólicos adecuados para su aplicación en procesos industriales de calor y refrigeración
- Desarrollo de un sistema de almacenamiento térmico mediante materiales con cambio de fase (almacenamiento en calor latente)

Grupo de Alta Concentración:

- Contribuir al desarrollo de una tecnología nacional de Receptor de Sales en Tubos, capaz de sobrepasar las prestaciones de la planta Solar Two americana, tomada como referencia y susceptible de ser implementada en la primera planta comercial de este tipo, la Solar Tres.
- Desarrollo de la tecnología de Absorbedores Volumétricos, afrontando las incertidumbres aún asociadas a los mismos, como durabilidad, optimización del diseño geométrico y propiedades termo-físicas efectivas en condiciones de alto flujo y alta temperatura.
- 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.
- Explotación de las capacidades y experiencias sobre ensayo, operación, control y evaluación de componentes de Receptor Central, participando en proyectos nacionales e internacionales de desarrollo a iniciativa de terceros.

Grupo de Combustibles Solares y Solarización de Procesos Industriales:

- Producción de hidrógeno solar mediante diversos procedimientos,
- Estudio del comportamiento físico-químico y termoquímico de materiales de alta temperatura, y

- Ensayos de células y dispositivos fotovoltaicos a altas concentraciones. Esta actividad se realiza en colaboración con el Grupo de Alta Concentración.

Las actividades de I+D llevadas a cabo dentro de la Unidad de Sistemas de Concentración Solar se exponen a continuación en este informe anual separadamente para cada uno de los tres Grupos que componen esta Unidad

Grupo de Media Concentración

Las actividades desarrolladas dentro del Grupo de Media Concentración tienen los siguientes objetivos generales:

1) desarrollo de nuevos componentes y aplicaciones para sistemas solares de concentración que trabajen dentro del rango de temperaturas comprendido entre los 150ºC y los 450ºC, denominado *rango de la media temperatura*

2) desarrollo de herramientas de modelado y simulación para los sistemas solares con colectores cilindro-parabólicos, que son los que hoy en día están comercialmente más extendidos para aplicaciones solares dentro del rango de temperaturas indicado en el apartado anterior, y

3) fomentar la creación de un núcleo industrial español al que transferir la tecnología y el conocimiento adquirido por la PSA con los sistemas solares de media concentración, de modo que dicho núcleo industrial pueda impulsar el desarrollo comercial, dentro y fuera de España, de los sistemas solares de media concentración.

Puesto que la tecnología de los colectores solares cilindro-parabólicos, conocidos mediante las siglas CCP, es la que está actualmente más desarrollada para la conversión de la radiación solar en energía térmica dentro del llamado rango de la media temperatura (150ºC – 450ºC) o media concentración (<100), en la actualidad las actividades llevadas a cabo por el Grupo de Media Concentración de la Unidad de Sistemas de Concentración Solar de la PSA giran casi exclusivamente alrededor de dicha tecnología. No obstante, también estamos atentos a una nueva tecnología que, aunque aún está en ciernes desde el punto de vista comercial, presenta interesantes características para ser aplicada dentro del mismo rango de concentración y temperaturas que los colectores cilindro-parabólicos. Se trata de los *Concentradores Lineales Fresnel* (CLF), de los cuales se han instalado hasta el momento un número reducido de prototipos.

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 con grados de concentración de la radiación solar del orden de 20 a 80. 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 400ºC. Por este motivo, los CCP resultan idóneos para alimentar energéticamente procesos industriales térmicos que trabajen entre 150ºC y 400ºC. 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 cumplir los compromisos de Kyoto en cuanto a las emisiones de CO_2 , a la vez que reducir la dependencia energética del exterior que tenemos en España y en la Unión Europea.

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 adjunta muestra una fotografía de un CCP e ilustra su modo de funcionamiento.

Las actividades del Grupo de Media Concentración 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 de media concentración, lo que favorecerá su implantación comercial.

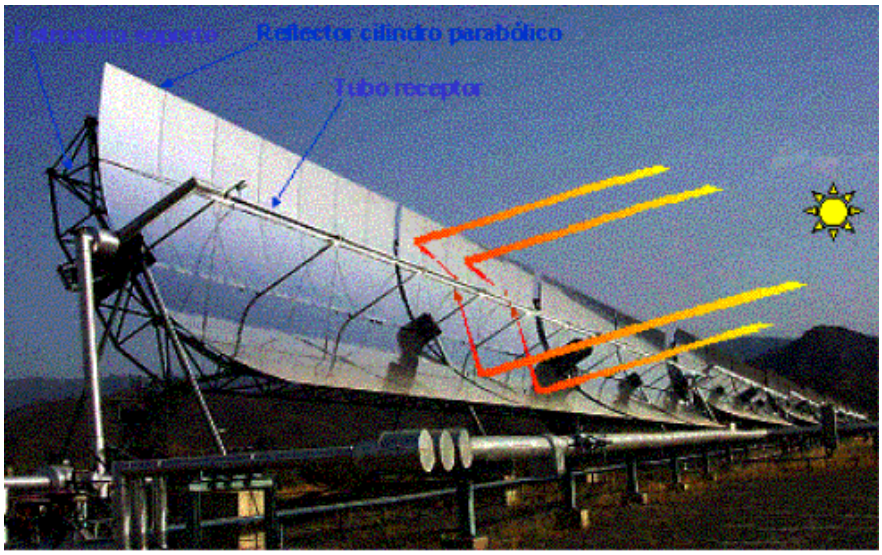


Figura 37. Principio de funcionamiento de un colector cilindro-parabólico

Dentro de las actividades llevadas a cabo en la PSA por el Grupo de Media Concentración durante el año 2005 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 solares. Simultáneamente, se ha iniciado el estudio sobre la viabilidad del uso de novedosos fluidos de trabajo para colectores cilindro-parabólicos, con el fin de explorar nuevas posibilidades de reducción de costes y aumento de la eficiencia.

Durante el año 2005, ha seguido manteniéndose el gran contraste que ya se puso de manifiesto en el año 2004 entre 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) y la falta de desarrollo que aqueja a otras posibles aplicaciones de la energía solar dentro del rango de la media concentración o temperatura que también resultan interesantes, como son los procesos industriales de calor y la climatización industrial. Sigue existiendo en el mercado una falta de colectores solares y equipos industriales que posean unas características adecuadas para este tipo de aplicaciones, lo que recomienda impulsar 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*, posee unas condiciones climáticas que hacen muy atractivas estas otras aplicaciones de los sistemas solares de media concentración. Este es el motivo por el cual en la PSA hemos mantenido durante el año 2005 una cierta actividad en este campo y hemos continuado trabajado también en el desarrollo de componentes para climatización industrial y alimentación de procesos industriales de calor. Por estos motivos hemos seguido 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 de la PSA rela-

cionada con los sistemas solares de media concentración ya que tradicionalmente había estado centrada exclusivamente en la generación de electricidad (plantas solares termoeléctricas). No obstante, la lógica limitación de los recursos disponibles ha hecho que el peso de las actividades relacionadas con la aplicación de la radiación solar a la climatización y procesos industriales de calor haya sido mucho menor que el de las actividades relacionadas con las plantas solares termoeléctricas.

Las actividades desarrolladas por la PSA en el año 2005 dentro del Grupo de Media Concentración han estado principalmente relacionadas con los proyectos: *INDITEP, DISTOR, FASOL, y PREDINCER*. A continuación se describen las actividades llevadas a cabo y los resultados más relevantes conseguidos en el año 2005 por la PSA en relación con los proyectos mencionados.

Proyecto INDITEP

El proyecto INDITEP comenzó oficialmente el día 1 de julio de 2002 y concluyó el 30 de junio de 2005. 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 podía 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 se planificó con cuatro objetivos básicos:

1) Diseño de detalle de una planta GDV pre-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 ha asegurado una perfecta continuidad y enlace entre sus actividades. La participación del CIEMAT en el proyecto INDITEP durante el año 2005 se ha centrado en las siguientes actividades:

- Participación en la ingeniería de detalle de la planta GDV pre-comercial de 5 MW_e
- 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.
- Estudiar el comportamiento en condiciones de trabajo reales de nuevas juntas rotativas para colectores solares que funcionen con GDV.
- Desarrollar nuevos recubrimientos selectivos capaces de soportar temperaturas de hasta 550ºC.

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 pre-comercial de 5 MW_e:

La Figura 38 muestra el esquema general simplificado de la planta GDV pre-comercial diseñada dentro del proyecto INDITEP. La potencia eléctrica bruta es de 5,47 MW, mientras que la potencia eléctrica neta del bloque de potencia es de 5,17 MW, con un rendi-

miento neto de 24,9%. El campo solar se compone de siete filas paralelas, compuesta cada una de ellas por diez colectores ET-II de 100 metros. Dentro de cada fila, la sección de evaporación y la de sobrecalentamiento se encuentran separadas por un separador agua/vapor. El área total de apertura del campo solar es de 38.385 m^2, con una potencia térmica pico de 25 MW (Zarza *et al.*, 2004)

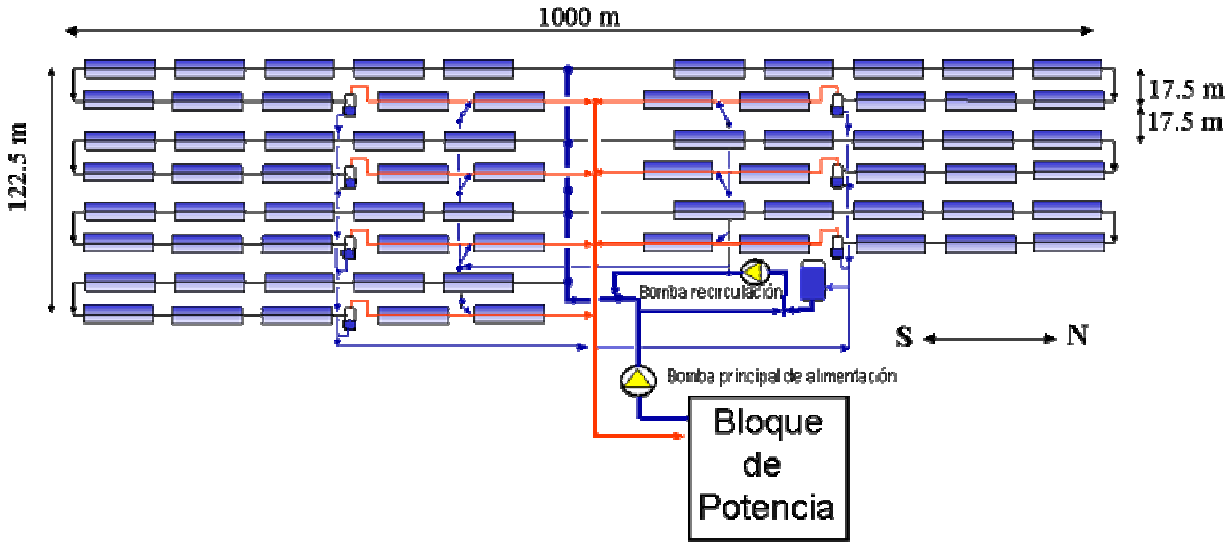


Figura 38. Esquema general de la planta GDV pre-comercial diseñada en el proyecto INDITEP.

La contribución principal de la PSA en el año 2005 a la ingeniería de detalle de la planta GDV de 5 MWe ha estado centrada en la elaboración de la lista y especificaciones técnicas de los instrumentos requeridos para el campo solar de dicha planta, así como en la elaboración de los procedimientos de operación y control para la planta, en colaboración con IBERINCO, DLR y ZSW (Eickhoff *et al.*, 2005). Dado que no se posee experiencia práctica con una planta similar, los procedimientos de operación elaborados contienen todas aquellas opciones que en principio parecen posibles desde el punto de vista de una planta GDV comercial, de acuerdo con lo aprendido en la planta experimental DISS de la PSA. Puesto que no resulta posible asegurar a priori cual de las posibles opciones de operación elaboradas dentro del proyecto INDITEP para el arranque, parada y control de la planta pre-comercial de 5MWe es la mejor de cara a grandes plantas GDV comerciales, las diversas opciones deberán ser evaluadas y optimizadas experimentalmente en la propia planta. Estas actividades ocuparán los primeros 18 meses de operación de la planta pre-comercial de 5 MWe una vez construida.

Los diferentes tipos de ensayos que se han definido para ser ejecutados durante dicho periodo de tiempo son los siguientes:

1. Ensayos para la comprobación de límites de alarma y funcionamiento de los enclavamientos programados ante situaciones de emergencia en el campo solar. Duración estimada: 1 mes, que se incluirá dentro de los que es la puesta en marcha general de la planta
2. Ensayos relacionados con los procedimientos de arranque y parada del campo solar, para estudiar las diversas opciones posibles y detectar sus ventajas e inconvenientes desde el punto de vista de grandes plantas GDV comerciales. Duración estimada: 4 meses (en períodos diferentes durante el año).
3. Ensayos relacionados con el control de parámetros de proceso durante la operación rutinaria. Duración estimada: 4,5 meses mínimo (ensayos durante períodos diferentes a lo largo del año)
4. Evaluación del rendimiento térmico/eléctrico del sistema bajo condiciones ambientales diferentes (verano/invierno). Optimización de parámetros de proceso en el campo

solar para aumentar el rendimiento final de la planta. Duración estimada: 4,5 meses mínimo (ensayos durante períodos diferentes a lo largo del año).

5. Evaluación de los componentes principales del campo solar y del bloque de potencia (separadores agua/vapor, colectores solares, turbogenerador, etc.). Duración estimada: 4 Meses.

Operación de la planta DISS de la PSA y evaluación de nuevos componentes:

Otra fracción importante de la participación de la PSA en el proyecto INDITEP durante el año 2005 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 2005, la planta DISS ha sido operada durante un total de 832 horas y tres prototipos de separadores agua/vapor se han ido colocando sucesivamente, dos de tipo ciclón en el mismo emplazamiento y un tercero, de láminas, en paralelo. Para el montaje de estos separadores se ha utilizado la interfase implementada por el DLR en el lazo DISS en el año 2004.

En total, en la planta DISS se han realizado 302 ensayos completos a lo largo del año 2005, distribuidos como se relaciona a continuación: (los ensayos que no resultaron válidos no se contabilizan):

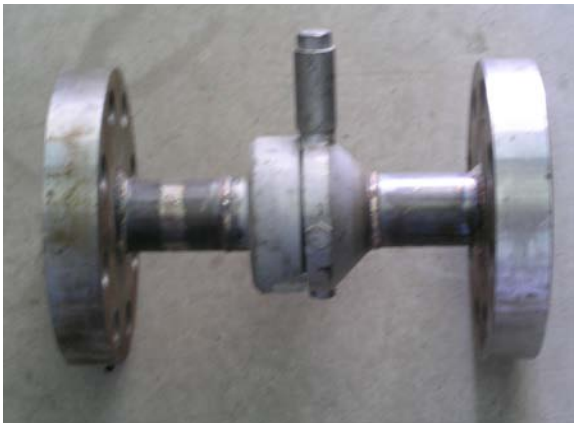
Ensayos de operación: 8
Ensayos de calibración, estáticos y dinámicos del primer separador: 57
Ensayos estáticos y dinámicos del segundo separador diseñado por Framatone: 87
Ensayos estáticos y dinámicos del separador diseñado por el DLR (láminas):.....79
Ensayos de control: 16
Ensayos de juntas rotativas a 30 y 70 bar: 55

Como queda de manifiesto en esta lista de ensayos, durante el año 2005 se realizaron 55 ensayos de nuevas juntas rotativas a presiones de 30 y 70 bar. Los ensayos llevados a cabo por la PSA con nuevas juntas rotativas tienen una doble finalidad:

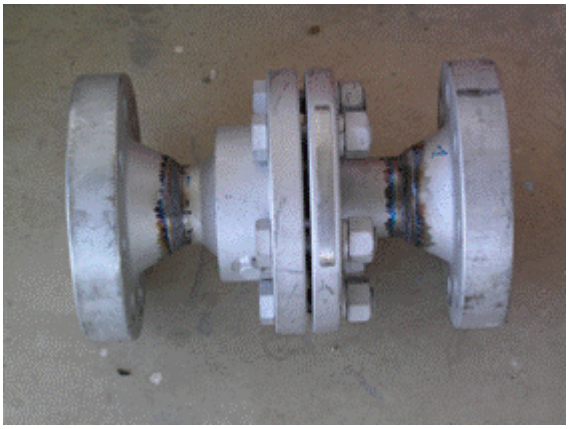
- Evaluar el comportamiento de nuevas juntas rotativas para 120bar/400ºC, de modo que existan varios modelos comerciales disponibles para plantas GDV que trabajen por debajo de estos parámetros de presión y temperatura en el campo solar. La posibilidad de contar con diversos fabricantes es importante para evitar una situación de monopolio que conduzca a precios excesivamente altos
- Ver si es posible disponer de juntas rotativas que permitan aumentar los parámetros del vapor producido por campos solares GDV hasta 100bar/550ºC, de modo que se puedan alcanzar mayores rendimientos en el bloque de potencia. En este sentido, el estudio llevado a cabo en el proyecto DISS puso de manifiesto que con un ciclo regenerativo Rankine trabajando con vapor a 100bar/550ºC se puede aumentar el rendimiento solar/eléctrico hasta el 23,2%. Pero para que esto sea posible es preciso disponer de juntas rotativas aptas para estos parámetros de presión y temperatura.

Puesto que las únicas juntas rotativas para campos solares GDV evaluadas experimentalmente hasta el momento en condiciones solares reales son las fabricadas por la firma Americana Advanced Thermal Systems (ATS) para 100bar/400ºC, durante el año 2005 se han ensayado en la PSA dos modelos de un fabricante diferente: la compañía HYSPAN. Los dos modelos ensayados son para 120bar/400ºC y 100bar/550ºC. Los ensayos llevados a cabo en el año 2005 han sido realizados con vapor producido por el campo solar de la planta DISS y han tenido una presión máxima de 70bar. En la figura adjunta se muestran los dos modelos de junta rotativas que se han ensayado durante 2005. Se observan las bridas que fue necesario colocar en las juntas rotativas para poderlas instalar en el banco de ensayos que tenemos disponible en la PSA para este tipo de experimentos. Está previsto que una vez completados los ensayos a 30 y 70 bar, se continúen los ensayos a presiones más altas y temperaturas de hasta 550ºC en la central eléctrica *Litoral de Almería* que

posee ENDESA en la localidad almeriense de Carboneras. Debido a diversas razones técnicas, no ha sido posible llevar a cabo en el año 2005 todos los ensayos planificados, por lo que continuaremos con los ensayos en el año 2006.



Junta rotativa HYSPAN para 120bar/400ºC



Junta rotativa HYSPAN para 100bar/550ºC

Figura 39. Vista de los dos diseños de juntas rotativas fabricadas por HYSPAN para plantas GDV.

También se realizaron algunas mejoras en la planta DISS durante 2005. Un ejemplo de dichas mejoras ha sido la colocación de un tubo absorbente nuevo y el cambio de posición de tres más. También 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. Una nueva versión de dicho control fue instalada en los dos colectores ET-II que se añadieron a la planta DISS al comienzo del proyecto INDITEP y se encuentran en fase de observación y evaluación.

Tal y como se adelantó en la Memoria del año 2004, la PSA ha trabajado durante el año 2005 en la integración de nuestro control local de seguimiento solar en una arquitectura global de planta adecuada a la situación tecnológica actual. En esta dirección se han dado algunos pasos, teniendo reuniones con empresas del sector, pero desde el lado industrial no se ha mostrado un serio interés en este tema, por lo que es aún una cuestión abierta.

Desarrollo de nuevos recubrimientos mediante la técnica Solgel:

En el año 2005, y dentro del marco de trabajo del proyecto INDITEP, la PSA ha seguido trabajando en el desarrollo de recubrimientos antirreflectantes para vidrio y absorbentes selectivos de alta temperatura. A continuación se resume la actividad llevada a cabo en estos dos campos.

a) Recubrimientos antirreflectantes sobre vidrio

Durante los últimos años, se han obtenido recubrimientos antirreflectantes con muy buenas propiedades ópticas (τ_{solar}>0,97) y mecánicas, para las cubiertas de vidrio de los tubos absorbedores. Durante el año 2005, se ha estudiado la durabilidad ambiental de dichos recubrimientos en una cámara climática QUV, que alterna ciclos de condensación, temperatura y radicación UV.

Se ha comprobado experimentalmente que existe una fuerte influencia del carácter hidrofóbico de la película en la durabilidad ambiental. Para aumentar dicha propiedad del material, se han añadido diferentes concentraciones de un Metiltrietoxisilano (MTES), cuyo radical metilo, no hidrolizable, confiere una fuerte hidrofobicidad a la película antirreflectante, repeliendo completamente el agua. En la figura siguiente se muestran los espectros de transmitancia en el espectro solar de los materiales preparados.

La incorporación del MTES en la solución precursora de la sílice polimérica con el Tritón produce una ligera disminución de la transmitancia solar, siendo más acusada cuanto mayor sea el contenido de MTES.

En la figura siguiente se observa el comportamiento de los diferentes materiales en la cámara climática. Las capas antirreflectantes preparadas sin MTES presentan una disminución en su transmitancia de casi un 5%, mientras que en la que se incorporó un 10% de MTES, la caída es inferior al 1,5% a las 2000 horas ensayo, lo que corresponden a unos 5 años de exposición a intemperie. Durante el próximo año se van a probar diferentes materiales para aumentar la hidrofobicidad de la película antirreflectante y mejorar la durabilidad ambiental.

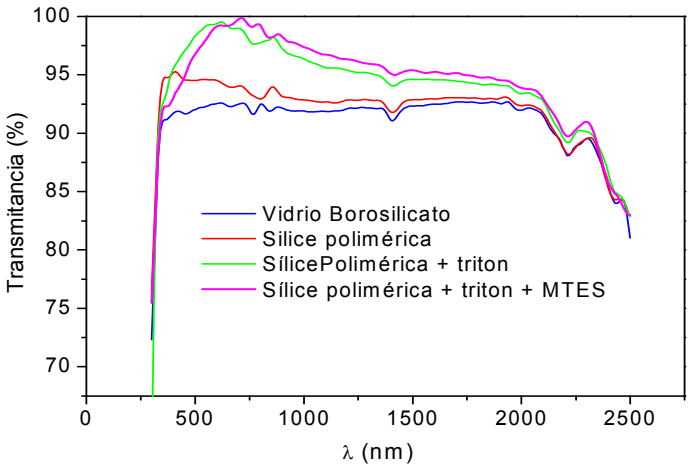


Figura 40. Transmitancia solar de los diferentes materiales antirreflectantes preparados con vidrio borosilicato.

b) Absorbentes selectivos estables a alta temperatura.

Durante el año 2005 hemos centrado el esfuerzo en obtener un recubrimiento selectivo para alta temperatura (550ºC-600ºC) y estable en aire, sobre tubos de acero inoxidable. A altas temperaturas, el principal mecanismo de fallo de los absorbentes selectivos es la oxidación térmica del reflector infrarrojo y la difusión de especies químicas entre las diferentes capas del conjunto del absorbente.

En 2005, se ha utilizado una fina capa de platino como reflector IR para evitar su oxidación en aire y se emplea una barrera antidifusora, formada por un cermet de alúmina/platino, para evitar la difusión del platino en el sustrato de acero. Se ha optimizado el espesor y la densidad de la barrera antidifusora, de manera que dicho reflector IR sea estable en aire a temperaturas de 550ºC.

Como capas absorbentes se han empleado dos materiales diferentes: una bicapa formada por dos cermets de alúmina/platino, con diferente contenido metálico y una espinela tipo $Mn_xCo_yCu_zO_4$.

Las propiedades ópticas del absorbente tipo cermet completo desarrollado por la PSA, con la capa antirreflectante de sílice, son de α=0.95 y ε_{500C}=0.14. Las capas individuales se han sinterizado a 600ºC sin que se haya producido ninguna degradación de las propiedades ópticas. La durabilidad térmica de este absorbente se está estudiando a 550ºC en aire, con resultados muy prometedores.

Con el fin de reducir el coste del absorbente y reducir el número de capas del absorbente

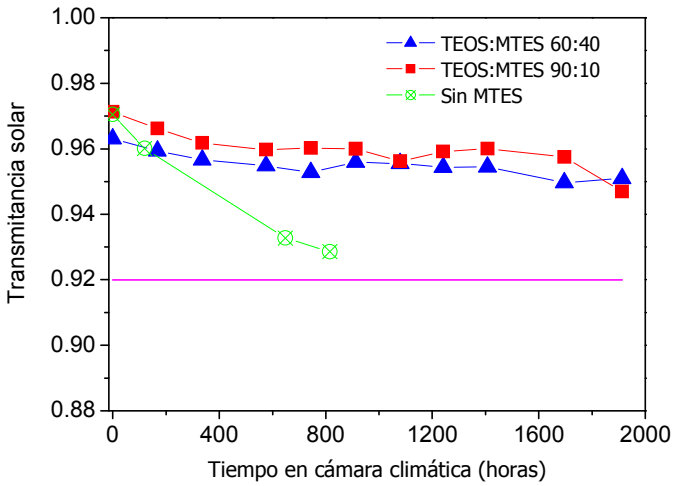


Figura 41. Variación de la transmitancia solar de los diferentes recubrimientos AR en cámara climática

completo, se está estudiando la posibilidad de sustituir el cermet de alúmina/platino por una espinela. Las espinelas son unos materiales que presentan una elevada estabilidad térmica, por lo que son unos buenos candidatos para aplicaciones de alta temperatura. Los resultados iniciales que hemos conseguido son buenos y se han alcanzado valores de absorptancia solar de hasta 0,97 con emisividades térmicas superiores a los producidos con la capa absorbente tipo cermet. En la figura siguiente, se puede apreciar que el borde de absorción de las espinelas, se encuentra situado a longitudes de onda muy superiores al del cermet, lo que implica su mayor emisividad.

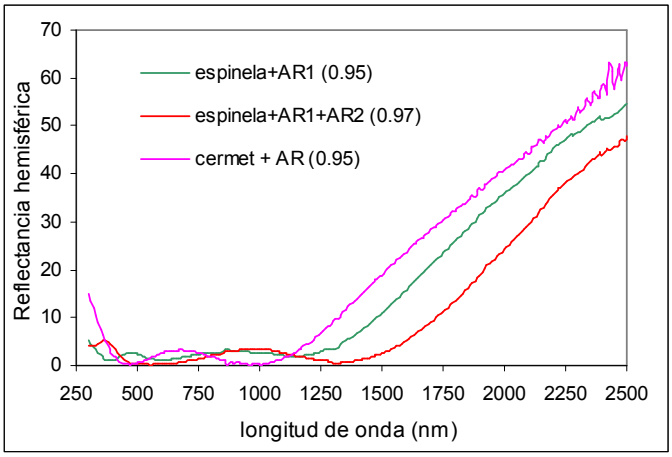


Figura 42. Reflectancia hemisférica de tres absorbentes selectivos de alta temperature desarrollados en el CIEMAT

Las emisividades a 500ºC, de los absorbentes con la espinela y una y dos capas antirreflectantes son de 0,18 y 0,26 respectivamente. Durante el próximo año, se van a optimizar los espesores de la capa de espinela y de la capa antirreflectante, con el fin de aumentar la absorptancia solar y reducir la emisividad térmica.

Proyecto DISTOR

El proyecto DISTOR es un proyecto europeo de I+D que cuenta con el apoyo de la Comisión Europea (contrato Nº. SES6-CT-2004-503526). Comenzó oficialmente en febrero de 2004, con una duración de 45 meses. El proyecto DISTOR está coordinado por el DLR alemán 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).

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. Puesto que la mayor parte de la energía térmica que posee el vapor se libera al condensar, y este es un proceso que tiene lugar a temperatura constante, el sistema de almacenamiento adecuado para este tipo de plantas solares debe basarse en un medio que sea capaz de absorber calor a temperatura constante. Esto conduce a la necesidad de 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. Para conseguirlo, se están estudiando mezclas de nitratos de sodio y potasio mezclados con otro material que proporcione al conjunto una aceptable conductividad térmica para favorecer los procesos de carga y descarga del sistema de almacenamiento. El objetivo económico del proyecto DISTOR es alcanzar un coste específico de 20 € por kWh de capacidad del sistema de almacenamiento de este tipo, ya que esta cifra haría rentable su implementación comercial.

Los sistemas de almacenamiento térmico actualmente disponibles para el rango de temperaturas 150ºC – 400ºC se basan en materiales que aumentan su temperatura (calor sensible) y, por consiguiente, no son válidos para los sistemas solares con generación directa de vapor. De aquí nace precisamente la necesidad de desarrollar un sistema de almacenamiento específico para campos solares con generación directa de vapor, ya

que sin él no es posible pensar en una generación continua de electricidad mediante sistemas solares de este tipo.

La participación de la PSA en el proyecto DISTOR se centra en dos campos concretos:

1) la elaboración de las especificaciones técnicas que debe satisfacer el sistema de almacenamiento que se desea desarrollar, y

2) el montaje en la planta experimental DISS de la PSA y la evaluación en condiciones solares reales de un primer prototipo de 200 kWh de capacidad del nuevo sistema de almacenamiento.

Puesto que las especificaciones técnicas ya fueron elaboradas en el año 2004, en el año 2005 nuestra participación en el proyecto DISTOR ha estado centrada en preparar el camino para la instalación del prototipo de almacenamiento en la planta experimental DISS a finales del año 2006. En concreto, se ha revisado la interfase que se propuso al comienzo del proyecto para conectar el prototipo a la planta DISS, que es hoy en día la única planta experimental que funciona con generación directa de vapor en los colectores solares. Esta revisión de la interfase se consideró necesaria porque la información obtenida como consecuencia de las actividades llevadas a cabo por la PSA en otro proyecto europeo de I+D (el proyecto INDITEP) pusieron de manifiesto que la interfase propuesta inicialmente podía no ser la adecuada. La Figura 43 muestra la interfase propuesta inicialmente.

En el esquema mostrado en la Figura 43, la bomba P-23 es un elemento clave, ya que tendrá que operar con bajo caudal de agua a alta presión (80 bar aprox.) y una temperatura próxima a saturación, por lo que el NPSH disponible sería muy bajo. Una bomba de estas características es infrecuente en aplicaciones comerciales, por lo que tendría un coste tan alto (> 75 000 €) que la convierte en un elemento prohibitivo. Además, la eficiencia de esta bomba sería probablemente muy baja (<25%). Este hecho hizo pensar en la necesidad de diseñar una interfase diferente a la inicialmente propuesta.

Tras considerar las diversas opciones posibles, se llegó a la conclusión que la interfase mostrada en la Figura 44 parecía la más adecuada, ya que las dos bombas de agua que

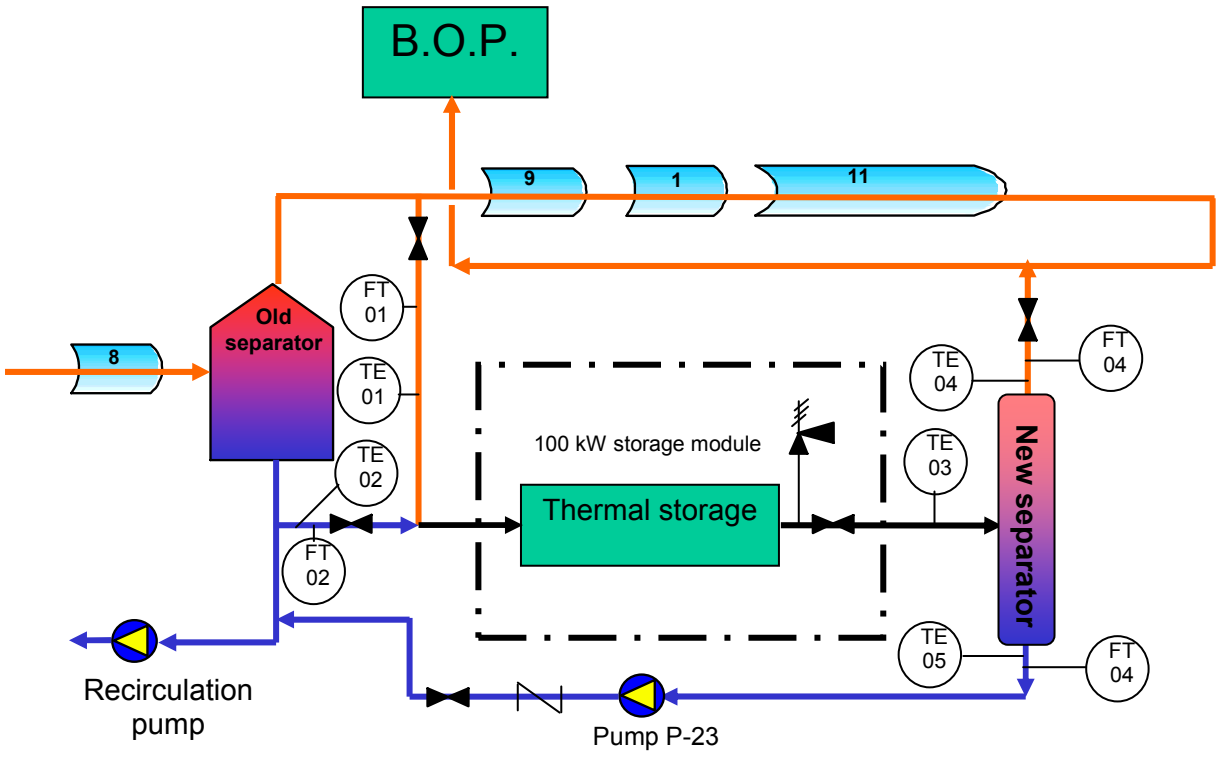


Figura 43. Diagrama esquemático de la interfase propuesta inicialmente para conectar el modulo de almacenamiento a la planta experimental DISS de la PSA.

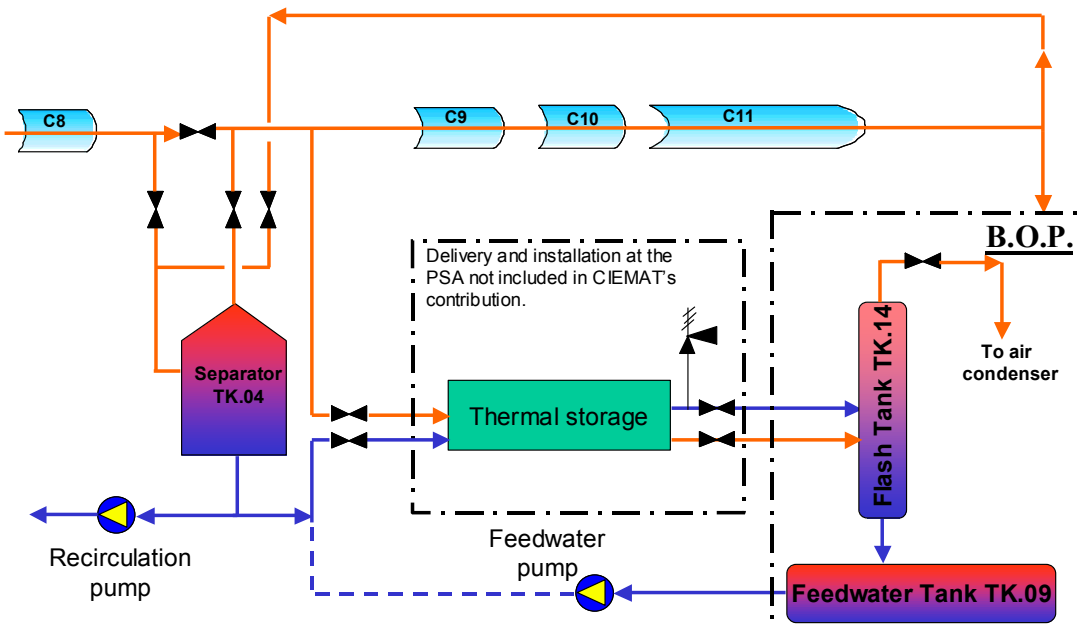


Figura 44. Diagrama esquemático de la nueva interfase propuesta para conectar el modulo de almacenamiento a la planta experimental DISS de la PSA.

requiere existen ya en la planta DISS. Esto reduce considerablemente el coste con respecto a la interfase inicialmente propuesta. Por otro lado, el uso del actual tanque de flashing existente en la planta DISS permite la compensación de diferentes presiones mediante placas de orificio que resultan bastante económicas.

En el año 2005, la PSA ha trabajado también en el diseño conceptual del sistema de adquisición de datos y control que será necesario instalar para monitorizar los ensayos del módulo de almacenamiento. Aunque al comienzo del proyecto se pensó en implementar los nuevos canales de medida en el sistema de adquisición de datos y regulación existente en la planta DISS, tal opción se ha desechado con el fin de evitar las posibles perturbaciones que los nuevos equipos podrían causar en la operación de la planta DISS. Por este motivo se ha decidido instalar un sistema de adquisición de datos y control específico para el moódulo de almacenamiento, aunque podrá tener comunicación directa e inmediata con el de la planta DISS.

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 300ºC. La actividad llevada a cabo dentro de este proyecto ha estado estrechamente relacionada con nuestra participación en la Tarea 33/IV (Calor solar para procesos industriales) de la Agencia Internacional de la Energía (www.iea-ship.org), en la que estamos colaborando desde su puesta en marcha a finales de 2003.

Sabiendo que uno de los principales requerimientos para la necesaria extensión de la energía solar térmica en el ámbito de los procesos industriales en España es la información, el Grupo de Media Concentración organizó, en el primer trimestre de 2005, una jornada de divulgación en el marco de la 9ª edición de GENERA (Feria Internacional de Energía y Medioambiente), celebrada en Madrid. A la jornada asistieron unas 70 personas, entre las que se encontraban industriales interesados en la eficiencia y ahorro energético así como industriales de la rama solar térmica y miembros de centros de I+D en energía solar, tanto nacionales como extranjeros. Así mismo, se han escrito sendos artículos sobre el potencial de la energía solar térmica y sus claves de aplicación a la industria;

Figura 45. Primera página del tríptico de la jornada de promoción y divulgación de aplicaciones en la industria de la energía solar térmica

publicado uno en una revista de ingeniería de amplia difusión y presentado otro en el Congreso Nacional sobre Energías Renovables, CONEERR 2005 (Rojas, Cañadas, 2005).

A nivel técnico-científico, nuestra colaboración con la Tarea 33/IV se encuentra principalmente enmarcada en las subtareas C, 'Desarrollo de nuevos colectores y componentes', y D, 'Integración en el sistema y plantas de demostración'.

Con relación a la subtarea C, hemos continuado las actividades relativas al proyecto para el diseño y desarrollo de un colector integrable en procesos industriales y conocido como proyecto FASOL. La experiencia adquirida durante el 2004 definió el reflector cilindro parabólico como una de las especificaciones tecnológicas aún sin resolver de forma óptima, tanto respecto al conformado paraboloide de su estructura soporte como respecto a la resistencia a condiciones ambientales de sus materiales reflectantes.

A mediados del año 2005, la empresa almeriense Castaño Bolea e Hijos montó un nuevo concentrador cilindro-parabólico de características generales similares a las de los dos prototipos anteriores (material composite armado sobre una estructura metálica, con 2.6 m de ancho de apertura) pero con una nueva metodología propia para el tratamiento y curado del material composite. La calidad óptica de la parábola de este tercer prototipo fue evaluada en la PSA por fotogrametría y, aunque los resultados fueron mejores que los obtenidos con los dos prototipos anteriores, se corroboró que para colectores cilindro-parabólicos es necesaria una alta especialización en el manejo y tratamiento de composites si de desea lograr una adecuada calidad óptica del concentrador.

Confiando en la flexibilidad que tienen los plásticos en general, se está explorando la posibilidad de utilizarlos como elemento soporte de la superficie reflectante, en vez del vidrio fino usado para este fin dentro del proyecto FASOL. Se han ensayado dos *espejos* con elemento soporte diferentes: uno de metacrilato y otro de poliestireno. En ambos casos la película reflectante era de Aluminio. Durante más de ocho meses han estado expuestos a condiciones ambientales en la PSA. Su reflectividad espectral se ha medido periódicamente y se han ensayado diferentes tratamientos de limpieza. Mientras que para el espejo de metacrilato se ha encontrado una metodología de limpieza simple que le

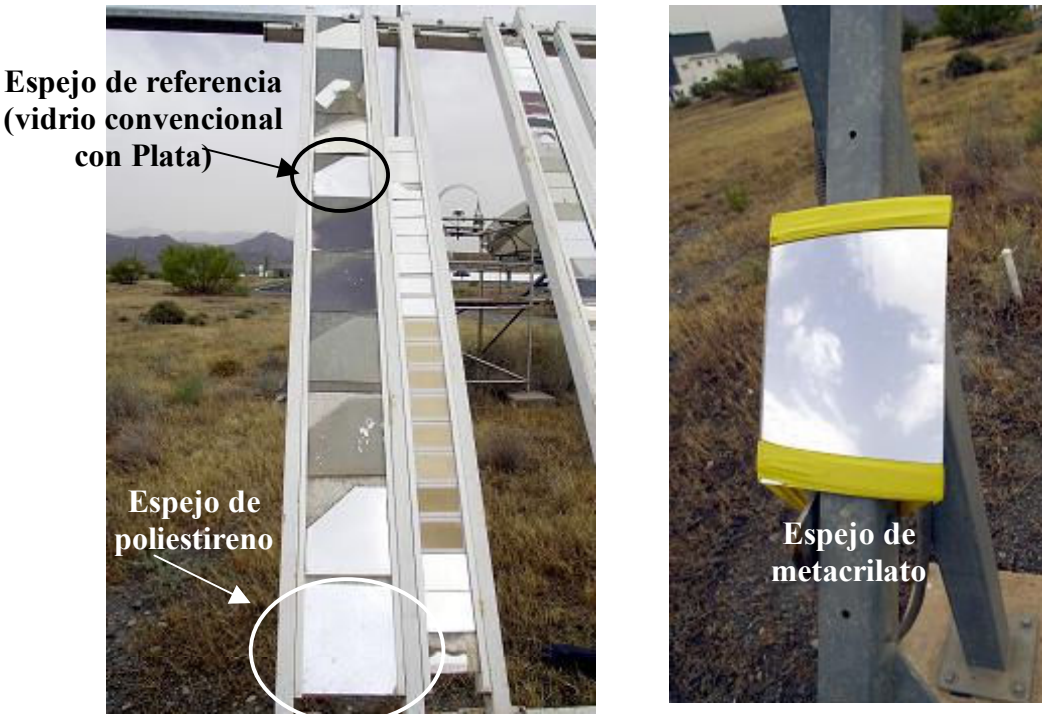


Figura 46. Estructura de ensayo de materiales reflectantes a intemperie (PSA)

devuelve sus valores nominales de reflectividad, la degradación que sufre el espejo de poliestireno, ya en los dos primeros meses de exposición, le hace inadecuado para su aplicación en colectores cilindro-parabólicos.

A lo largo del año 2005 el concepto del nuevo colector optimizado para el suministro de calor en procesos industriales ha evolucionado, en primer lugar, hacia un diseño más pequeño (no más de 1.50m de apertura) para tener la posibilidad de instalación en azoteas y terrazas de edificaciones y, en segundo lugar, hacia diseños menos convencionales como los que tienen una cubierta de vidrio en el plano de apertura (protegiendo el reflector parabólico de la intemperie) para tener mayor número de opciones en cuanto a materiales a un precio razonable. Para estudiar la influencia de estos diseños con diferentes combinaciones de materiales, se ha elaborado un modelo matemático capaz de reproducir el rendimiento óptico y geométrico de cada uno de los diseños considerados. Este modelo de eficiencia optico-geométrica, junto al modelo de eficiencia térmica ya desarrollado con anterioridad, permitirá analizar qué combinación de materiales y bajo qué diseño, permite conseguir la mejor relación eficiencia-coste de colector.

Proyecto PREDINCER

El proyecto PREDINCER es un proyecto coordinado de I+D que ha contado con la financiación del Ministerio de Educación y Ciencia dentro del programa CICYT (ID proyecto: DPI2002-04375-C03). El proyecto comenzó en 2002 y finalizó en Noviembre de 2005. En el marco del proyecto, el CIEMAT ha colaborado con el Grupo de Investigación de Automática, Electrónica y Robótica de la Universidad de Almería y del Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla (coordinador del proyecto), para estudiar diferentes técnicas de modelado de procesos con incertidumbres acotadas, y desarrollar y evaluar algoritmos de control predictivo a partir de dichos modelos, que sean aplicables a campos solares con colectores cilindro parabólicos.

Los objetivos contemplados en el proyecto y que se han abordado durante la realización del mismo han sido:

- desarrollo de técnicas de modelado e identificación de modelos con acotaciones para incertidumbres,

- desarrollo de formulaciones para incluir la incertidumbre en la etapa de diseño de controladores predictivos,
- análisis de robustez de las formulaciones y su modificación para garantizar la robustez,
- análisis de aspectos computacionales y de implantación de los algoritmos,
- identificación de las plantas de ensayo de referencia, y
- validación de controladores desarrollados en la planta DISS.

En relación al apartado de modelado de plantas existentes en la PSA con colectores solares cilindro parabólicos, conocidos mediante las siglas CCP, (plantas DISS y Acurex), se han analizado: estructuras de modelos no-lineales basados en primeros principios (balances de masa, energía y momento), utilizando la herramienta de software Dymola y el lenguaje orientado a objetos Modelica (Figura 47); modelos no-lineales simplificados, también basados en primeros principios con simplificaciones tipo bilineal, y que nos ha permitido desarrollar controladores para el rechazo de perturbaciones con la técnica *feedback linearization* (Figura 48); y modelos lineales en torno a punto de trabajo obtenidos tanto con la simplificación de modelos basados en primeros principios, donde la acotación de incertidumbres en los parámetros (magnitudes físicas) se ha estimado teniendo en cuenta los rangos de operación del sistema, así como utilizando técnicas de identificación paramétrica a partir de datos de E/S, donde se han obtenido 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 basado en Modelo (MPC robusto) (Figura 49). Para diseñar el controlador MPC teniendo en cuenta la incertidumbre o discrepancias entre el modelo y la planta, se considera 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, *u*, se calcula

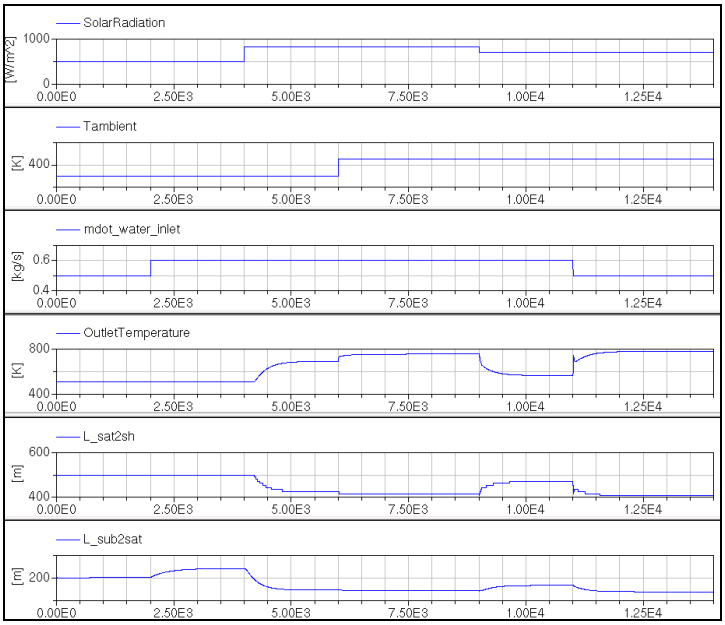


Figura 47. Resultados obtenidos con la herramienta de simulación del lazo DISS desarrollada con Modelica/Dymola, donde se puede ver la evolución de la temperatura del vapor de salida y la longitud de la interfaz vapor saturado-sobrecalentado cuando se producen escalones en la radiación solar, temperatura ambiente y caudal agua alimentación.

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.

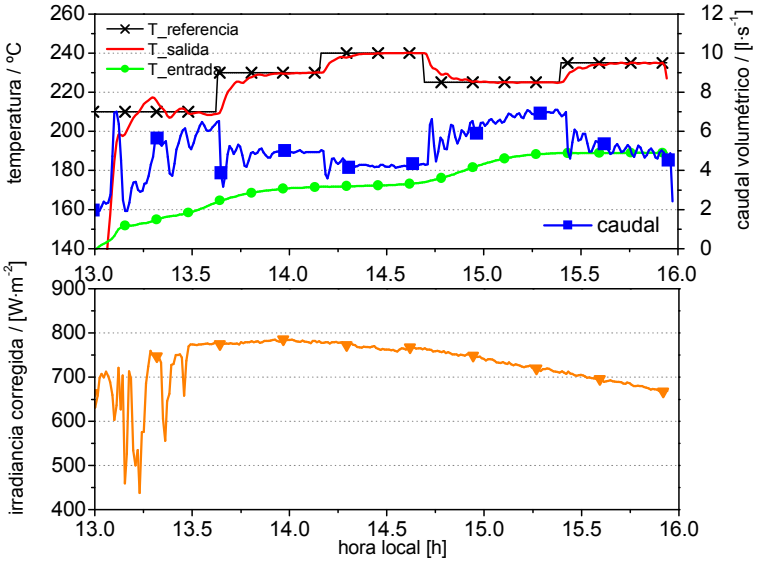


Figura 48. Resultados de planta solar Acurex. Aplicación de control tipo *feedback linearization* diseñado a partir de modelo no-lineal simplificado (bilineal). Perturbaciones en la radiación y en la temperatura del fluido de entrada.

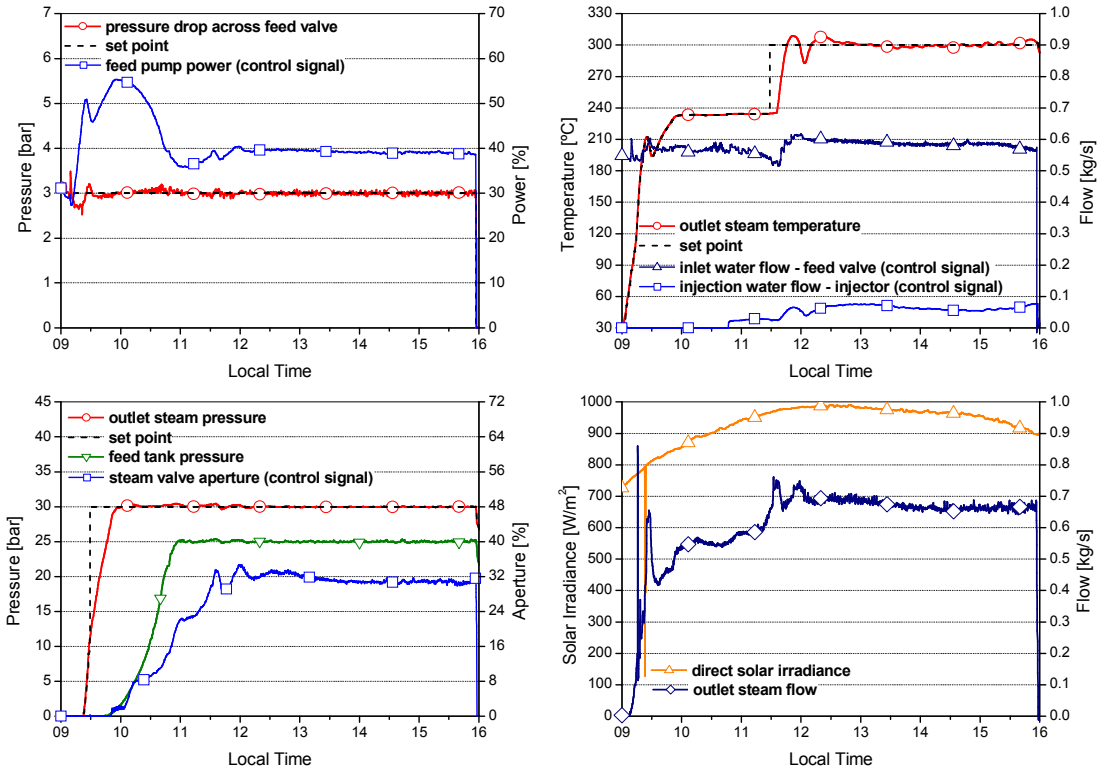


Figura 49. Resultados de la planta DISS: aplicación de esquemas de control diseñados a partir de modelos lineales en torno a punto de trabajo. Respuesta del sistema con control de presión y temperatura del vapor de salida con radiación solar directa estable.

Con la aplicación de las técnicas de control estudiadas, se mejora el comportamiento de este tipo de sistemas solares frente a perturbaciones, y gracias también al uso de generadores automáticos de consignas, se incrementa el grado de automatización de la planta, previendo aumentar el número de horas de operación y por tanto la eficiencia final de estos sistemas solares, estimándose un apoyo al incremento de producción superior al 2-3%.

Con relación a la tarea relacionada con el estudio de aspectos computacionales, hay que destacar que se ha trabajado en la implementación de un servidor de datos OPC (*OLE for Process Control*) en la planta DISS de la PSA. El uso de protocolo OPC nos permite compatibilizar diferentes herramientas informáticas, permitiéndonos comunicar en tiempo real la aplicación de control y adquisición de datos de la planta DISS (Symphony/INFI90 de Elsag-Bailey/ABB) con los entornos de modelado y simulación que utilizamos para el desarrollo e implementación de modelos y controladores (Modelica/Dymola o Matlab/Simulink).

Como resumen de los resultados del proyecto, cabe destacar que se han presentado durante todo el período (2002-2005) 7 artículos científicos en revistas y 17 comunicaciones en congresos internacionales y nacionales.

Otras actividades realizadas en el 2005

Adicionalmente al trabajo llevado a cabo por la PSA dentro del marco de los proyectos INDITEP, FASOL, DISTOR y PREDINCER, el Grupo de Media Concentración ha desarrollado otras actividades durante el año 2005. Entre estas actividades cabe mencionar los tests llevados a cabo en el lazo de ensayos HTF de la PSA, los cuales han estado principalmente dirigidos a la colaboración con el DLR para proyectos alemanes financiados por el BMU alemán, como es el caso de los proyectos WANDA y OPAL. Así, en el año 2005 con el lazo de ensayos HTF de la PSA se han hecho 36 ensayos de carga y 33 de descarga del almacenamiento térmico con hormigón instalado en la PSA por el DLR dentro del marco del proyecto WANDA. Se ha operado el sistema 12 días para ajustar y probar el control automático de temperatura de entrada al almacenamiento térmico mediante las válvulas automáticas instaladas en las tuberías de aceite.

Otros tipos de ensayos realizados en el lazo HTF han sido el ajuste de off-sets en el control local de seguimiento solar del colector Eurotrough montado en dicho lazo, ensayos de pérdidas térmicas y ensayos de medida de temperatura en los tubos absorbedores mediante cámara de infrarrojos.

También se han hecho 19 tests de rendimiento térmico del colector Eurotrough, 8 tests de fotogrametría y 6 de medida de flujo incidente sobre el tubo absorbedor del colector mediante sensores directos (proyecto alemán "Parascan II").

En el año 2005, el lazo de ensayos HTF se ha utilizado también para evaluar nuevos componentes desarrollados por la industria española. En total, este lazo de ensayos ha sido operado durante 763 horas en el año 2005.

También cabe mencionar durante el año 2005 la participación de la PSA en el proyecto ANDASOL. Debido al retraso experimentado en el comienzo de los trabajos de montaje de la planta ANDASOL-I, la participación de la PSA en este proyecto durante 2005 ha sido menor de lo previsto y ha estado limitada a la prestación de asesoramiento técnico y científico a las empresas responsables de la ingeniería de detalle y montaje de la planta. Este asesoramiento ha estado limitado a temas relacionados con el campo solar.

En el campo de la Generación Directa de Vapor se han realizado gestiones encaminadas a construir la planta pre-comercial de 5 MW_e diseñada dentro del proyecto INDITEP. Para ello, se ha contactado con posibles socios que estén interesados en llevar a cabo este proyecto, el cual constituye un paso ineludible si se quiere usar comercialmente la tecnología GDV en grandes plantas termo-eléctricas. La construcción de grandes plantas GDV comerciales resulta imposible si no se ha verificado antes a una escala pre-

comercial todos los aspectos relacionados con el control y la operación del campo solar GDV. Los resultados y experiencias adquiridas en la PSA gracias a la planta experimental DISS constituyen una base alentadora que permite ser optimistas en cuanto a la viabilidad del proceso GDV para grandes plantas comerciales, pero no permite eliminar el recelo que puede suscitar en los posibles inversores la falta de experiencias previas con una planta de tamaño suficiente como para garantizar el adecuado funcionamiento de grandes plantas GDV. La planta GDV de 5 MW_e diseñada dentro del marco del proyecto europeo INDITEP persigue este objetivo. El principal problema con el que se ha tropezado en 2005 el intento de llevar a cabo la construcción de esta planta GDV de 5 MW_e es la falta de instrumentos públicos de apoyo adecuados para proyectos de estas características, ya que los Programas nacionales o autonómicos de fomento para proyectos de demostración a los que ha sido posible concurrir no estaban pensados para proyectos como este.

Por otro lado, y al igual que ocurrió durante el año 2004, en el año 2005 hemos continuado dando asesoramiento e información al elevado número de empresas que han acudido a la PSA interesadas por la tecnología de las plantas solares termoeléctricas con colectores cilindro-parabólicos. El marco legal definido en España para las plantas solares termoeléctricas 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 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 durante 2005 en busca de asesoramiento y colaboración. Desgraciadamente, la lógica limitación de recursos humanos disponibles dentro del Grupo de Media Concentración de la PSA y los compromisos ya adquiridos en proyectos que se encuentran en marcha ha hecho imposible poder atender plenamente todas las peticiones de colaboración que hemos recibido en el 2005, pero se ha hecho un gran esfuerzo por facilitar la máxima información y asesoramiento a las empresas que nos lo han pedido.

Grupo de Alta Concentración

Los dos hechos que cabría resaltar en el año 2005 por su relevancia en la propia actividad y de avance en los objetivos generales en el Grupo de Energía Solar Térmica de Alta Concentración, ESTAC, han sido ambos consecuencia del nuevo marco de incentivos a la producción solar termoeléctrica (RD 436/2004): 1º) El gran avance en la construcción de la Planta PS-10, cuya obra civil se encontraba casi finalizada al acabar 2005, y 2º) la reactivación del proyecto Solar TRES, donde el Ciemat ha asumido la validación del desarrollo de receptor de sales, con tecnología compartida Sener-Ciemat.

Los sistemas de torre o de tecnología de receptor central, TRC, consisten en un gran campo de helióstatos o espejos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Al tratarse de un foco fijo, se considera una óptica fuera del eje, por lo que su análisis y optimización óptico-energética son complejos. Los órdenes de concentración solar son de 200 a 1000 y las potencias unitarias de 10 a 50 MW, usualmente 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 300ºC y los 1000ºC. 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 200 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 saturado 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, así como para probar diversos conceptos de receptor diferenciados por el tipo de fluido calo-portador utilizado, tales como sales fundidas, vapor saturado y receptor volumétrico refrigerado por aire. 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 conexión a red bajo condiciones de mercado.

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 2.500-9.000€/kW (dependiendo del tamaño del almacenamiento) y costes de la electricidad producida en el entorno de 0,16-0,20€/kWh bajo determinadas condiciones de contorno favorables. Una reducción del coste de la tecnología resulta, por lo tanto, esencial para la extensión del numero de aplicaciones comerciales y potenciales emplazamientos. Consciente de este problema, la PSA, además de participar en los primeros proyectos de demostración comercial de TRC, 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.

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 sistematizacón 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 incentivadas para la solar termoeléctrica que suponen en la práctica el reconocimiento de un precio de venta para la electricidad generada con estas plantas solares 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.

Además, en Agosto de 2005 se publicó el Plan de Fomento de las Energías Renovables 2005-2010, con objeto de revitalizar el lento desarrollo del plan inicial 2000-2010, y que, para las tecnologías solares termoeléctricas, a la vista del enorme movimiento en solicitud

de licitaciones de plantas, prevé incrementar la potencia, acogida al régimen del R.D. 436/2004, desde los 200 MW a los 500 MW de potencia instalada para 2010.

Como consecuencia tangible de este marco regulador, en tecnologías de receptor central, se han reactivado los dos proyectos de planta arriba mencionados, la PS10, de 11 MWe liderada por la empresa SOLUCAR y la planta SOLAR TRES, de 17 MWe promovido por la empresa SENER. Ambas plantas tendrán una influencia decisiva en los próximos años para demostrar la madurez comercial de estos sistemas.

La planta PS-10, promovida por la empresa SOLUCAR, se encontraba casi finalizada en su obra civil a finales de 2005, constituye el hecho más relevante para el desarrollo de la tecnología de receptor central a nivel mundial y se prevé su conexión a red para el otoño de 2006. Aunque la actividad del Grupo de Alta Concentración, durante 2005, en PS10 ha sido reducida, las implicaciones de la materialización de PS-10 ha modificado las prioridades en cuanto a desarrollos tecnológicos. Así la tecnología de receptor volumétrico ha pasado a una prioridad menor ya que no ha sido adoptada en el receptor de PS10 y se ha reactivado el interés por la optimización de los receptores de tubos.

Por otro lado, durante 2005 se consiguió el relanzamiento del Proyecto Solar Tres de demostración de una planta comercial de receptor central (17 MWe) utilizando sales fundidas y acuerdo de desarrollo de receptor de Sales entre SENER y CIEMAT. Tras una fase de letargo del proyecto, por avatares externos al Ciemat, Sener y Ciemat decidieron asumir la ausencia de oferta tecnológica exterior para abordar el desarrollo propio del receptor e iniciar una validación del mismo mediante la construcción, ensayo y evaluación de un prototipo de 4 MW térmicos. La tecnología de receptor resultante será copropiedad Sener-Ciemat y, una vez validada, durante 2006, se utilizará en la planta Solar Tres.

Este momento de despliegue tecnológico, ha conciliado la participación del Grupo de Alta Concentración Solar de la PSA, GACS, en ambos proyectos de demostración (PS10 y Solar Tres), con el desarrollo de otras actividades de I+D entorno a proyectos específicos, financiados casi todos ellos en convocatorias públicas de I+D, con la excepción del desarrollo de un panel receptor de sales cuya financiación es compartida entre Sener y Ciemat. De modo que podemos distinguir, en el GACS, tres tipos de actividades de I+D:

A) Participación en proyectos de demostración (Tales como PS-10 y Solar Tres);
B) Desarrollo Tecnológico de Componentes y Sistemas
C) Mejora de las capacidades experimentales y procedimientos de calidad

De modo específico el Grupo de Alta Concentración ha participado, en 2005, en los siguientes proyectos:

A) Participación en proyectos de demostración:

1) 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 (participación de Ciemat extendida hasta la puesta en funcionamiento de la planta).

2) 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). Investigador principal Ciemat: M. Sánchez.

3) "Desarrollo del receptor para una central solar termoeléctrica de sales fundidas". Acuerdo de Colaboración entre Ciemat y SENER Ingeniería y Sistemas S. A. para desarrollar las tecnologías de diseño, definición de estrategias de operación y control para garantizar y alargar la vida de un receptor de sales fundidas, que será aplicado en centrales solares termoeléctricas.(Duración: 17 Nov. 2005 / 31 Dic 2007). Investigador principal Ciemat: Félix M. Téllez.

B) Desarrollo Tecnológico de Componentes y Sistemas:

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: "HICONPV: High Concentration PV Power System". Ref. 502626. Convocatoria: Energy1- Sustainable Energy Systems – 6º PM.Entidad financiadora: CE DG Investigación). Entidades participantes: Solúcar Energía (Coordinator), DLR, Fraunhofer ISE, PSE, CIEMAT, RWE, Ben Gurion University, EDF, University of Malta. Investigador principal CIEMAT: Jesús Fernández reche (Periodo: Diciembre 2003/Diciembre 2006).

3) Proyecto AVANSOL: "Absorbedores volumétricos avanzados para tecnologías de alta concentración solar". Su objetivo es dar respuesta a dos incertidumbres principales en las tecnologías solares termoeléctricas basadas en receptor de aire: 1) Durabilidad del absorbedor volumétrico en condiciones reales de operación y 2) Elección óptima del material y la geometría porosa del absorbedor. Coordinador: Solucar; Participan: Fundación INASMET, Universidad de Sevilla y CIEMAT. REF. PROFIT, CIT-120000-2005-49 Investigador principal Ciemat: Félix M. Téllez; (Periodo: 30/10/2005 - 30/10/2007)

C) Mejora de las capacidades experimentales y procedimientos de calidad:

1) Proyecto: "Desarrollo de Sistemas y Herramientas de Control para Plantas Termo solares". Convenio específico de colaboración CIEMAT-Universidad de Almería. Investigador principal: Manuel Romero (CIEMAT) y Manuel Berenguel (UAL). (Duración: Nov. 2002/Oct. 2005).

2) 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).

A) PARTICIPACIÓN EN PROYECTOS DE DEMOSTRACIÓN

La actividad del Ciemat-PSA en los proyectos de demostración ha consistido en acompañamiento, transferencia y asesoramiento en los diseños de componentes y conjunto de las plantas, en base a la experiencia acumulada en la PSA en desarrollo y ensayo de componentes así como en el análisis y diseño. Cabe destacar, en 2005, el apoyo significativo al desarrollo de la tecnología de sales fundidas, a implementar en la planta Solar Tres, donde Sener y Ciemat han asumido, con fondos propios, la validación de la tecnología de receptor de tubos con el desarrollo de un prototipo de 4 MW térmicos.

Proyecto PS10

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 ge-

Figura 50. **Planta PS-10 en construcción con un Helióstato enfocado sobre zona del receptor, a finales de 2005.**

neradores 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) es el diseño, construcción y operación comercial de una planta solar termoeléctrica con sistema de torre y campo de helióstatos y una potencia nominal bruta de 11 MW eléctricos. Esta planta ha sido instalada en el municipio de Sanlúcar la Mayor, en la provincia de Sevilla, y se espera que su inauguración tenga lugar en el 4º trimestre 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 modificó 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 utiliza un total de 624 helióstatos (de 121 m^2 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 es de paneles de tubos 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 250ºC, y alimenta a un calderín que sirve para incrementar la inercia térmica del sistema.

El bloque de potencia trabaja con vapor saturado a 250ºC 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 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 directo 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, que ha asumido opciones tecnológicas de riesgo reducido (baja temperatura, y tamaño reducido de planta), donde la progresión lógica para las próximas plantas, alguna de ellas ya muy definidas, es asumir mayores tamaños de planta (como la próxima PS-20) y mayores temperaturas de operación (vapor sobrecalentado) que permitan reducir costes específicos de inversión y producción de electricidad. En este sentido, 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.

Proyecto SOLAR TRES

El Proyecto Solar Tres tiene por objeto construir y explotar en España una planta de demostración a escala comercial de generación eléctrica de 17 MW de potencia nominal a partir de energía solar, mediante la tecnología de campo de helióstatos, torre, y utilizando sales fundidas (40% de nitrato potásico y 60% de nitrato sódico) como fluido de transferencia de calor y sistema de almacenamiento de energía.

El proyecto Solar TRES comenzó a gestarse casi al mismo tiempo en que se dio por finalizado el proyecto experimental americano Solar Two, en 1999, concluyéndose que la tecnología estaba a punto para iniciar una fase comercial. Entonces, dos de los participantes principales de Solar Two, la compañía Boeing y la compañía Bechtel Corporation acordaron con la empresa española GHERSA procurar el desarrollo comercial de la tecnología de receptor central con sales fundidas como fluido calo-portador y de almacenamiento, aprovechando el régimen especial de tarifas eléctricas para las fuentes renovables en España. El consorcio inicial de empresas europeas y estadounidenses consiguió 5 M€ de subvención de la Comisión Europea (Diciembre de 2002). El proyecto inicial de Solar Tres fue prediseñado de acuerdo al marco legal español aplicable en aquel entonces. Durante el desarrollo del proyecto la legislación nacional en materia de energías renovables sufrió algunos cambios, y también se sucedieron algunos cambios relativos a los propios socios, que llevaron a la reorientación del proyecto y del consorcio promotor. Finalmente, en 2005 se consolidó el equipo, integrado totalmente por compañías europeas (Sener, SIEMENS, Ghersa, Saint Gobain y Ciemat), y liderado por Sener. La duración del proyecto se ha extendido hasta Diciembre de 2007.

El proyecto acumula la experiencia del anterior proyecto Solar Two, pero también presenta innovaciones en su diseño, como consecuencia del trabajo conjunto desarrollado por Sener y el Ciemat junto con las condiciones técnicas impuestas por la legislación española en materia de energía solar térmica. El diseño de Solar Tres afronta el reto de resolver algunos problemas, fundamentalmente relativos a algunos componentes, como el generador de vapor, circuito de calor, tuberías, etc., que se experimentaron en Solar Two. Este reto motivó a finales de 2005 un acuerdo entre Sener y Ciemat para el desarrollo y análisis de un nuevo concepto de helióstato y de un prototipo de receptor de sales fundidas de mayor rendimiento térmico y capaz de operar con mayores cantidades de flujo sin comprometer su durabilidad (al menos 25 años). Este acuerdo asumido como "validación" de componentes (helióstato y receptor) para la planta Solar Tres, tiene entidad de proyecto de desarrollo tecnológico propio (Sener-Ciemat).

La planta dispondrá de una superficie total del campo de helióstatos de 142,31 Ha, potencia térmica del receptor de 120 MWt y una capacidad de almacenamiento de 15 horas. La potencia de la planta asciende a 17 MWe y tiene previsto proporcionar 98.400 MWhe al año para lo que contará con el aporte de gas natural permitido por la actual normativa española (RD 436/04). Esta producción eléctrica se exportará íntegramente a la red.

Con respecto al proyecto anterior, Solar Tres es aproximadamente tres veces el tamaño de Solar Two e incorpora helióstatos de 115,6 m^2 y menor coste.

Tabla 1.Características Técnicas de la Planta Solar Tres

Número de Helióstatos	2480
Superficie reflectante del campo solar	285 200 m^2
Superficie de Terreno que ocupa la planta	142.31 Ha
Altura de la Torre	120 m
Potencia térmica del Receptor	120 MWth
Potencia de la Turbina	17 MWe
Capacidad de Almacenamiento Térmico	15 horas
Capacidad del quemador de gas	16 MWth
Producción de electricidad anual estimada	96 400 MWhe
Ahorro emisiones de CO_2 (respecto mejor alternativa convencional)	23 000 tons/año
Ahorro emisiones de CO_2 (respecto planta de carbón)	85 000 tons/año

El sistema receptor cilíndrico de 120 MWt de potencia alcanza altos rendimientos térmicos y es capaz de trabajar con grandes cantidades de flujo, teniendo bajas pérdidas de calor. Este receptor ha sido diseñado para minimizar el esfuerzo térmico y resistir las fracturas por corrosión ínter granular.

Además, la mejora de la disposición física de la planta con circulación en circuito cerrado de sales fundidas ha reducido el número de válvulas, y ha eliminado las ramificaciones innecesarias, permitiendo un drenaje de seguridad que evita la solidificación de las sales.

El sistema de almacenamiento térmico posee mayor capacidad y puede trabajar durante 15 horas con una carga de 6250 t de sales fundidas, con calentadores sumergidos en el tanque. Este sistema es eficiente y de bajo riesgo. Las sales fundidas a alta temperatura se encuentran a 565 °C, con un descenso de sólo 1 – 2 °C al día. Y a baja temperatura, las sales se almacenan a 45 °C por encima de su punto de fusión, es decir, a 285 °C.

Los diferentes avances de diseño permitirán mejorar la eficiencia de conversión con

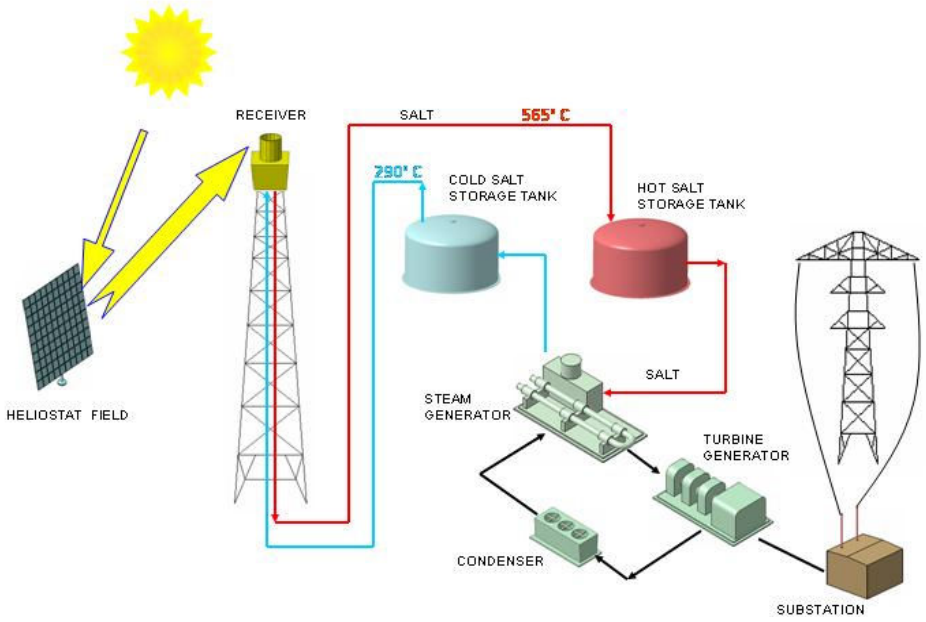


Figura 51. Diagrama esquemático de la planta Solar Tres

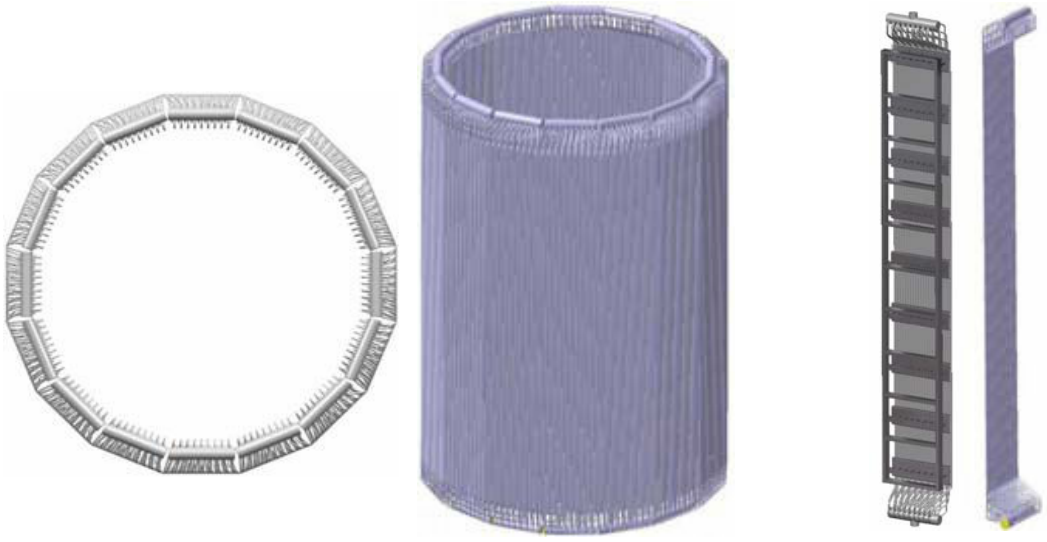


Figura 52. Esquema receptor Solar Tres

respecto al diseño de Solar Two. Aunque la turbina sólo es ligeramente mayor que la de éste, el campo de helióstatos ampliado y el sistema de almacenamiento térmico permitirá a la planta operar 24 horas al día durante el verano y lograr una capacidad solar anual de aproximadamente el 64% (unas 5600 horas equivalentes), e incluso hasta más del 71% (incluyendo 15% de producción a partir de combustibles fósiles).

A finales de 2005, el proyecto Solar Tres se encontraba en fase de verificación técnica (receptores, sistema de sales fundidas, etc.) en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería, y se está finalizando la fase de promoción y definición de su emplazamiento definitivo, así como la estimación de su coste final. En paralelo se está abordando la gestión de apoyos públicos (el proyecto cuenta ya con una ayuda de la UE por importe de 5 M€) y la Financiación Bancaria sobre la base de mecanismos de "project finance".

Panel Receptor de Sales

Durante 2004-2005, la empresa Boeing retiró su oferta de construcción del receptor para la planta Solar Tres, esto comprometía la continuación del proyecto dada la ausencia de una oferta comercial alternativa. Ante esta situación, Sener decidió abordar la ingeniería y desarrollo, por sí misma, del receptor de sales para Solar Tres. No obstante y de cara a reducir riesgos solicitó el apoyo de Ciemat para compartir el diseño y validación de un receptor de sales en tubo, abordando el diseño, construcción y ensayo de un panel receptor, previo a la fabricación del receptor de Solar Tres, formado por un conjunto de 16 paneles.

En la segunda mitad de 2005, Sener y Ciemat firmaron un acuerdo de colaboración para validar la tecnología de receptor (con tecnología Sener-Ciemat),así como para la definición de estrategias de operación y control que permitan garantizar y alargar la vida de un receptor de sales fundidas, que será aplicado en centrales solares termoeléctricas (comenzando por Solar Tres).

El presupuesto de dicho acuerdo se valoró en unos 6 M€ , de los cuales 1.5 M€ son para equipamiento, con una aportación repartida (65% Sener, 35% Ciemat) entre ambas instituciones. El conjunto de equipamiento constituirá casi un sistema completo, a falta de la turbina y el generador eléctrico; incluyendo: Subsistema receptor de 4 MW térmicos; Tanque de almacenamiento de sales de unas 18 toneladas; Evaporador de 1 MWh; Aero condensador; sistema de traceado eléctrico, tuberías, sistema de control y medida, dotado de unos 400 sensores.

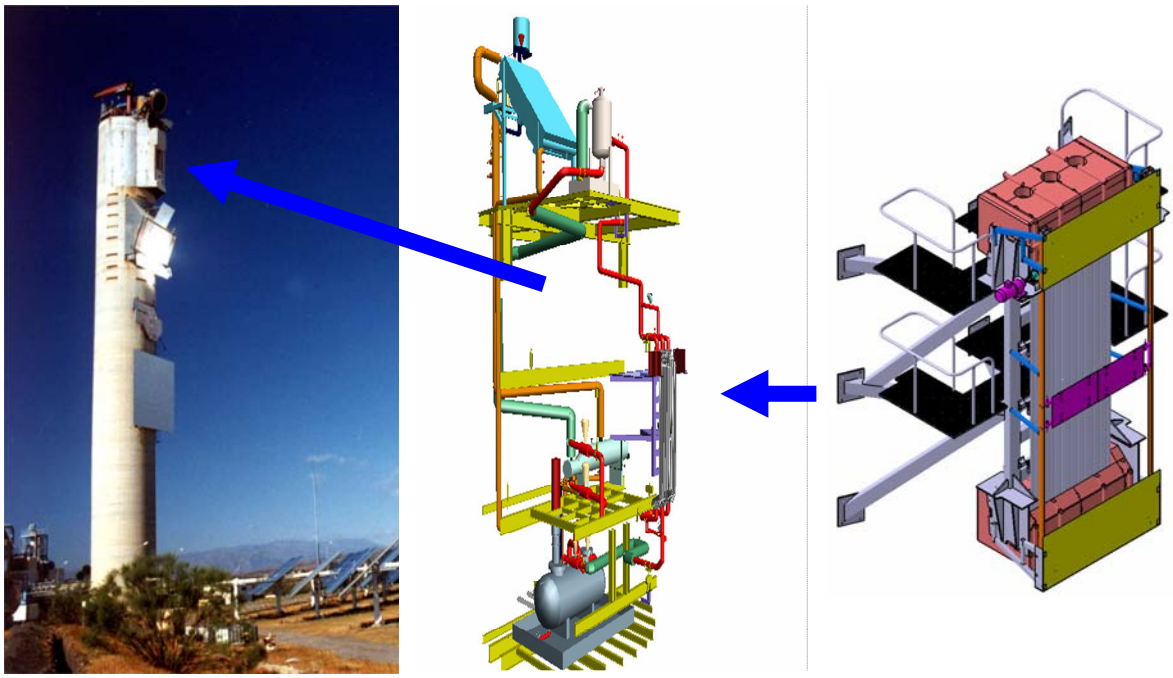


Figura 53. Detalle del sistema y Panel Receptor que se está instalando en nivel 70 m de la Torre CESA-1

El desarrollo del prototipo se entiende como un paso imprescindible para reducir riesgos asociados al primer desarrollo propio de una tecnología que podría implementarse en una de las primeras plantas solares termoeléctricas y en condiciones de operación muy exigentes (con flujos solares de hasta 1000 kW/m^2; temperaturas en sales de 565ºC y pequeñas diferencias de temperatura entre diferentes zonas del panel receptor).

Durante 2005 se abordó el diseño básico del sistema experimental a instalar en el nivel situado en la cota de 70 m en la torre Cesa-1 de la PSA y se comenzó la fase de acopio y fabricación de componentes (como la bomba de sales, evaporador, etc.). La instalación del conjunto de componentes está prevista para el primer semestre de 2006 y los primeros ensayos de verificación y puesta a punto para el mes de Julio de 2006. El conjunto del programa está ajustado para tener una valoración de la viabilidad del diseño y de la eficiencia del receptor a finales de Septiembre de 2006, cuando habrá de iniciarse la fabricación del receptor para Solar Tres.

La instalación del panel en la PSA servirá para probar estrategias de control y verificación de durabilidad y mantenimiento del tratamiento absorbente sobre los tubos, etc.. De modo que la duración del acuerdo Sener-Ciemat, actualmente establecido, se extiende hasta Diciembre de 2007.

B) DESARROLLO DE COMPONENTES Y SISTEMAS DE RECEPTOR CENTRAL

Se trata de la línea de investigación más consolidada, ya que hereda los objetivos y recursos del antiguo proyecto en Sistemas de Receptor Central. En este grupo 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.

1) El Proyecto ECOSTAR:

Este proyecto de corta duración (Diciembre 2003 -Abril 2005) 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 Aerospacial 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. Durante 2005 se publicaron y presentaron en varios foros y congresos las conclusiones del estudio.

Muchos de los sistemas incluidos en el estudio están siendo analizados para ser implementados en España, con la referencia económica de la prima en torno a los 21c€/kWh de electricidad producida con solar termoeléctrica. Para la tecnología mas madura, la de CCP con aceite como fluido calo-portador (y para la que hay planes de construcción de varias plantas de 50 MW_e por unidad, utilizando almacenamiento térmico de sales fundidas), la estimación de ECOSTAR es de 17-18c€/kWh. Para las otras tecnologías analizadas, con plantas planeadas de menor tamaño, en torno a 15 MW_e, el coste de electricidad estimado es significativamente mayor, variando entre 19 y 28c€/kWh. El escalado de estas plantas a tamaños de unos 50 MW_e, en el mismo lugar, conduce a estimaciones del coste de la electricidad de entre 15 y 20c€/kWh.

Dado que el coste estimado para los diferentes sistemas son bastante parecidos, dentro del margen de incertidumbre sobre los costes actuales, y dado que el grado de madurez de las tecnologías analizadas no es homogéneo, se hace imposible, como conclusión de ECOSTAR, recomendar una priorización de unas tecnologías sobre otras. No obstante, los análisis de sensibilidad realizados permiten estimar el impacto relativo de la implantación de diversas innovaciones en las diferentes tecnologías. Las conclusiones genéricas establecen tres niveles de prioridad para implementación de innovaciones. La Tabla

Tabla 2. Prioridades de I+D en TRC, según ECOSTAR (ΔLEC = Reducción potencial del coste de la electricidad)

Tecnología	Prioridad A	ΔLEC	Prioridad B	ΔLEC	Prioridad C	ΔLEC
TRC + sales fundidas	Aumentar tamaño hasta 50 MW Mayor tamaño helióstatos; estructura	3-11% 7-11%	Espejos avanzados	2-6%	Almacenamiento avanzado	0-1%
TRC + Agua-vapor	Aumentar tamaño hasta 50 MW Mayor tamaño helióstatos ; estructura	6-11% 7-11%	Vapor sobrecalentado Almacenamiento avanzado	6-10% 5-7%	Espejos avanzados	2-6%
TRC + Aire + Turbina Vapor	Aumentar tamaño hasta 50 MW Mayor tamaño helióstatos ; estructura	8-14% 7-11%	Almacenamiento avanzado Mayor rendimiento receptor	4-9% 3-7%	Espejos Avanzados	2-6%
TRC + Aire + Turbina Gas	Mayor tamaño helióstatos ; estructura Incluir Almacenamiento Térmico	7-11% 7-10%	Aumentar tamaño hasta 50 MW	3-9%	Espejos avanzados Mayor rendimiento Receptor	2-6% 1-2%

siguiente muestra las prioridades de investigación para los sistemas de receptor central.

Pueden extraerse varias conclusiones genéricas del estudio:

- Aunque la producción en serie de componentes modulares y el escalado a plantas de mayor tamaño permitirán una reducción significativa de los costes (estimada en un 30% de reducción relativa al coste actual), los esfuerzos en innovación tecnológica pueden conducir a una importante reducción adicional de costes
- Todas las tecnologías evaluadas en el estudio tienen un potencial significativo de reducción de costes mediante la implementación, a corto-medio plazo, de innovaciones como las analizadas en el proyecto ECOSTAR (Figura 55).
- La investigación a corto-medio plazo debería priorizar la mejora de componentes modulares como los concentradores (helióstatos), o los receptores.
- A medio-largo plazo, la investigación se debería enfocar sobre componentes menos modulares, tales como el almacenamiento térmico o la integración óptima en mayores y mas eficientes ciclos termodinámicos de producción.
- El desarrollo de estas tecnologías requiere un impulso que puede venir, bien por extender condiciones de apoyo, como las que se perfilan en España, a otros países, especialmente aquellos con alto potencial solar. La cuenca sur del Mediterráneo ofrece un potencial significativo de reducción de coste, debido a disponer de un recurso solar un 20-30% mayor

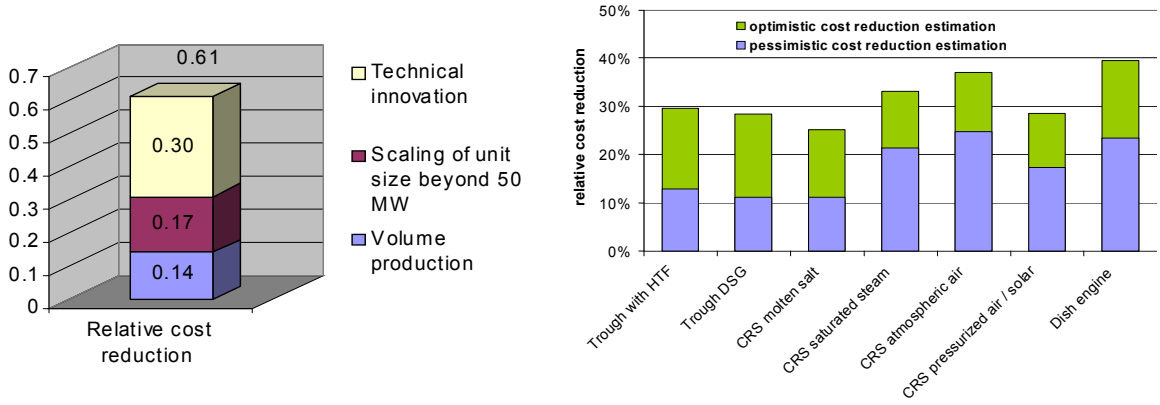


Figura 54. Influencia de la innovación tecnológica en la reducción de costes para distintos sistemas solares termoeléctricos (Resultados del proyecto ECOSTAR

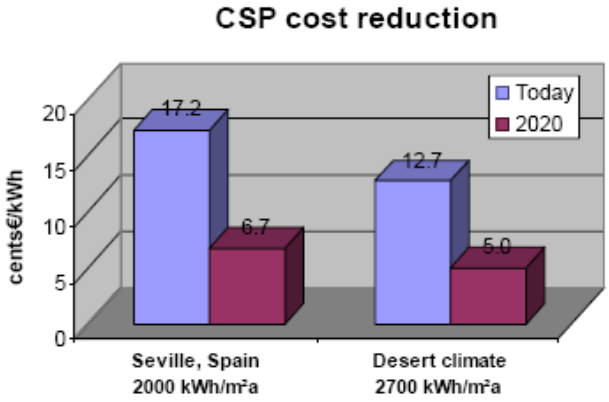


Figura 55. Estimación del LEC obtenida en el proyecto ECOSTAR para dos escenarios temporales (hoy y 2020) y dos niveles de recurso (2000 para el sur de Europa, 2500-2700 para desiertos del Norte de África).

Nuevos esquemas de producción eléctrica: 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, termoiónica, etc.).

El proyecto HICON-PV (HIgh CONcentration PV Power System) es un proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del Sexto Programa Marco que tiene como objetivo el desarrollo, fabricación y ensayo de un dispositivo fotovoltaico de concentración capaz de trabajar con flujos de radiación solar de hasta 1000 kW/m^2, como vía para el desarrollo de una tecnología de concentración fotovoltaica que pueda alcanzar un coste por sistema de 1€/Wp (un euro por vatio pico) en 2015. El proyecto comenzó en Diciembre de 2003 y tiene prevista su terminación en Diciembre de 2006. Los participantes son: Solúcar Energía (coordinador), DLR, Fraunhofer ISE, PSA-CIEMAT, RWE, Universidad de Ben Gurion, EDF y Universidad de Malta.

La propuesta del proyecto HICON-PV se basa en el uso de células de GaAs multi-unión que soportan altos flujos solares y alcanzan eficiencias cercanas al 35% (conversión de radiación solar a electricidad). Con la tecnología actual de Silicio, las células se ven limitadas a concentraciones por debajo de 500 kW/m^2 y eficiencias que difícilmente superan el 20%.

Las tareas del CIEMAT dentro del proyecto comprenden la selección de sistemas de concentración solar adecuados para la alta concentración fotovoltaica, así como su adaptación a los estrictos requerimientos de distribución de flujo de radiación y temperatura en el módulo fotovoltaico (en colaboración con el DLR); el desarrollo de los ensayos y la evaluación de los módulos fotovoltaicos en el horno solar de la PSA, y el desarrollo de estándares de ensayos, procedimientos y evaluación de dispositivos de concentración fotovoltaica.

Durante el 2004 la actividad de la PSA en el proyecto se centró en equipar al Horno Solar con todo la instrumentación necesaria para el ensayo de las células desarrolladas por el Fraunhofer ISE, además de la simulación y optimización óptica de diversos tipos de concentradores solares (parabólicos, Fresnel o centrales de torre). Durante el 2005 se pusieron en marcha todos los nuevos componentes instalados durante 2004 y se realizaron los ensayos y la caracterización de diversas células y Módulos Integrados Monolíticos (MIMs) así como del comportamiento térmico del enfriador para los módulos fotovoltaicos propuesto por PSE.

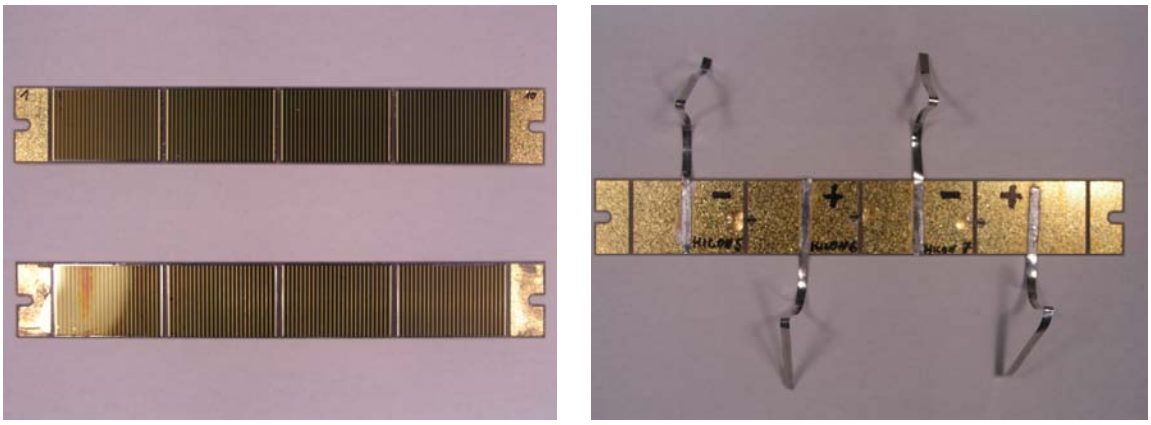


Figura 56. Células y Módulos Integrados Monolíticos (MIMs) ensayados en el Horno Solar de la PSA durante 2005

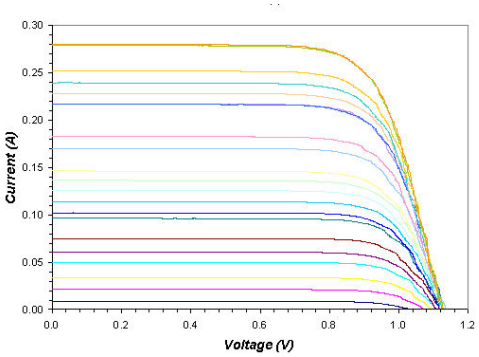


Figura 57. **Curvas I-V a diferentes concentraciones para una de las células ensayadas en el Horno Solar de la PSA durante 2005**

Debido a que los MIMs requieren que las diferencias en flujo en su superficie no sean superiores al 10%, después de una campaña de caracterización del flujo solar del horno y de modelización y ensayo de dispositivos re-concentradores u homogeneizadores del flujo, se ha diseñado un reconcentrador / homogenizador del flujo solar incidente en las células que ofrezca estos requerimientos de planitud.

Receptores volumétricos: AVANSOL

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.

Tras las experiencias de desarrollo de unos treinta prototipos de receptores volumétricos con tamaños diferentes (entre 50 kWt y 3000 kWt a la salida del absorbedor), las conclusiones principales son la fiabilidad, la ventaja medioambiental de utilizar aire como fluido calo-portador, la alta disponibilidad de estas plantas (debido a la baja inercia térmica del fluido y del absorbedor) , la alta eficiencia térmica del sistema al poder trabajar a muy altas temperaturas (entre 700 y 1000ºC), el gran potencial de reducción de costes al elegir diseños modulares que permiten fabricaciones en serie y el disponer de soluciones de almacenamiento térmico probadas (para altas temperaturas) tales como los lechos de roca.

Todos estos desarrollos han atendido a tres propósitos fundamentales: 1) Demostrar las capacidades de operación a altos flujos, altas temperaturas, y, en algunos casos, presiones de trabajo medias (~10 bar); 2) Mejorar las eficiencias térmicas (función de la temperatura de trabajo) de conversión de la radiación solar; 3) Simultanear con los objetivos anteriores, diseños de bajo coste (mediante diseños modulares y elección de materiales).

Sin embargo, a pesar del avance en esta tecnología, quedan aún una serie de temas pendientes que son cruciales para el desarrollo y la aplicación industrial de la tecnología de aire en los sistemas de receptor central; principalmente:

- queda por demostrar que los materiales y diseños probados y/o utilizables son "duraderos" en condiciones de alto flujo solar y/o alta temperatura, y
- se requiere una reducción adicional de costes específicos del receptor.

Para abordar el segundo reto se requiere conjugar la elección de materiales para el absorbedor, con diseños de estructura porosa fácilmente fabricable y susceptible de producción en masa, con geometrías porosas adecuadas y altas absortividades solares efectivas.

Este planteamiento motivó la propuesta del proyecto AVANSOL, aceptado en el programa PROFIT, con duración de Octubre de 2005 a Octubre de 2007 y los siguientes participantes:

Solucar: Coordinador formal del proyecto, ha sido también la empresa coordinadora en proyectos internacionales de desarrollo de receptores volumétricos como el proyecto Solair (de 3MWth). Como empresa promotora de la primera planta comercial de Receptor Central sigue interesado en la tecnología de receptor volumétrico como opción para las planta futuras, en la medida que se despejen las incertidumbres previas al proyecto.

Ciemat: participa desde tres grupos en Avansol:

- *la División PSA*, que realiza la coordinación técnica del proyecto y acumula una de las mayores experiencia a nivel mundial en el ensayo y evaluación de receptores volumétricos,
- *la División de Materiales Estructurales para Plantas Energéticas*, que aporta su experiencia en caracterización del deterioro (corrosión / oxidación) de materiales metálicos, etc, y
- *la División de Materiales para Fusión*, que aporta su experiencia en materiales cerámicos para trabajo en condiciones extremas (temperatura, radioactividad, etc.)

La empresa Inasmet: con amplia experiencia en desarrollo de estructuras cerámicas porosas (Alúmina, SiC, etc.) y capacidades de caracterización (mecánica, etc. sobre materiales cerámicos);

La Universidad de Sevilla, USE: Tiene implementadas capacidades de fabricación de estructuras "bio-miméticas", replicando en material cerámico como SiC, cualquier estructura biológica porosa de partida.

El proyecto ha abordado el reto de:

Desarrollar metodologías que permitan estimar la durabilidad de absorbedores volumétricos tanto cerámicos como metálicos, poniendo a punto técnicas de envejecimiento acelerado y derivando relaciones entre grado de envejecimiento y durabilidad en condiciones de alto flujo solar y alta temperatura

Revisar opciones de materiales y estructuras geométricas, que siendo durables, tengan alto potencial de reducción de costes al ser susceptibles de fabricación en serie y fácilmente escalables.

La duración del proyecto es de octubre de 2005 a octubre de 2007. Durante 2005 se comenzó la preparación de técnicas de laboratorio que permitirán tanto la caracterización óptica y térmica de muestras de pequeño tamaño (como paso inicial de selección), así como la preparación de capacidades experimentales que nos permitan hacer ensa-

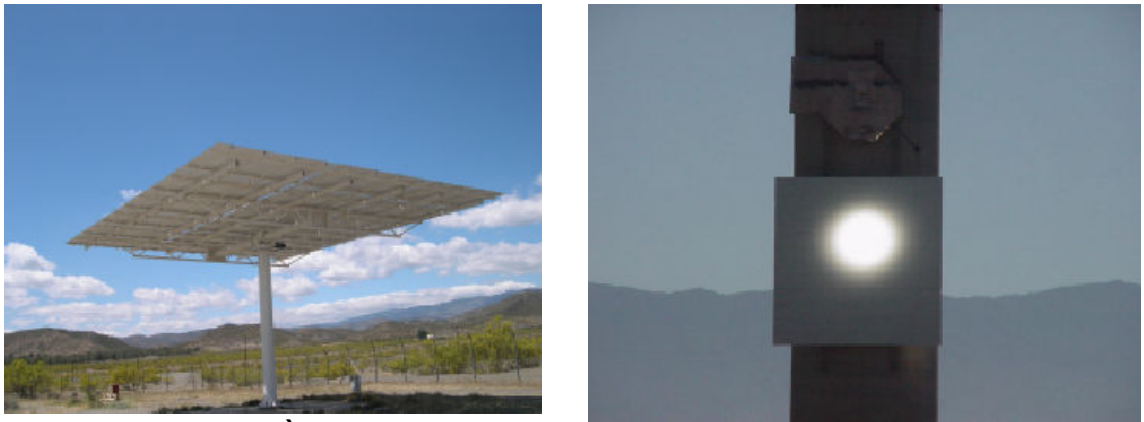
Figura 58. Ejemplos de estructuras porosas para absorbedores volumétricos solares.

yos de ciclado térmico, de ciclado en flujo solar (utilizando un disco parabólico y un dispositivo de posicionamiento intermitente de las muestras en la zona focal) y de envejecimiento en cámara climática.

Helióstatos y concentradores solares

La mejora y reducción de costes de los helióstatos sigue siendo uno de los aspectos cruciales para la viabilidad económica de las plantas solares termoeléctricas de receptor central, ya que representan entre el 30% y 40% del coste total de la planta. Del coste total de un helióstato, el dispositivo de seguimiento (motor, engranajes, etc.) es responsable de entre el 40% y el 50%, ya que se requieren alta precisión en el seguimiento solar y grandes resistencias mecánicas (debido al viento y los grandes tamaños de la superficie reflectante).

Durante 2005, el Ciemat ha validado la calidad óptica y de seguimiento del prototipo de helióstato de Sener, diseñado para su implementación en la planta Solar Tres. El trabajo, realizado como subcontrato, se ha realizado en dos campañas con objeto de cuantificar las características funcionales del prototipo de helióstato, tanto en su capacidad de apunte a un blanco fijo a lo largo del día, como en su calidad óptica, es decir, en su capacidad para concentrar la radiación solar. El desarrollo de los ensayos sigue el Protocolo previo de Ensayos y Evaluación, elaborado por la PSA para este fin.



a) b)

Figura 59. (a). Helióstato de Sener (2005). Área: 115.6 m^2; Geometría: esférica; Alineación: en el eje; Distancia focal (para ensayo en la PSA): 472.85 m.; (b) Blanco de análisis de imágenes en torre CESA-1 (PSA)

Desarrollo de Sistemas de Control Avanzado

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 avanzó 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 solares comerciales de Torre. En concreto se están utilizando tecnologías de objetos distribuidos estandarizadas, en las que el determi-

nismo 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 fín de proporcionar un entorno de análisis en tiempo real de los experimentos realizados en PSA.

Durante 2005 se han implementado los algoritmos previamente desarrollados. La codificación y verificación de dichos algoritmos en entornos de tiempo real crítico (LynxOS/RT-CORBA) ha requerido gran cantidad de tiempo.

La situación actual es la de realización de pruebas del sistema de control central del campo de helióstatos de CESA en PSA-CIEMAT. Se espera que este nuevo sistema, tras la depuración de los errores que aparezcan, pueda reemplazar definitivamente a principios del año 2007 la aplicación de control basada en μVAX que ha estado funcionando durante más de veinte años en dicho campo de helióstatos. Dicho sistema permitirá diseñar gran cantidad de experimentos hasta ahora no ejecutables sobre la antigua plataforma informática de control.

C) MEJORA DE LAS CAPACIDADES EXPERIMENTALES Y PROCEDIMIENTOS DE CALIDAD:

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 concentración solar, la mayoría de las veces suelen pasar inadvertidas al encontrarse semiocultas 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 2005 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 (Nacional 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 pintura 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 (850ºC) la radiancia espectral de un cuerpo negro 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 Vatell 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.

Durante los dos años de vida de este proyecto se han abordado las tres tareas principales que en principio fueron planteadas y, aunque el grado de desarrollo ha sido desigual debido a que la planificación fue a tres años, se prevé alcanzar los objetivos previstos.

Durante 2005, se finalizó la construcción de un laboratorio de Radiometría que está actualmente en fase de puesta en marcha (ver la figura adjunta). Este nuevo laboratorio ha sido construido gracias a la dotación FEDER B2C937097144C9BF (*Laboratorio para Calibracion Radiometrica para la Plataforma Solar de Almería*).

Figura 60. Nuevo laboratorio de radiometría montado en la PSA

El laboratorio ha sido equipado con instrumental científico-técnico gracias a la dotación FEDER 16A99EDA0ECDA337 (*Equipamiento para Laboratorio de Calibración Radiométrica*) y al propio proyecto MEPSOCON. Dentro de dicho instrumental hay que destacar la adquisición de cuerpos negros, pirómetros, caudalímetros electromagnéticos de alta precisión y bomba de agua de altas prestaciones.

Se han analizado los procedimientos actuales de calibrado de radiómetros Gardon (radiométrico y calorimétrico), se han llevado a cabo dichas calibraciones en el laboratorio cuantificando el error cometido en cada caso. Se han analizado las incertidumbres existentes al trasladar los sensores calibrados en laboratorio a condiciones de radiación solar; en definitiva, se corrigen las calibraciones cuando se mide en condiciones de ra-

diación solar. Para cuantificar dicha corrección se han obtenido las curvas de absortividad espectral (espectrofotómetro) de los recubrimientos negros (Zynolyte y grafito coloidal principalmente) con los que son pintados los radiómetros, las curvas de reflectividad espectral (espectrofotómetro) de los espejos de los helióstatos y se han cuantificado las diferencias de absortancia de estos recubrimientos trabajando en condiciones de cuerpo negro (Ley de Planck) y en condiciones de radiación solar (espectro-radiómetro).

Se han cuantificado los errores sistemáticos (ver Tabla 3) al medir la potencia solar concentrada con radiómetros Gardon calibrados utilizando un cuerpo negro a 850ºC:

Trabajar en un contexto solar como el horno solar de la Plataforma Solar de Almería (PSA) ha permitido validar los procedimientos de calibración en laboratorio expuestos anteriormente y verificar experimentalmente los errores sistemáticos cometidos en la medida de altas irradiancias solares. Este resultado ha sido reconocido por la empresa VATELL que fabrica los sensores Gardon y será objeto de una publicación conjunta

Tabla 3. Error sistemático al medir potencia solar

Recubrimiento	Error sistemático
Zynolyte	+ 3.6 %
Grafito coloidal	+ 27.9 %

Hay que destacar la adquisición de un radiómetro (Kendall) de cavidad absoluta de rango 50-5000 kW/m^2 y precisión ± 1%. Este sensor tiene la ventaja de ser autocalibrable y efectuar medidas de irradiancia independientemente del tipo de radiación (UV, visible o IR). Se pretende que este sensor llegue a ser patrón primario nacional de alta irradiancia.

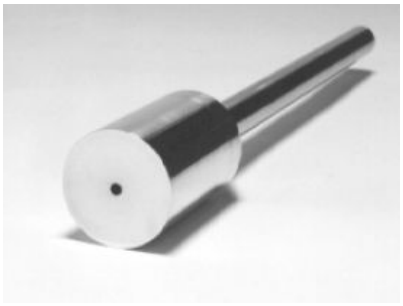


Figura 61. Radiómetro de cavidad

Se han efectuado simulaciones mediante elementos finitos (código FLUENT) del comportamiento térmico del radiómetro Gardon para determinar la influencia que tiene en la medida de irradiancia el trabajar en un escenario exterior al laboratorio como el que se presenta durante la evaluación de receptores solares. La conclusión obtenida es que la perturbación en la medida de irradiancias solares debida a fenómenos convectivos o térmicos es inferior al ± 1%.

Este proyecto está a su vez relacionado con otros proyectos o grupos que requieren certificación en la calidad de medida de altos flujos solares, como son:

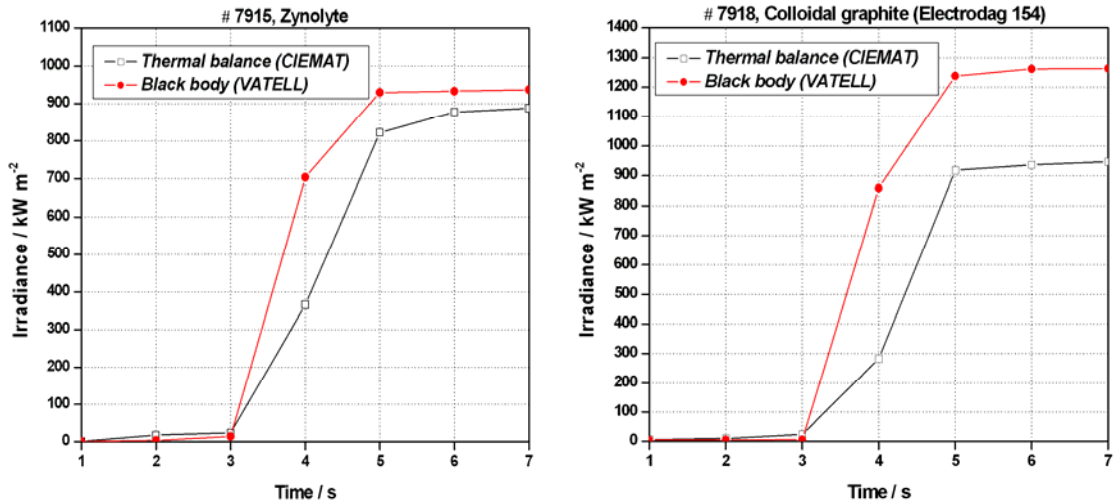


Figura 62. Medidas de irradiancia solar con sensor Gardon: medida calorimétrica y radiométrica

1) El proyecto europeo HICONPV, para el que se ha realizado una campaña de caracterización del flujo solar concentrado al que se había de someter la célula fotovoltaica de concentración en su propia campaña de caracterización,

2) Por otro lado, esta dentro del marco del consorcio europeo SOLLAB (Alianza europea de laboratorios de concentración solar) donde se participa activamente en el "Flux and Temperature Measurement Group " integrado por miembros de cada país. Entre los objetivos de este grupo hay que señalar la definición de unos estándares europeos de medida de irradiancia solar. (http://www.promes.cnrs.fr/ACTIONS/Sollab/presentation.htm)

Mejora de las capacidades e instalaciones

Durante 2005, además del mantenimiento de las capacidades experimentales en los dos campos de helióstatos (Cesa 1 y CRS) y en varios de los niveles de la torre de la planta CESA-1 con experimentos en marcha (como el proyecto KOSMOSOL, continuación del SOLAIR o receptor volumétrico cerámico de 3 MW_t; en el nivel 80 m de la torre Cesa 1, o el proyecto PDVSA en la torre CRS), se ha iniciado la puesta a punto de un laboratorio para caracterización óptica y térmica de elementos absorbentes para TRC. En 2005, este laboratorio hizo acopio de una lámpara de 4000 W, un banco de óptica motorizado para caracterización de la reflectividad y transmisividad angular de absorbentes y reflectantes, utilizando fuentes de luz láser y fotodiodos

Figura 63. Nuevo espectrofotometro para caracterización óptica

Además, como se mencionó anteriormente, se inició la puesta a punto de capacidades que permitan ensayos de envejecimiento por ciclado térmico y de exposición a radiación solar concentrada. Para ello se han adquiridos muflas y se está preparando como dispositivo de ensayo un disco parabólico, tipo Distal 1, en la PSA.

También la actividad mencionada en el apartado de control constituye en si misma una mejora de la instalación, al actualizar los algoritmos y dispositivos en la sala de control. A finales de 2005, el nuevo sistema de control del campo de helióstatos que se está realizando en la PSA estaba ya muy avanzado.

Además de la reposición o nueva implementación de sensores de uso genérico (como los meteorológicos) se han realizado mejoras tales como:

- La reparación de estructuras de 6 helióstatos del campo CRS.
- Se han adquirido 80 piezas de espejo de alta reflectividad para reparar las facetas del campo de helióstatos de CRS.
- Con las reparaciones mencionadas y con la reparación de averías de los mecanismos, medidores de posición angular y baterías eléctricas, se ha incrementado la disponibilidad del campo de helióstatos de CRS del 52% al 92 %.
- Se ha hecho un primer borrador de las especificaciones técnicas para la renovación de la sala de baja tensión de las instalaciones CRS y DCS de la PSA.
- Se ha comprado un equipo de lavado para helióstatos y colectores de alta presión con capacidad para dos boquillas de lavado simultáneo. Esta máquina viene a sustituir la existente con más de 22 años de servicio y con averías frecuentes que interrumpía el ritmo de lavado de espejos.
- Se ha instalado una nueva válvula de seguridad en la planta TSA, en sustitución de la que tenía que impedía controlar la presión adecuadamente debido a las fugas.

- Se ha adquirido e instalado una bomba de vacío para la mesa de conformado de facetas. La campaña que se va a llevar a cabo en los próximos años de reparación y reposición de facetas para dejar los campos de helióstatos al 100 % de disponibilidad requerirá la fabricación y conformado de nuevas facetas que serán realizadas en nuestras instalaciones de la PSA, reduciendo de esta forma el costo de las mismas.
- Se ha adquirido un plataforma rotatoria en dos ejes con control remoto, para instalar el equipo de canteo de helióstatos con láser.
- Con el fin de realizar una reposición de mecanismos en los helióstatos CASA de la planta CESA-1, se ha realizado un pedido a la empresa SENER para el diseño, fabricación y suministro de 5 mecanismos para helióstatos, totalmente adaptables a la estructura y pedestal de los helióstatos CASA existentes en la planta CESA-1 de la PSA.

Grupo de 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 la Unidad de Sistemas Solares de Concentración.

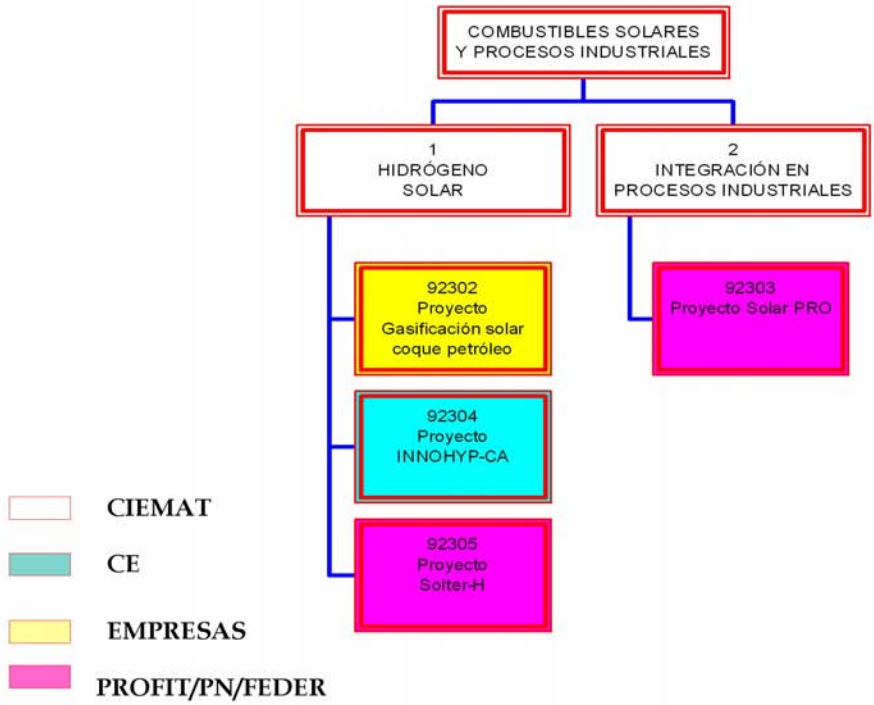


Figura 64. Estructura y contenido de las líneas de investigación en hidrógeno solar e integración en procesos industriales. Los colores indican las fuentes de financiación

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 endodérmicos 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 combus-

tibles 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:

$$C_1H_xO_y + (1-y)H_2O = \left(\frac{x}{2} + 1 - y\right)H_2 + CO$$

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 límpia 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, 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 H_2. 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 H_2 con la reacción de desplazamiento, seguido por la separación de H_2/CO_2, y el H_2 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 CO_2, frente al ciclo Rankine alimentado por combustible con un rendimiento de 35%.

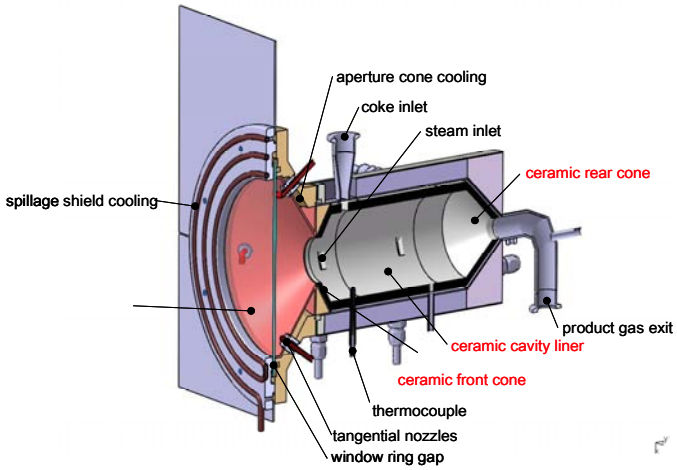


Figura 65. Esquema de reactor químico solarizado de 5 kW utilizado para la gasificación de coque de petróleo (Proyecto en colaboración PDVSA, ETH, CIEMAT)

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 1300-1800 K, 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 ha puesto en marcha la fase 2 del proyecto consistente en la escalación del concepto a una planta piloto de 500 kW que será posteriormente 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 CO_2 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 CO_2. El proyecto está coordinado por el Comisariado de la Energía Atómica Francés (CEA) y reune 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, Westhinghouse, y ciclos de basados en óxidos metálicos como el ciclo de ZnO, ferritas mixtas y otros, como la electrolísis a alta temperatura. Asimismo se analizan procesos de descarbonización de combustibles fósiles, tales como el cracking térmico de metano, el

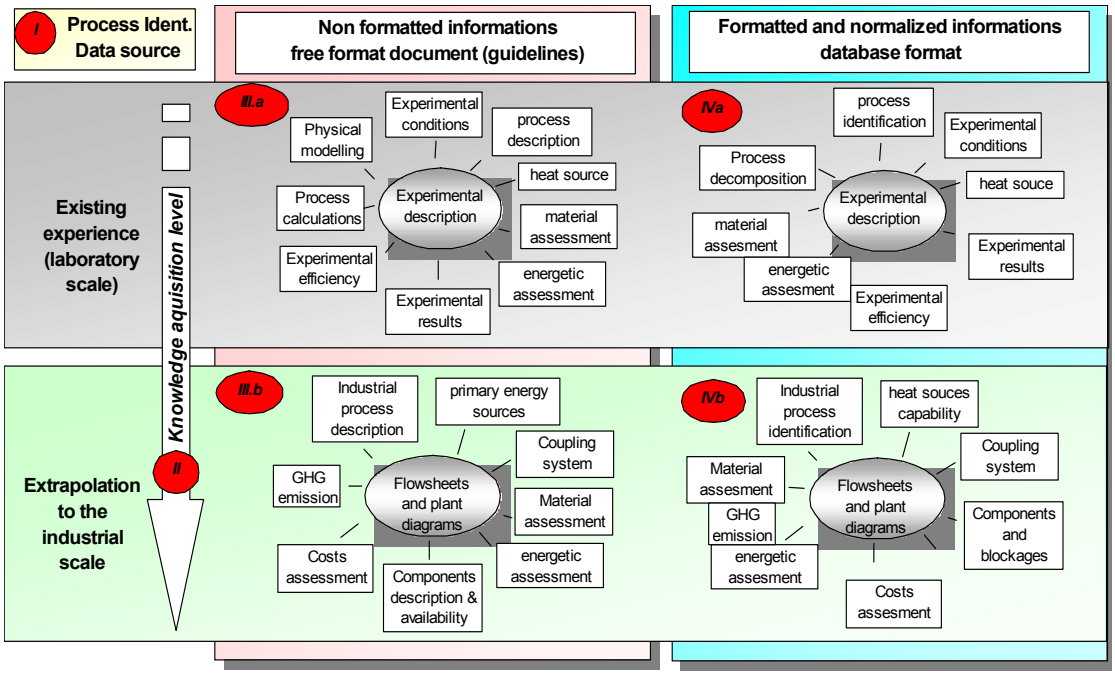


Figura 66. Metodología establecida en el proyecto INNOHYP para el análisis del estado del arte en procesos de producción masiva de hidrógeno por vía termoquímica (Fuente: CEA).

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. Se ha elaborado durante el año 2005 un documento de revisión del estado del arte de los distintos procesos, que permitirá comenzar en 2006 la elaboración de la comparativa y hoja de ruta correspondiente.

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.

SolarPRO: Desarrollo de sistemas de aporte de calor a partir de radiación solar concentrada para procesos industriales de alta temperatura.

La energía es la base de la civilización industrial. La continua disminución de las reservas energéticas disponibles y la limitación de las emisiones a la atmósfera así como el crecimiento progresivo de la demanda y la dependencia energética del exterior, han determinado que en los últimos años se hayan realizado importantes esfuerzos para fomen-

tar la reducción del gasto energético así como para potenciar el uso de las energías renovables, ya que se consideran un factor determinante para el cumplimento de la normativa comunitaria relativa a la limitación de las emisiones a la atmósfera de compuestos acidificantes y de los acuerdos internacionales firmados por España en materia medio ambiental, como el protocolo de Kyoto.

La energía solar térmica es la energía renovable que, por sus características, debe adquirir un papel relevante en el sector industrial pues permite obtener, de forma directa o mediante su transferencia a un fluido o a un material absorbedor, la energía térmica necesaria para muchos procesos industriales, pudiendo suministrar calor de proceso solar a distintos niveles de temperatura.

Es obvio que los procesos industriales que generalmente requieren un mayor aporte energético son aquellos que se producen a alta temperatura. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que para la futura implantación de la tecnología solar térmica de concentración en procesos industriales de alta temperatura es necesario un fuerte impulso en la investigación que, especialmente para este tipo de aplicaciones, requiere del estudio detallado de la viabilidad técnica y económica para cada proceso susceptible de ser tratado mediante esta tecnología, lo que implica el diseño de cámaras o reactores específicos para cada proceso en función de sus características y requerimientos técnicos y productivos, así como su ensayo y la caracterización de los reactores, los procesos y sus productos, de manera que se pueda demostrar para cada caso particular, la viabilidad tecnológica, y ajustar los parámetros de diseño y producción.

La experiencia demostrada de la PSA en las diversas tecnologías de concentración solar existentes, y en proyectos nacionales e internacionales para el tratamiento de materiales y la generación de calor solar a distintas temperaturas, le permite abordar proyectos innovadores, como SolarPRO.

El objeto de SolarPRO es demostrar la viabilidad tecnológica del uso de 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. En SolarPRO se combina la experiencia y conocimientos adquiridos en diversos proyectos de tecnología de receptor central con los correspondientes a las actividades de tratamiento de materiales llevados a cabo en el Horno Solar desde su inauguración en 1991.

Para ello la PSA, como coordinador del proyecto, colabora con diferentes grupos de investigación altamente especializados en los procesos a estudiar:

- 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.
- Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales de la Universidad de Sevilla (USE). Conocimiento del proceso de sinterizado de metales.

siendo los procesos inicialmente seleccionados para ser estudiados los siguientes:

Procesos típicos de la industria de la cerámica		
Secado de piezas crudas	100ºC < T < 200ºC	· Cámara de secado y cocción con receptor volumétrico
Tercer fuego para obtener ciertos tipos de decoración	800ºC < T < 900ºC	· Cámara de secado y cocción con receptor volumétrico
Cocción de baldosas cerámicas	850ºC < T < 1100ºC	· Cámara de secado y cocción con receptor volumétrico
Procesos Pulvimetalúgicos		
Sinterizado de metales	T~ 1000ºC	· Cámara de proceso de atmósfera controlada
Tratamiento de residuos		
Procesos de eliminación de metales pesados en suelos contaminados	T< 630ºC	· Horno Rotatorio Solar

Los principales objetivos del proyecto son:

1) Demostrar la viabilidad tecnológica del concepto.
2) Obtener datos y experiencia suficiente para optimizar el diseño y los procedimientos de operación.
3) Identificar posibles nuevos procesos susceptibles de recibir aporte energético mediante calor de proceso solar.
4) Obtener conclusiones que ayuden a plantear un posterior escalado del sistema.

Los hitos principales alcanzados durante el año 2005 han sido el desarrollo y ensayo de un dispositivo experimental a escala laboratorio que permite la obtención de distintos compuestos cerámicos de alta calidad a partir de energía solar concentrada a temperaturas de proceso superiores a los 1300ºC, así como la instalación y puesta en funcionamiento de una planta de proceso basada en la tecnología de receptor volumétrico en la que se han alcanzado temperaturas de proceso de hasta 1000ºC, habiendo se desarrollado un Sistema de Adquisición de Datos específico que permite controlar en todo momento las variables del proceso. Además, se ha construido una cámara adicional para el tratamiento de materiales bajo condiciones de atmósfera controlada y un reactor para la desorción térmica de suelos contaminados por metales pesados basado en el concepto de horno rotatorio, que serán instalados y caracterizados en el horno solar durante el próximo año.

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

INTRODUCCIÓN

El programa de trabajo y actividades de la unidad de "Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar" se articula en la actualidad en torno a las siguientes 5 líneas principales de investigación:

1) Procesos de detoxificación solar de efluentes líquidos
2) Procesos de desinfección solar de agua potable
3) Procesos de detoxificación solar en fase gas
4) Procesos de desalinización solar de agua de mar
5) Caracterización y medida de la radiación solar

Figura 67 recoge la estructura de la unidad con las principales líneas de investigación que se han desarrollado durante el año 2005 en el contexto de los diferentes proyectos en ejecución, cuyas actividades más relevantes se describen de forma resumida en las siguientes secciones.

2005 ha sido un año especialmente relevante para el grupo de "Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar" ya que ha supuesto una consolidación importante de las actividades que se definieron como objetivo después de la reestructuración realizada por el CIEMAT a principios del año 2004. Buena prueba de ello ha sido la aprobación, a finales de 2005, de un total de 5 proyectos europeos (VI Programa Marco de la Comisión Europea) más otro de excelencia de la Comunidad Autónoma de Madrid. Estos proyectos, que obviamente no aparecen reportados dentro del presente informe dado que su comienzo formal tendrá lugar a lo largo de 2006, son los siguientes:

1) Photozyme Nanoparticle Applications for Water Purification, Textile Finishing, Photodynamic Biomineralization and Biomaterials Coating (PHOTONANOTECH)
2) Innovative and/or integrated technologies for treating industrial wastewater (INNOWATECH)
3) Innovative Solar Disinfection of Drinking Water for Use in Developing Countries or in Emergency Situations (SODISWATER)

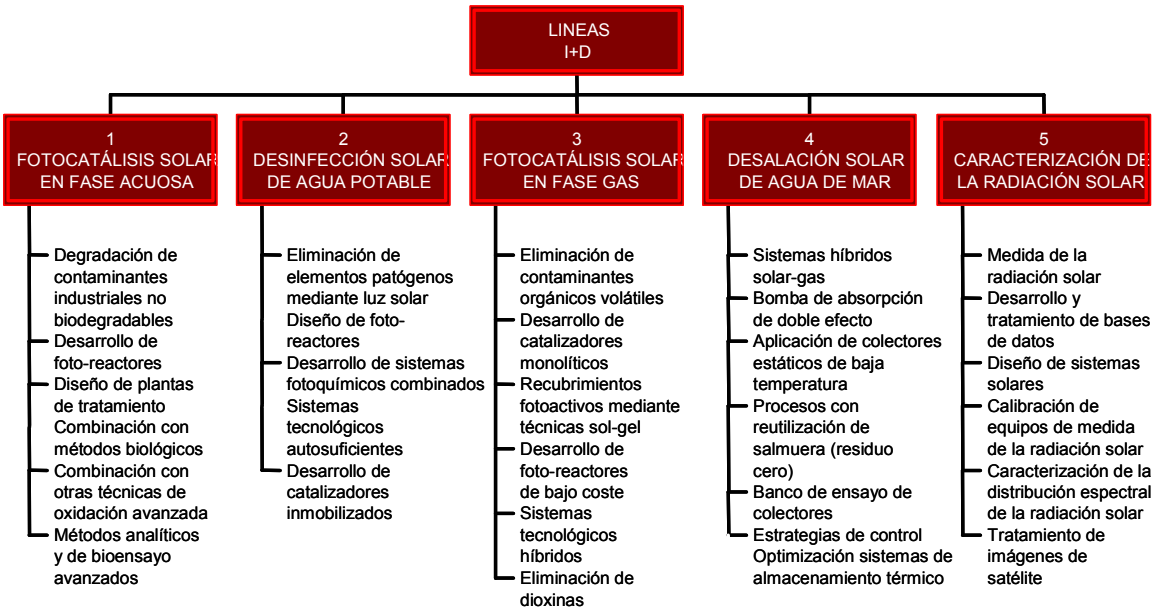


Figura 67. Estructura temática, líneas de investigación y agrupaciones de conocimiento en la Unidad de Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar

4) Mechanic Power Generation based on Solar Heat Engines (POWERSOL)
5) Seawater desalination by innovative solar-powered membrane-distillation system (MEDESOL)
6) Desarrollo de nuevos sistemas de eliminación de gases tóxicos y corrosivos generados en depuradoras de aguas residuales (DETOX-H2S)

Estos proyectos, que abarcan la mayoría de las líneas de investigación de la unidad, permitirán tanto una profundización en los distintos desarrollos tecnológicos asociados a las actividades como un incremento del amplio conjunto de grupos de investigación con los que se colabora estrechamente.

En lo referente a la actividad propiamente realizada durante el año 2005 hay que destacar, en el campo de la detoxificación solar, el continuo y creciente interés, tanto científico como industrial, hacia esta aplicación de la luz solar. Una prueba de ello ha sido la instalación de una nueva instalación industrial en la empresa DSM-Deretil, en el marco del proyecto CADOX, basada en la tecnología ya utilizada en otras plantas anteriores [Blanco y Malato, 2005c, 2005d], los múltiples contactos existentes para el desarrollo de otras instalaciones semejantes o la intensa actividad realizada para la difusión de estas técnicas o tecnologías [Blanco y Malato, 2005b, 2005c, 2005d; Malato y Blanco, 2005g, 2005h, 2005i].

En el campo de la desinfección solar es de destacar la conclusión de los proyectos SOLWATER y AQUACAT, que han permitido desarrollar un sistema combinado (mediante la generación de diferentes especies oxidantes) para el control de elementos patógenos presentes en agua de consumo humano que se ha ensayado con éxito en México, Perú, Argentina, Marruecos, Túnez y Egipto. Aunque los resultados han sido altamente satisfactorios, estos sistemas tecnológicos se encuentran aún en una fase preliminar de desarrollo.

La actividad de detoxificación en fase gas también ha tenido un importante empuje durante 2005, lo que ha permitido la consolidación definitiva del grupo de personas que se dedican a su investigación. Las investigaciones desarrolladas en este campo han constatado el interés creciente de determinadas empresas hacia las posibilidades de estas tecnologías para la eliminación de olores y contaminantes gaseosos en general, especialmente en los casos de tratamiento de gases problemáticos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas.

Sin duda el área que ha tenido un incremento de actividad más importante durante 2005 ha sido la de desalación solar. Efectivamente, la problemática cada vez más acuciante asociada a la escasez de agua, tanto en nuestro país como en muchos otros en todo el mundo, unido a clara sinergia existente entre este problema y la disponibilidad de elevados niveles de radiación solar, hacen que las perspectivas y posibilidades para la investigación y el desarrollo de estas tecnologías sean cada vez más prometedoras. En este sentido cabe destacar la culminación, después de 4 años de desarrollo, del proyecto AQUASOL que ha permitido dotar a la PSA de una instalación experimental de desalación solar altamente innovadora y que, dada su complejidad y múltiples posibilidades, va a ser una herramienta muy útil para el diseño e implementación práctica de este tipo de sistemas basados en la tecnología MED de destilación multiefecto [Blanco y Alarcón, 2005e]. Asimismo, la futura ejecución de los proyectos MEDESOL y POWERSOL (antes mencionados), permitirá barrer una parte muy importante del espectro de tecnologías disponibles y en las que tiene sentido la incorporación de la energía solar para la desalación de aguas salobres o de mar. La estrategia que se persigue con estas iniciativas, además de los desarrollos científicos y tecnológicos específicos de cada proyecto, es la de dotar a la PSA de un conjunto único de instalaciones experimentales en el campo de la desalación solar, que conviertan a la PSA en un centro de referencia también para este tipo de tecnologías y aplicaciones.

Finalmente también hay que destacar, en el área de actividad de medida y caracterización de la radiación solar, la terminación y puesta en servicio del acceso vía web a los datos proporcionados por la nueva estación meteorológica de la PSA, implementada de acuerdo con las directrices de la red "Baseline Surface Radiation Network". Este acceso se encuentra disponible a través de la dirección: http://meteo.psa.es/, requiriendo simplemente un registro previo. Un segundo aspecto destacable en relación con esta actividad se encuentra relacionado con la situación actual de continuo incremento de interés hacia las tecnologías solares, tanto solar térmica como fotovoltaica, para la instalación de plantas solares de producción de electricidad. Esta situación ha motivado durante 2005 una demanda también cada vez mayor por parte de numerosas empresas para la realización de estudios de potencial solar en emplazamientos concretos, utilizando para ello tanto medidas de superficie como el análisis de imágenes de satélite.

Como conclusión se puede apuntar que se aprecia un claro y continuo incremento de las actividades de la unidad durante los últimos años lo que demostraría claramente, por una parte, el nivel de calidad y prestigio científico alcanzado por el grupo, y por otra, el despegue definitivo que se parece se observa en estas tecnologías como posible respuesta real a la fuerte problemática global que se vislumbra en el horizonte en lo referente tanto al agua como a la energía.

PROCESOS DE DETOXIFICACIÓN SOLAR DE EFLUENTES LÍQUIDOS

Tratamiento Combinado Fotocatálisis-Ozonización (Proyecto 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 [Malato y Blanco, 2005e].

Los objetivos generales del proyecto son los siguientes:

1) Investigación de las sinergias fotocatálisis (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 TiO_2 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 [Augugliaro y col., 2005].

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 de ozonización de aguas con 5 compuestos (Alaclor, Atrazina, Clorfenvinfos, Diuron, Isoproturon) en un aplanta piloto de ozonización construida al efecto (ver Informe Anual de la PSA, 2004). Todos los compuestos fueron degradados exitosamente, no obstante, la desaparición del Carbono Orgánico Total (COT) es otra cuestión: la figura Figura 68 muestra la evolución del COT durante la reacción. Como se puede observar, después de 1000 minutos de reacción, el valor del COT es de 47.9 mg/L (el COT inicial de la solución fue de 64.8 mg/L) lo que significa que sólo el 26% del COT inicial es eliminado. Con estos resultados parece claro que la ozonización no es un buen método para la mineralización total de compuestos no biodegradables. Estos resultados no presentan un serio inconveniente, ya que uno de los objetivos de este proyecto es el estudio de la compatibilidad entre la ozonización y un tratamiento biológico [Farré y col., 2005].

La Figura 68 también contiene datos concernientes a los iones inorgánicos formados durante la reacción, ya que los compuestos iniciales contienen heteroátomos como Cl, N o P, y consecuentemente, la formación de Cl^-, NH_4^+, PO_4^{3-} o NO_3^- es esperable durante la reacción. En el caso del cloruro, la cantidad final detectada fue de 20 mg L^{-1}, que supone un 74.3% de la cantidad máxima esperable si la mineralización estotal. Como la cantidad de COT degradada fue sólo del 26%, es claro que proceso es más efectivo para decolorar que para mineralizar. La cantidad total de ozono consumido a lo largo de la reacción fue de 7.8 g (con una relación de 9.2 g O_3 consumido por gramo de COT degradado). Por lo tanto, la mezcla de compuestos fue tratada con ozono obteniendo una baja degradación de COT y un consumo alto de ozono. No obstante, una parcial mineralización de la solución para un potencial tratamiento secundario en un reactor biológico puede ser suficiente.

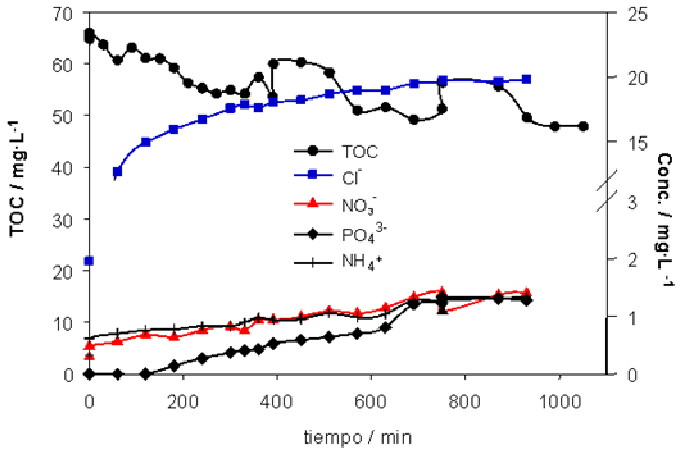


Figura 68. Evolución de las concentraciones de COT, Cl^-, NO^{3-}, PO_4^{3-} y NH_4^+ en función del tiempo durante la ozonización de la mezcla de plaguicidas. Volumen tratado: 50.1 L; Caudal O_2: 200 L h^{-1}; $[O_3]_{fase-gas}$: 26.8 g m^{-3}.

Para profundizar en la posibilidad del acoplamiento entre tratamientos químico-biológicos, se llevó a cabo el test de biodegradabilidad de Zahn-Wellens sobre las muestras generadas después de ozonización a diferentes tiempos. Los 5 compuestos anteriormente descritos son tóxicos y no biodegradables y el test de Zahn-Wellens aplicado a la disolución original de la mezcla de los 5 compuestos no daba degradación de COT después de 28 días. Por lo tanto, todas las muestras utilizadas en el test fueron tomadas después de la completa desaparición de los compuestos iniciales. La figura Figura 69 muestra los datos correspondientes a los tests realizados.

Es importante remarcar que se considera el 70% de degradación de COT como el valor a partir del cual una disolución se considera biodegradable. Como se puede apreciar, después de 28 días de biotratamiento, todas las disoluciones resultan biodegradables. La razón por la cual se ha llevado a cabo el test con muestras de más de 555 minutos de reacción se debe a la posibilidad de la generación de intermedios de degradación tóxicos o no biodegradables. Según los resultados experimentales esa posibilidad puede ser descartada. De este modo, se puede concluir que la mineralización parcial mediante ozonización de la disolución de la mezcla de los 5 compuestos produce una disolución que es potencialmente tratable en una etapa de tratamiento biológico.

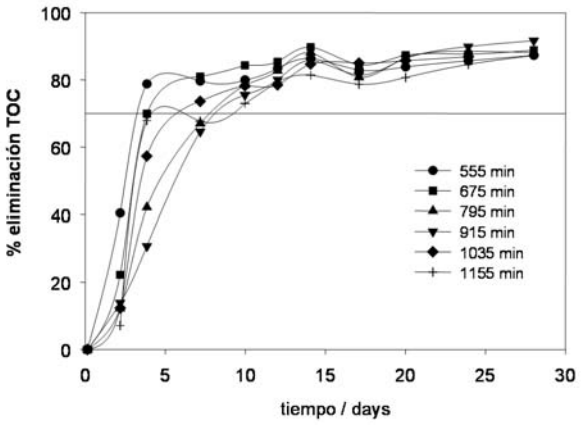


Figura 69. Test Zahn-Wellens de las muestras generadas en ensayo mostrado en figura Figura 68 después de 555, 675, 759, 915, 1035 y 1155 minutos de ozonización

Eliminación de contaminantes persistentes mediante oxidación avanzada (Proyecto Fotodetox).

http://www.psa.es/webesp/projects/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 [Agüera y col., 2005; Perez-Estrada y col., 2005a, 2005b].
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 fotocatálisis. 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 fotocatálisis.
4) Estudio de la biodegradabilidad (mediante fangos activados reales procedentes de diferentes EDAR) de aguas contaminadas con plaguicidas y tratadas parcialmente mediante fotocatálisis.
5) Desarrollo de un biorreactor especialmente adaptado a este tipo de aguas tratadas parcialmente mediante fotocatálisis [Ballesteros y col., 2005].
6) Prediseño de una planta de tratamiento de aguas, mediante fotocatálisis solar, con el objetivo de pre-tratar aguas conteniendo contaminantes persistentes y hacerlas compatibles con los requerimientos de entrada de una EDAR municipal.
7) Durante el primer año (ver Informe Anual de la PSA, 2004) 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. Se han puesto a punto las técnicas analíticas necesarias para evaluar su degradación y se

ha comprobado la no biodegradabilidad de aquellos seleccionados. Además, se realizó el estudio de viabilidad de fotocatálisis con TiO_2 de cada plaguicida en planta piloto solar [Oller y col., 2005b].

Durante 2005 se ha realizado un estudio de viabilidad de fotocatálisis con TiO_2 de mezclas de plaguicidas (Metomilo, Cimoxanilo, Oxamilo, Dimetoatoy Pirimetanil) y seha comenzado el estudio de cada uno de ellos mediante Foto Fenton. La degradación de cada uno de estos contaminantes se analiza mediante HPLC-UV, siendo la medida la correspondiente a la mezcla en cada momento. En Figura 70 y Figura 71 se observa cómo todos los plaguicidas desaparecen por completo al cabo de aproximadamente 420 min, siendo un poco más resistente a la degradación el Pirimetanil, resultados concordantes con lo obtenido en los experimentos individuales de cada plaguicida descritos en Informe Anual de la PSA 2004.

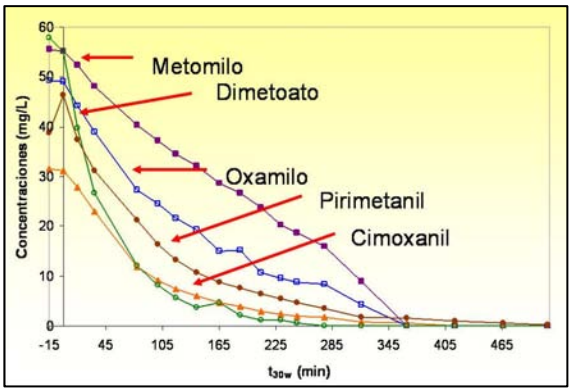


Figura 70. Degradación fotocatalítica (TiO_2) de mezcla de plaguicidas. Evolución de cada uno de los plaguicidas en la mezcla

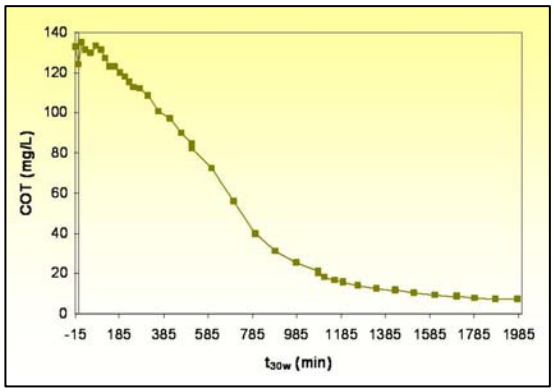


Figura 71. Degradación fotocatalítica (TiO_2) del carbbono orgánico total de la mezcla

Por otro lado el seguimiento del COT pone de manifiesto una mineralización incompleta, al cabo de aproximadamente 33 horas de tratamiento fotocatalítico queda un COT residual de unos 7 mg/L. Puesto que en la mezcla se encuentran compuestos que contienen en su estructura nitrógeno, azufre y fósforo, se analizó también la liberación de los mismos en forma de nitrato, amonio, sulfato y fosfato. Como se puede observar, el balance de nitrógeno no se cierra completamente, aunque se llega a una concentración de nitrógeno total presente en forma de nitrato y amonio, muy próxima a la esperada. En cuanto a los balances de azufre y fósforo se han cerrado completamente, todo el azufre y el fósforo se ha oxidado a sulfato y fosfato.

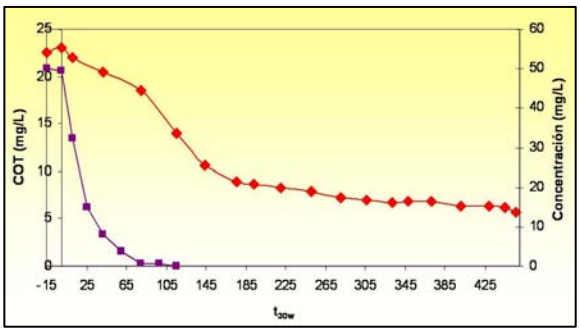


Figura 72. Degradación mediante foto-Fenton de cimoxanilo

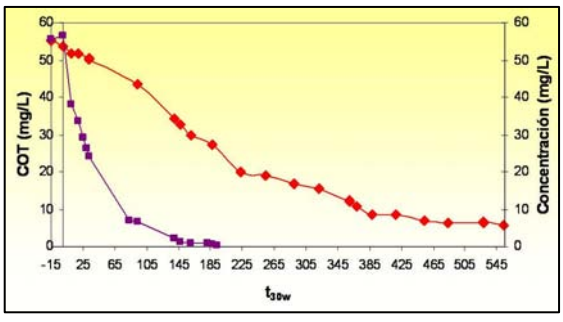


Figura 73. Degradación mediante y de oxamilo

Mediante foto-Fenton, se ha estudiado por ahora cimoxanilo y oxamilo (Figura 72 y Figura 73). Se ha trabajado a temperatura controlada de 30ºC y pH entre 2.5 y 3 utilizando 20 mg/L de Fe^{2+}. La degradación de cimoxanilo ha sido completa (a velocidad notablemente mayor que con TiO_2). Mineralización incompleta (COT residual del mismo orden que con TiO_2). Balance de nitrógeno incompleto. La degradación de oxamilo ha sido completa (también a velocidad notablemente mayor que con TiO_2). Mineralización más elevada que con TiO_2, alcanzándose un COT residual del orden de 2 mg/L. El balance de nitrógeno ha sido similar al del cimoxanilo.

Tratamiento de aguas conteniendo contaminantes orgánicos persistentes mediante combinación de procesos de oxidación avanzada y biológicos (Proyecto 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. Se ha demostrado que todos los compuestos objeto de este trabajo pueden ser tratados exitosamente mediante foto-Fenton, TiO_2 y ozono. Durante 2004 se instalaron dos prototipos construidos (uno en la PSA y otro en INETI, Portugal) durante el proyecto y cuyas características principales se mostraron en Informe Anual de la PSA de 2004. Durante 2005 se trabajó [Hincapié y col., 2005a, 2005b] con estos prototipos con el objetivo de conseguir los parámetros básicos necesarios para diseñar y construir la planta de demostración que es el objetivo final del proyecto. Esta planta se ha concluido a finales de 2005.

Las principales conclusiones de los experimentos realizados con los prototipos fueron las siguientes:

1) La reactividad de los compuestos tratados mediante los dos procesos de oxidación avanzada ensayados (foto-Fenton y TiO_2) fueron muy similares.
2) En el caso de la atracina y los plaguicidas de la familia de las fenilureas siempre queda un remanente de TOC al final del tratamiento, debido a la estabilidad del anillo triacínico y a la urea que se forma durante la degradación fotocatalítica.

Tabla 4. Selección de la mejor combinación de tratamientos para la planta de demostración

		Foto-Fenton	TiO_2	Ozono	Biotratamiento
Escala de Laboratorio	Plaguicidas	Mineralización a 56 mg Fe/L	No se alcanza mineralización	Resultados no concluyentes	Biodegradabilidad adecuada después de pre-tratamiento
	Femam	Mineralización a 56 mg Fe/L	No se alcanza mineralización	Resultados no concluyentes	-
Evaluación		++	+	NA	++
Escalado	Plaguicidas y FEMAC	Se puede evitar la resuperación del catalizador trabajando a baja con. de Fe	Recuperación de catalizador posible, pero cara	Ozono es eficiente si la DQO es ≤ 500 mg/L	Bioreactor de lecho fijo opción más adecuada
Evaluación		+	-	+	+
Prototipos	Plaguicidas	Se consigue encontrar el punto correcto de biodegradabilidad	El punto correcto de biodegradabilidad conlleva mucho tiempo	Se consigue encontrar el punto correcto de biodegradabilidad	Mediante bioreactor de lecho fijo se consigue depurar hasta el final
	FEMAC	Se consigue encontrar el punto correcto de biodegradabilidad	El punto correcto de biodegradabilidad conlleva mucho tiempo	Se consigue encontrar el punto correcto de biodegradabilidad	Mediante bioreactor de lecho fijo se consigue depurar hasta el final
Evaluación		**++**	**-**	**+**	**++**
Selección		**+ photo-Fenton**		**+ ozone**	**+ biological**

3) La fotocatálisis mediante TiO_2 precisa de un mayor tiempo de tratamiento que mediante foto-Fenton para alcanzar un grado de mineralización similar.
4) La evolución del pH durante el tratamiento mediante TiO_2 depende del grado de cloración de las moléculas tratadas (el ácido clorhídrico generado disminuye el pH) y del contenido en nitrógeno orgánico, que se trasforma generalmente en amonio y que por tanto tiene un efecto contrario.
5) La biodegradabilidad se alcanza cuando la decloración es completa.
6) La ozonización produce una mineralización muy reducida en los plaguicidas, pero sin embargo se alcanza la decloración completa. Todo ello con un tiempo de reacción prolongado.
7) La mineralización de los disolventes clorados es únicamente alcanzada mediante foto-Fenton, y difícilmente mediante TiO_2. En este caso el acoplamiento con un tratamiento biológico no es pertinente, ya que se produce la mineralización completa simultáneamente ala decloración. Tanto mediante ozonización como mediante TiO_2 se producen grandes pérdidas de contaminantes a la atmósfera por volatilización [Malato y col., 2005f].
8) Basándose en los datos de eliminación, mineralización y biodegradabilidad obtenidos durante la experimentación en laboratorio y planta piloto [Gernjak y col., 2005a, 2005b; Malato y col., 2005a, 2005b, 2005c, 2005d; Maldonado y col., 2005a, Oller y col., 2005a; Rodríguez y col., 2005], los resultados positivos y negativos se resumen en la tabla siguiente. Esta tabla proporciona la información clave para la selección del mejor sistema de depuración desarrollado en proyecto CADOX.

A partir de estas conclusiones se realizó una campaña de ensayos con aguas reales del usuario final (DSM-DERETIL) para conseguir los parámetros de diseño de la planta de demostración. Estos experimentos se circunscribieron a tratamientos mediante foto-Fenton y ozonización como paso previo a un bioreactor de lecho fijo, utilizando biomasa de la planta de tratamiento de DSM-DERETIL. Femac (550 mg/L, compuesto no biodegradable) se degradó por completo con un consumo de peroxido de hidrógeno de 30-35 mM (Figura 74).

Durante los ensayos también se determinó el estado de oxidación medio (relación entre demanda química de oxígeno y carbono orgánico total), alcanzándose un valor constante de éste aproximadamente en el mismo instante en que Femac había sido completamente degradado. Este punto también coincidía con el momento dónde el agua ya era biodegradable, según se determinó mediante el test de Zahn-Wellens. De la misma forma, se consiguió degradar Femac mediante ozonización, pero después de un tratamiento más prolongado (700 min, aproximadamente) y con un consumo de ozono de alrededor de 2 mg de O_3 por mg de Femac. De la misma forma que mediante el tratamiento de foto-Fenton, durante la ozonización se alcanza la biodegradabilidad cuando Femac es completamente descompuesto. Además de demostrarse la biodegradabilidad mediante el test de Zahn-Wellens, se alimentó un bioreactor en lecho fijo con el efluente de ambos tratamientos durante varios meses. Este bioreactor se operó en estas condiciones, alcanzándose una biodegradación mayor del 80%.

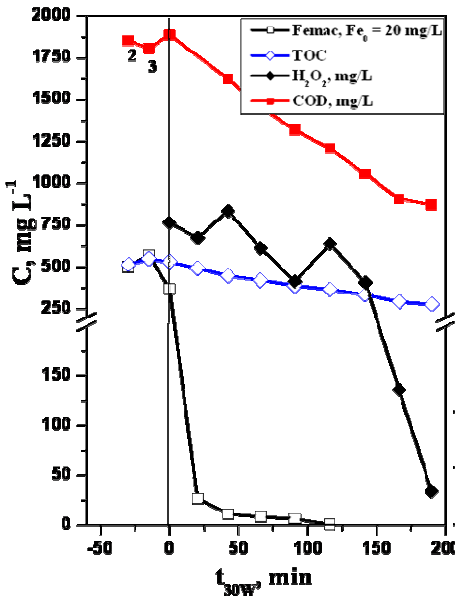


Figura 74. Degradación mediante foto-Fenton aguas procedentes de DSM-DERETIL

Con estos resultados (de los cuales se muestran aquí únicamente unas pinceladas muy resumidas) se diseñó la planta de demostración que consta de 100 m^2 de CPCs (unos 1300 L de volumen iluminado) con un tanque de recirculación de 3000 L, un ozonizador con 2 columnas de contacto (Ø800- h 2500 mm y Ø500- h 2100 mm), en serie, que es capaz de producir hasta 1 g O_3/h y un biotratamiento formado por diferentes tanques (neutralización , acondicionamiento, bioreactor) en los que la biomasa está fijada en un relleno de unos 700 L. La planta se ha terminado de construir a finales de 2005, y se ensayará durante 2006. La figura Figura 75 muestra diferentes componentes de la planta de demostración.

PROCESOS DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA POTABLE

Desinfección solar de agua potable (Proyecto 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 nº: 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 [Fernández-Ibáñez *y col.*, 2005a; Rincón y Pulgarín, 2005; Sarria y col., 2005a, 2005b]. 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 inmobilizado sobre una matriz inerte para generar radicales hidroxilo ($^{\bullet}OH$) y el segundo es la generación de oxígeno singlete ($^1O_2$) a partir de un foto-

Figura 75. **Sistema de ozonización y bioreactor de lecho fijo (izquierda), y sistema de colectores solares (derecha) de planta de demostración de proyecto CADOX.**

sensibilizador 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.

Para llevar cabo el desarrollo de este sistema final, se han diseñado y construido diversos prototipos (, izquierda) 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 (Figura 76, derecha). En ambos casos, la óptica utilizada estaba basada en colectores solares tipo CPC de 1 m^2 de área captadora. A su vez, para cada uno de estos conceptos de fotorreactor se han utilizado dos catalizadores distintos: TiO_2 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 [Sichel *y col.*, 2005a]. Durante el año 2005 se ha procedido al ensayo de estos prototipos utilizando E. Coli como referencia para estudiar la eficiencia desinfectante de los diferentes sistemas.

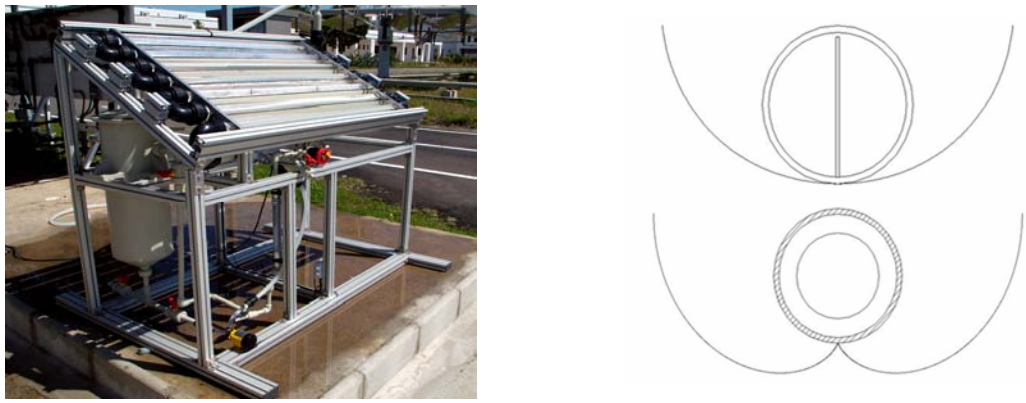


Figura 76. Prototipo de reactor solar para desinfección de agua con catalizador inmovilizado sobre dos tipos de soporte (placa plana o tubo concéntrico, ver dcha.) dispuestos en el interior del tubo de vidrio

Uno de las tareas principales del CIEMAT en este proyecto fue determinar experimentalmente las condiciones óptimas de operación, es decir, aquellas que permitan desinfectar el agua con eficacia y con el menor coste de tiempo y energía posible. Por ello, se analizaron los parámetros de operación principales que afectan al proceso en el fotoreactor. En este sentido, se llevaron a cabo diversos experimentos de desinfección de agua conteniendo *Escherichia coli*, a una concentración inicial de 10^7 CFU/mL, en tres condiciones de caudal: 2, 5 y 10 L/min. La Figura 77 muestra que la desactivación de E. coli tiene lugar de forma más rápida cuando el reactor trabaja a 2 L/min que a 5 y 10 L/min. Durante la fotocatálisis, los procesos de interacción (adsorción) del agente a destruir con la superficie del catalizador juegan un papel fundamental; por ello es de esperar que las mejores eficiencias de desinfección fotocatalítica se produzcan cuando las condiciones de interacción entre la bacteria y el catalizador sean óptimas esto es, a bajos caudales de recirculación de fluido dentro del reactor [Sichel *y col.*, 2005b]

Asimismo, se llevaron a cabo experimentos de degradación fotocatalítica de un compuesto orgánico modelo, el ácido gálico. Las concentraciones a las que se trabajó con este contaminante fueron relativamente bajas (20 y 50 mg/L), debido a que en esas concentraciones se suelen dar los niveles de contaminación de ácidos húmicos en aguas naturales subterráneas [Gumy y col., 2005]. La Figura 78 (izquierda) muestra los resultados de degradación de ácido gálico en el foto-reactor antes descrito con papel de Ahlstrom KN47 recubierto de dióxido de titanio (20.7 g/m^2) en el soporte concéntrico. El grado de degradación del compuesto a dos concentraciones iniciales diferentes es muy distinto. Cuando la concentración inicial es de 20 mg/L se produce un mayor grado de adsorción

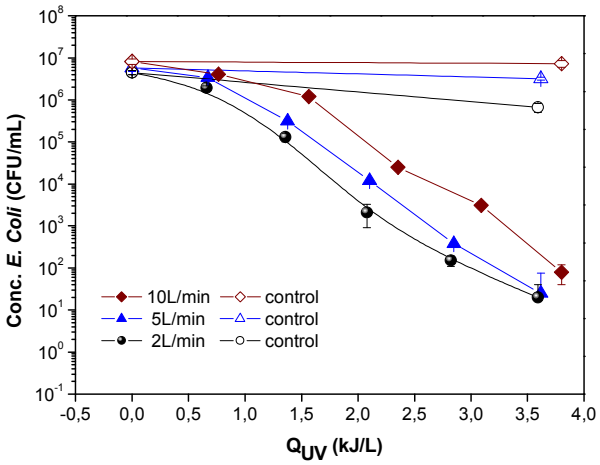


Figura 77. **Eficiencia fotocatalítica de TiO_2 sobre papel de Ahlstrom KN47 a tres caudales distintos del reactor: 2, 5 y 10 L/min. La evolución en la concentración de E. coli es representada frente a Q_{UV} (energía UV introducida en el interior del fotorreactor por unidad de volumen del mismo)**

del compuesto orgánico sobre el catalizador que cuando éste tiene una concentración inicial de 50 mg/L, razón por la cual el proceso tiene una mayor eficiencia en el primer caso frente al segundo. También se realizó una comparación del comportamiento fotocatalítico de las dos configuraciones del reactor, la del soporte plano y la del concéntrico. La Figura 78 (derecha) muestra los resultados de degradación de ácido gálico para ambos sistemas (concentración inicial: 30 y 35 mg/L). La concentración de gálico se representa frente a la energía UV acumulada en el reactor por unidad de volumen (Q_{UV}). De esta figura se deduce que la concentración de orgánico baja más rápidamente con la configuración de soporte plano; de hecho, esta configuración presenta, si se compara con la del soporte concéntrico, un mayor volumen iluminado de agua dentro del reactor, lo que permite un mejor aprovechamiento de los fotones entrantes en el sistema y de los correspondientes radicales generados en el catalizador iluminado [Sichel *y col.*, 2005b y 2005c].

En función de los resultados experimentales obtenidos por la PSA [Fernández-Ibáñez y col., 2005b y 2005c], conjuntamente con los de otros participantes en el proyecto (UCM, NTUA, EPFL y LACE), se ha diseñado el sistema final que, en el marco del proyecto SOLWATER, ha sido ensayado a lo largo del año 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 socioeconómicos y de latitud solar diferentes. La Figura 79 muestra dos fotos de dos reactores

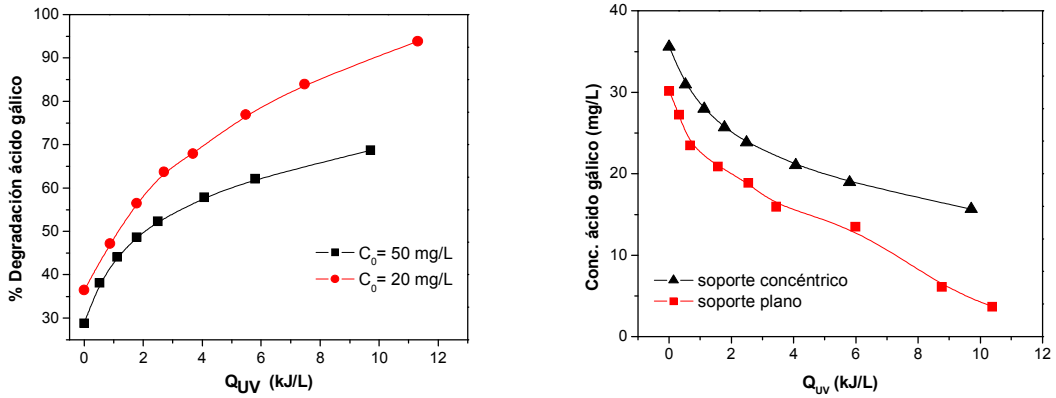


Figura 78. **Degradación fotocatalítica de ácido gálico en un reactor CPC solar con TiO2 inmovilizado sobre papel de Ahlstrom catalizador KN47, 20.7g/m2 TiO2-PC500. Izquierda: soporte concéntrico, concentración inicial de ácido gálico 20 y 50 mg/L,. Derecha: soportes concéntrico y plano, concentración inicial: 30 y 35 mg/L**

finales instalados en Jiupetec (México) y Tucumán (Argentina) para llevar a cabo los ensayos de campo.

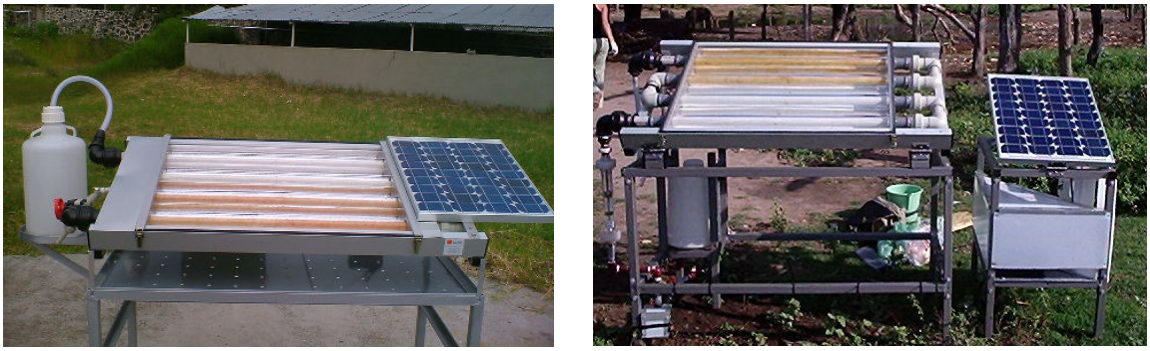


Figura 79. Vista del sistema final desarrollado preparado para su ensayo en México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (izda.) y en Argentina, Comisión Nacional de Energía Atómica (dcha.)

Detoxificación y potabilización de agua mediante fotocatálisis en países semi-áridos (Proyecto 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 y Túnez [Chapelon y Herrmann, 2005].

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 1700 k€ con una contribución de la Comisión Europea de 1000 k€.

En el proyecto AQUACAT el sistema final de desinfección de agua por fotocatálisis solar fue desarrollado, fabricado e instalado en tres países norteafricanos Túnez, Marruecos y Egipto. La Figura 80 muestra dos fotos de los reactores instalados en la Escuela de Ingenieros de Fez (Marruecos) y en el Photoenergy Center de El Cairo (Egipto), con los que se han llevado las respectivas campañas de ensayos de campo con aguas reales.

Figura 80. Vista del sistema final desarrollado preparado para su ensayo en Marruecos, Ecole Supérieure de Technologie de Fes, (izda) y en Egipto, Photo Energy Center, Cairo (dcha)

Tecnologías emergentes para tratamiento de agua en países en vías de desarrollo (Proyecto Solarsafewater)

http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/ssw/indesp.htm
http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/index.html

El *Proyecto Tecnologías Emergentes para Estudiar los Problemas de Tratamiento de Agua en Países en Desarrollo* (SOLARSAFEWATER, Proyecto FP6-510603 del Sexto Programa Marco de la Unión Europea) tiene como objetivos:

- Dar a conocer los resultados más recientes y promover la transferencia, aprovechamiento y evaluación de las tecnologías fotocatalíticas solares para la descontaminación y desinfección del agua, aplicadas a áreas rurales de países en desarrollo.
- Contribuir al desarrollo del trabajo regional en redes con recursos humanos capacitados, integrados con la participación europea, en el tratamiento solar del agua.
- Explorar posibles actividades comunitarias futuras de Investigación y Desarrollo de Tecnología (Research and Technology Development, RTD) en relación a pruebas piloto usando la tecnología desarrollada en el Proyecto SOLWATER (Tecnología Fotocatalítica Solar Económica para la Descontaminación y Desinfección del Agua en Áreas Rurales de Países en Desarrollo).

La iniciativa SOLARSAFEWATER se relaciona con el tratamiento de purificación de aguas hasta llegar a los niveles de aguas potables. La implementación de estas Actividades de Apoyo Específicas permite intercambiar la experiencia y conocimientos de equipos activos de I+D y contribuir a la difusión del conocimiento acerca de este tema, especialmente para su aplicación en áreas rurales y de periferias urbanas de países del tercer mundo. Con este propósito, SOLARSAFEWATER ha desarrollado dos actividades clave:

- Un **Curso** sobre *Posibilidades para la Provisión de Agua Segura Usando Nuevas Tecnologías*. El curso tuvo lugar en Puerto Iguazú (Misiones, Argentina) los días viernes 14 y sábado 15 de octubre de 2005. El evento, de dos días, incluyó conferencias técnicas sobre las características de las nuevas tecnologías disponibles para obtener agua segura, en particular aquellas que aprovechan la luz solar. Estuvo dirigido a jóvenes científicos e ingenieros, con una asistencia aproximada de unas 50 personas de casi todos los países de Latinoamérica. Las presentaciones del curso así como los textos elaborados por los profesores se encuentran disponibles en la página web del evento [Fernández-Ibáñez, 2005a; Blanco, 2005a.

Figura 81. Vista de la página web de los eventos asociados al proyecto SOLARSAFEWATER (http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/ssw/indesp.htm)

- Un **Simposio**, a continuación del Curso, estuvo dirigido a científicos e ingenieros que trabajan en el tema, para discutir *El Desafío de la Provisión de Agua Potable Segura: Tecnologías para la Región de Latinoamérica*. El idioma central del Simposio fue el Español, pero las ponencias y Conferencias se dictaron en el idioma original del expositor. El Simposio fue un evento de 3 días (17, 18 y 19 de Octubre de 2005) para discutir el estado de avance de la tecnología fotocatalítica y otras Tecnologías Avan-

zadas de Oxidación (TAOs) para la purificación de agua y para dar a conocer las capacidades de las tecnologías disponibles entre usuarios potenciales y Pequeñas y Medianas Empresas y Altos Funcionarios de los países cercanos. La participación de los miembros del proyecto SOLWATER proporcionó un entorno adecuado para realizar una evaluación comparativa de las opciones disponibles en referencia a las soluciones técnicas disponibles y a la oferta comercial del mercado. El Simposio, partiendo de la base de los resultados del Proyecto SOLWATER, ha servido para explorar posibles actividades futuras de investigación, incluyendo pruebas piloto sobre la tecnología fotocatalítica solar desarrollada y/u otras opciones posibles. El Simposio también resultó de utilidad para explorar la posibilidad de expandir la red de trabajo establecida con la Red Iberoamericana de Fotocatálisis del CYTED, para incluir la participación Europea en general. El Simposio incluyó varias Conferencias Plenarias, Conferencias Invitadas, Ponencias en forma de posters, y Mesas Redondas de discusión de temas específicos.

PROCESOS DE DETOXIFICACIÓN SOLAR EN FASE GASEOSA

Destrucción fotocatalítica de gases en cabinas de adhesivado y desengrasados metálicos (CMP)

La nueva regulación de las emisiones industriales de compuestos orgánicos volátiles (COV´s), que entrará en vigor en el año 2007 siguiendo la directiva de la Unión (1999/13/CE), establece unos límites mucho más estrictos para las cantidades de estos contaminantes que pueden ser liberadas a la atmósfera. La mayor preocupación por la presencia de estas sustancias en el aire se debe no sólo a su toxicidad intrínseca, sino también a su participación en la reacciones fotoquímicas que generan ozono troposférico. En consecuencia existe una demanda creciente de nuevos sistemas de control de contaminantes que permitan cumplir con las exigencias legislativas, sin necesidad de realizar inversiones elevadas por parte de las empresas de los sectores implicados (textil, calzado, fabricación de pinturas, barnices…). En este contexto, la compañía CMP S.L, dedicada a la producción de componentes para el sector del automóvil en sus factorías de la La Rioja y Navarra, ha financiado un proyecto para el desarrollo de un sistema para el tratamiento de las emisiones de disolventes alimentado por energía solar. Los estudios correspondientes han sido llevados a cabo por el grupo de Destoxificación Solar en Fase Gaseosa en colaboración con el Departamento de Ingeniería de los Procesos Catalíticos del ICP-CSIC.

La fuente de las emisiones de CMP S.L. es la evaporación forzada de los disolventes empleados en los procesos de adhesivado y desengrase de las piezas manufacturadas. Puesto que la composición y concentración de las emisiones condicionan la elección del método de tratamiento, como paso previo se procedió a la caracterización analítica del efluente. Para ello se empleó un microcromatógrafo de gases y realizaron diversos muestreos en planta que permitieron establecer que las emisiones estaban constituidas por compuestos aromáticos (tolueno, xileno), y cantidades menores de clorados (tetracloroetileno, diclorometano) y oxigenados (butanol, metil-etilcetona...). La concentración media de las emisiones se situó en torno a las 100 ppmv.

Con estos parámetros, en una primera fase se valoró la viabilidad de realizar un tratamiento fotocatalítico de las emisiones empleando un foto-reactor solar diseñado para el empleo de los catalizadores cerámicos sintetizados en el ICP-CSIC. Con este objetivo se realizaron ensayos de oxidación fotocatalítica de algunos contaminantes representativos (tolueno y tricloroetileno). Sin embargo, las eficiencias obtenidas en las condiciones requeridas para el tratamiento de las emisiones reales no fueron lo suficientemente elevadas como para garantizar el cumplimiento de la futura normativa. En consecuencia, y

teniendo en cuenta además el considerable incremento de caudal ocasionado por la centralización del sistema de extracción de gases en la planta, se descartó el empleo de fotocatalizadores para el tratamiento de estos efluentes. Como método alternativo se propuso el uso combinado de procesos de adsorción de contaminantes y de combustión catalítica. Esta nueva estrategia consiste en un proceso cíclico en el que primeramente se concentran los compuestos orgánicos reteniéndolos en el lecho de adsorbente, y una vez que se alcanza la saturación se procede a su desorción empleando un caudal reducido de aire caliente que posteriormente los conduce al lecho catalítico donde se lleva a cabo la combustión. Con objeto de mantener la continuidad del proceso de descontaminación es necesario el empleo de un sistema de doble lecho de adsorbente, de tal manera que mientras uno de ellos está acumulando orgánicos, el segundo se encontraría en la etapa de regeneración. La energía térmica necesaria para los procesos de desorción y oxidación catalítica se aportaría por medio de colectores solares cilindro parabólicos, PTC. Un esquema del sistema propuesto se puede observar en la Figura 82.

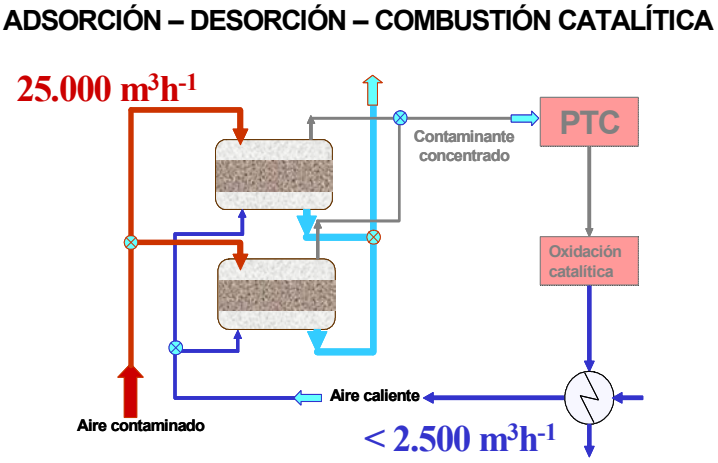


Figura 82. **Esquema del sistema de tratamiento de gases propuesto para la empresa CMP S.L. basado en procesos de adsorción-desorción y combustión catalítica con aporte de energía térmica solar.**

Como catalizador se han empleado monolitos que contiene Pt como fase activa y que han demostrado una elevada eficacia en la combustión de tolueno en concentraciones de hasta 3600 ppmv con tiempos de residencia suficientemente reducidos como para su empleo en la planta de CMP S.L. La combustión de compuestos orgánicos es en general un proceso exotérmico y este hecho puede ser utilizado para recuperar el calor generado y favorece el mantenimiento de la reacción durante los periodos transitorios en los que aporte térmico solar puede no ser suficiente.

En cuanto al adsorbente se han ensayado diferente materiales porosos en forma de monolito y como extruidos. Los resultados más satisfactorios se obtuvieron con monolitos de carbón activado que permitieron retener hasta 70 mg de tolueno por gramo de adsorbente en dinámico y a una temperatura de 35ºC. La desorción de este orgánico puede realizarse calentando el lecho hasta una temperatura superior a 80ºC. Por otra parte en los ensayos realizados con el PTC instalado en el Ciemat en Madrid se consiguió calentar por encima de los 250 ºC una corriente de aire de 30 L/min. empleando un solo modulo de 2.25 m de longitud con el tubo absorbente sin cubierta de vidrio y con una radiación global en torno a 700 W/m^2.

Los experimentos realizados para comprobar la eficiencia del acoplamiento entre el sistema de desorción y la combustión catalítica han sido también positivos, pudiéndose comprobar la eficacia del empleo conjugado de ambos métodos para el tratamiento de contaminantes orgánicos volátiles. En consecuencia se plantea una extensión del proyecto para instalar en planta un sistema de demostración que permita determinar la viabilidad del empleo de las tres tecnologías implicadas en el tratamiento de las emisiones: adsorción, combustión catalítica y calentamiento solar.

Desarrollo de métodos alternativos para la preparación de materiales fotocataliticos de alta eficiencia

El objetivo fundamental del presente proyecto es el desarrollo de fotocatalizadores avanzados que permitan satisfacer la creciente demanda de materiales adecuados para el tratamiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Este objetivo es particularmente relevante en el ámbito de la eliminación fotocatalítica de la contaminación en el aire interior, que se encuentra actualmente en una etapa incipiente de desarrollo comercial, con prototipos comerciales que incorporan esta tecnología a los sistemas de aire acondicionado. El fotocalizador más empleado es, con diferencia, el TiO_2, tanto en su fase anatasa o como en forma de mezclas de anatasa y rutilo. Para su aplicación en la depuración de efluentes acuosos el TiO_2 se emplea frecuentemente en forma de polvo. Sin embargo, el tratamiento de gases requiere fotocatalizadores soportados en sustratos de estructuras abiertas que permitan el tratamiento de caudales elevados sin que se produzca el arrastre del componente fotoactivo. Asimismo es deseable que el soporte empleado sea transparente a la radiación utilizada para la activación del fotocatalizador (UVA), ya que esto permitiría un aprovechamiento más eficaz de los fotones incidentes.

Con estos antecedentes, durante el primer año de vigencia la investigación se ha centrado, por una parte en la selección de fotocatalizadores de elevada eficacia basado en TiO_2, y por otro lado en la búsqueda de los soportes que permitan obtener el máximo rendimiento del componente fotoactivo. Los resultados más relevantes han sido los siguientes:

- **Preparación de láminas delgadas de fotocatalizadores sobre vidrio borosilicato**. El vidrio borosilicato es un soporte muy adecuado para los fotocatalizadores ya que conjuga su adecuada transparencia en la región del UVA (ver Figura 83) con una buena afinidad química por TiO_2, que permite una excelente fijación del material fotoactivo. Como consecuencia es relativamente sencillo obtener películas delgadas por el método de inmersión (*dip-coating*). De esta manera se han obtenido láminas delgadas de TiO_2 y TiO_2-ZrO_2 tanto sobre tubitos de vidrio (anillos *Rashig*) como sobre portas de vidrio. Estos materiales han demostrado tener una elevada eficacia en la eliminación de compuestos de diferente naturaleza como el SH_2, el tolueno o el tricloroetileno.
- **Recubrimientos de TiO_2 sobre** soportes **cerámicos porosos.** La adsorción es una etapa fundamental en cualquier proceso catalítico heterogéneo. En general, el incremento de la capacidad de adsorción se traduce en una mayor eficiencia de las reacciones de degradación de contaminantes. Con este planteamiento se han realizado recubrimientos con TiO_2 de soportes cerámicos porosos, basados en el silicato natural sepiolita, empleando diferentes métodos de preparación. La fijación de polvos comerciales de TiO_2 es posible empleando suspensiones de estos materiales en isopropanol

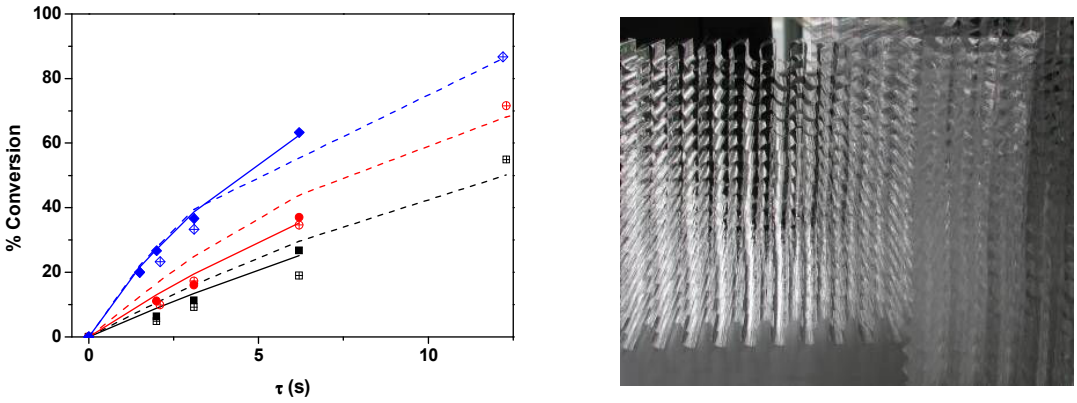


Figura 83. **Izda: Variación de la conversión de TCE con el tiempo de residencia para dos recubrimientos de TiO_2 diferentes (símbolos llenos y vacíos) a diferentes concentraciones de entrada: 30 (rombos), 81(círculos), 142 (cuadrados); Dcha: Monolitos de plástico recubiertos de TiO_2 empleados en estos ensayos.**

al que también se añaden algunos aditivos para aumentar la viscosidad. De manera similar se han depositado capas de TiO_2 empleando soles estabilizados y siguiendo un proceso de *slip-casting*. Los resultados de fotoactividad obtenidos con estos materiales son muy prometedores y parecen confirmar la influencia positiva de la porosidad en el aumento de eficiencia.

- **Obtención de películas fotoactivas sobre soportes poliméricos.** La utilización de sustratos orgánicos presenta como ventajas su ligereza (que puede ser determinante en ciertas aplicaciones), su facilidad de moldeo y su coste relativamente bajo. Si además se selecciona materiales como el PET, que son transparentes en el rango UVA, a priori es posible obtener materiales fotocatalíticos con elevada eficiencia. No obstante la deposición de TiO_2 sobre estos soportes presenta un reto considerable ya que al ser materiales termosensibles no es posible emplear un proceso de calcinación para unir y cristalizar la capa fotoactiva. Por otra parte debido a la considerable hidrofobicidad de los materiales orgánicos es muy difícil fijar películas homogéneas de óxidos metálicos partiendo de un sol de base acuosa. Además, la propia actividad fotocatalítica del TiO_2 o el efecto de la radiación empleada podrían contribuir a la degradación del soporte que eventualmente podría perder transparencia y/o consistencia mecánica. Por esta razón en este estudio se ha propuesto la incorporación de una capa de SiO_2 que sirva de barrera protectora del soporte. En cuanto a la mejora de la adhesión se han ensayado varias estrategias que incluyen la adición de surfactantes y la deposición de polímeros cargados que favorezcan la fijación de las películas inorgánicas. Los primeros resultados obtenidos con estos materiales son bastante prometedores, y recientemente han sido publicados [Benigno Sánchez y col., 2006]. Un ejemplo de la fotoactividad de estos materiales para la degradación de tricloroetileno en función del tiempo de residencia se muestra en la Figura 83. Es importante destacar que estos resultados indican que a pesar de que el TiO_2 no ha sido sometido a un tratamiento a alta temperatura presenta una eficiencia comparable a la obtenida con materiales tratados a más alta temperatura.

PROCESOS DE DESALINIZACIÓN SOLAR DE AGUA DE MAR

Proyecto Aquasol

El principal objetivo de este proyecto europeo es el desarrollo de una tecnología híbrida solar/gas de desalación de agua de mar basada en el proceso de destilación multiefecto (MED) que cumpla al mismo tiempo los principios de eficiencia energética, bajo coste y vertido nulo.

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.

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 ($LiBr/H_2O$) 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 2005 se ha continuado con el desarrollo de la fase de demostración del proyecto concluyéndose la instalación de todos los subsistemas que constituyen la planta de desalación AQUASOL (campo de captadores solares estáticos tipo CPC, tanques de almacenamiento térmico, caldera de gas, bomba de calor por absorción de doble efecto y secador solar avanzado), y cuyo esquema de conexión podemos observar en la Figura 84.

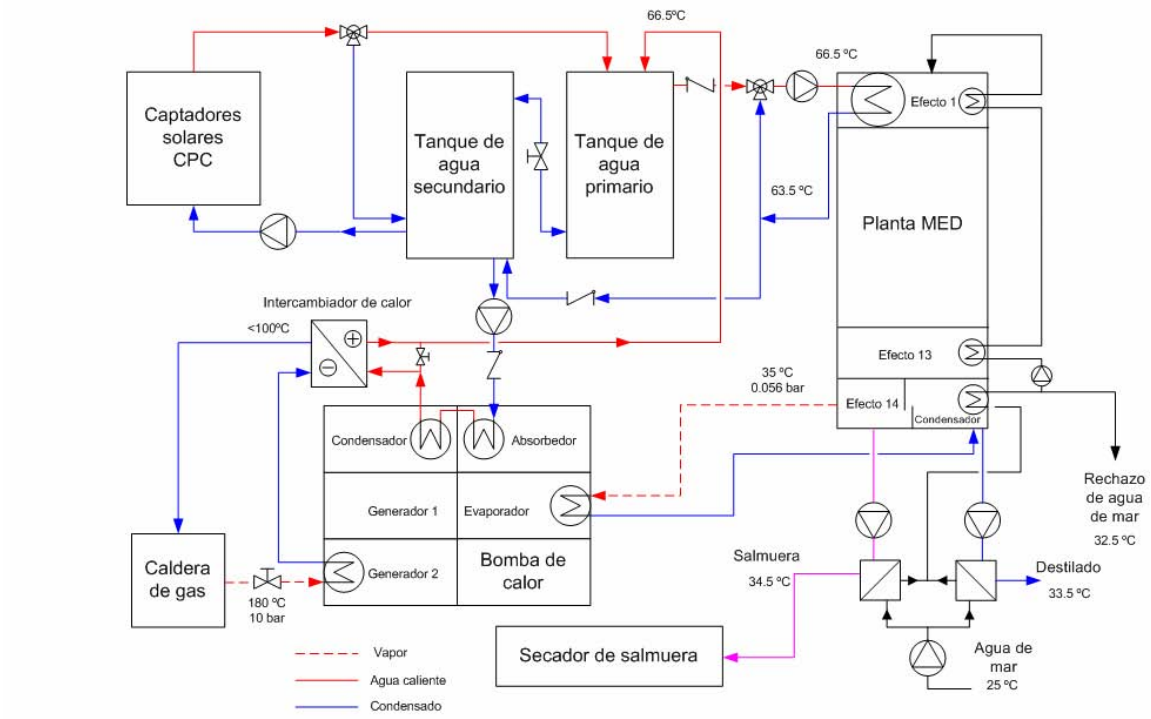


Figura 84. Esquema general del sistema de desalación AQUASOL

El nuevo prototipo de bomba de calor por absorción (LiBr-H_2O) de doble efecto incorpora notables mejoras con respecto al primer prototipo que fue sometido a ensayo en la PSA a comienzos de los años noventa. A diferencia de éste último, en el cual la condensación del vapor producido en el generador de baja temperatura se llevaba a cabo directamente en el primer efecto de la planta MED, el nuevo desarrollo incorpora su propio condensador de baja temperatura, y todas las transferencias de calor tienen lugar a través de intercambiadores de calor internos. El calor cedido en el absorbedor y el condensador de la bomba permite incrementar la entalpía de un caudal de agua líquida, el cual alimenta energéticamente el primer efecto de la planta de destilación. La utilización de agua líquida como fluido caloportador para recibir el aporte térmico de la bomba favorece la utilización de esquemas de suministro híbrido, en donde la energía final requerida por el proceso desalador puede provenir al mismo tiempo del campo de captadores solares y de la máquina de absorción, siendo la proporción de los mismos dependiente del recurso solar disponible en ese momento.

Figura 85. Bomba de calor por absorción (LiBr-H_2O) de doble efecto

Durante este año se han concluido asimismo todas las labores de interconexión hidráulica entre los citados subsistemas así como el diseño e implementación de un nuevo sistema de control que permite operar el sistema completo (planta MED + bomba de calor) desde un único panel. De igual forma se ha finalizado la implementación del sistema de adquisición de datos que permitirá la completa monitorización y posterior evaluación de los datos obtenidos durante la fase experimental.

Figura 86. 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.

Durante la fase de investigación del Proyecto AQUASOL se llevó a cabo el diseño de un secador solar avanzado, cuya finalidad principal es incrementar la concentración de la salmuera procedente de la planta MED hasta alcanzar el punto de saturación del carbonato cálcico (16ºBe, escala Baumé). Este diseño consiste en tres canales de evaporación paralelos (4-m x 17-m), interconectados entre sí, en cuyo interior se lleva a cabo la circulación de la salmuera. Dichos canales están provistos de una cubierta de plástico, una sección de precalentamiento a la entrada, y una chimenea solar en el extremo opuesto, la cual tiene como objeto promover el flujo de aire en el interior de los canales. Dicho dispositivo experimental se ha instalado en las salinas de Kalloni (Isla de Lesbos, Grecia), propiedad de la compañía griega Hellenic Saltworks. Un cuarto canal a cielo abierto ha sido habilitado con objeto de poder llevar a cabo una comparación del comportamiento del nuevo secador solar. Los modelos de simulación prevén un incremento de 2.5 veces en la eficiencia de evaporación, en comparación los estanques de evaporación a cielo abierto de una salinera convencional.

La Figura 88 y Figura 89 muestran los primeros resultados experimentales obtenidos de la evaluación del Sistema AQUASOL. En la primera de ellas se pueden observar la producción de agua destilada y el correspondiente consumo de energía térmica cuando la planta esta funcionando en modo sólo-solar. Para una temperatura de entrada al primer efecto de la planta MED de 71.5ºC, se obtiene una producción media de 3.23 m³/h, con

Figura 87. Secador solar avanzado desarrollado en el Proyecto AQUASOL

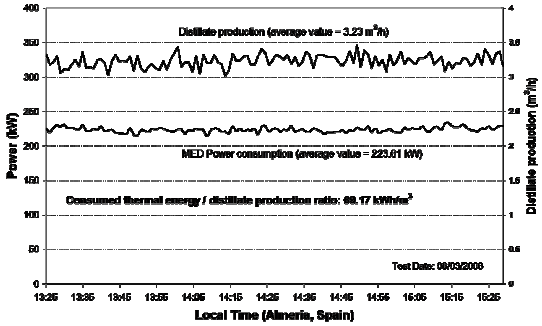


Figura 88. **Producción de destilado y consumo total de energía térmica en la planta AQUASOL (Modo sólo solar)**

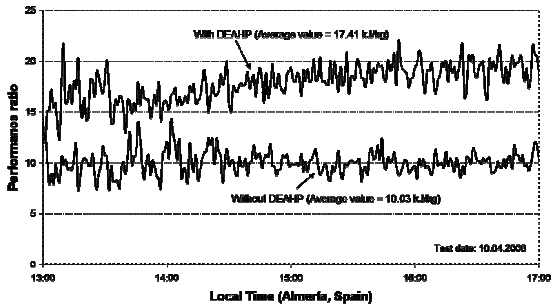


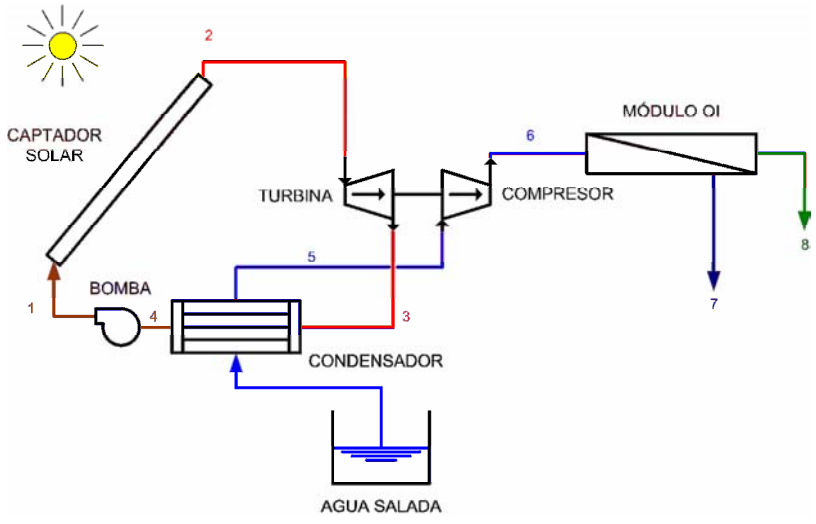
Figura 89. **Factor de rendimiento de la planta AQUASOL con bomba de calor (Modo sólo-fósil)**

un consumo específico de 69.17 kWh_t/m^3. Si la temperatura de entrada se reduce a 68.5ºC, entonces el valor promedio de consumo específico de energía térmica disminuye hasta un valor de 67.8 kWh_t/m^3. La segunda figura muestra el comportamiento de la planta en modo sólo-fósil con la bomba de calor, y permite observar cómo la utilización de dicho dispositivo permite incrementar el factor de rendimiento (kg de destilado producidos por cada 2326 kJ de energía térmica suministrados al sistema) de un valor promedio de 10 hasta un valor aproximado de 20 [Alarcon y col., 2005].

Proyecto OSMOSOL

En el año 2005 ha tenido lugar el comienzo de las actividades dentro de un nuevo proyecto de investigación, financiado por Ministerio de Educación y Ciencia, denominado Proyecto OSMOSOL (Desalación por ósmosis inversa mediante energía solar térmica).

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de una tecnología innovadora basada en la aplicación de la energía solar térmica al proceso de desalación mediante ósmosis inversa que cumpla al mismo tiempo los principios de sostenibilidad medioam-



1. Fluido de trabajo líquido, temperatura mínima y presión máxima [Amoniaco, 30°C – 40 bar]
2. Fluido de trabajo vapor, temperatura y presión máximas. [Amoniaco, 80°C – 40 bar]
3. Fluido de trabajo vapor, temperatura y presión mínimas. [Amoniaco, 30°C – 12 bar]
4. Fluido de trabajo líquido, temperatura y presión mínimas. [Amoniaco, 30°C – 12 bar]
5. Agua salada precalentada.
6. Agua salada a alta presión.
7. Salmuera.
8. Producto.

biental y viabilidad económica. Para ello se pretende utilizar la energía térmica captada y concentrada mediante un dispositivo solar para alimentar un ciclo termodinámico basado en un fluido que vaporice a temperatura relativamente baja y que, acoplado a un sistema turbo-compresor, permita la transformación directa de energía térmica en la energía mecánica requerida por el proceso de ósmosis.

Las entidades participantes en el Proyecto OSMOSOL son: Universidad de La Laguna (Coordinador), CIEMAT y la Universidad Rovira i Virgili. La duración de este proyecto es de tres años situándose su inicio en diciembre de 2005. Los objetivos específicos de dicho proyecto son:

- Selección y modelado de un ciclo termodinámico que alimente la unidad de ósmosis inversa (seleccionando las mejores condiciones termodinámicas de contorno).
- Optimización del sistema solar de desalación para desalar tanto salmuera como agua de mar.
- Sistema genérico de ósmosis inversa acoplado a un motor solar. A la derecha se muestran los estados del fluido de trabajo a lo largo del ciclo y los valores de temperatura y presión para un ejemplo concreto (amoniaco)
- Selección de los distintos subsistemas que constituyen el sistema de desalación.
- Desarrollo y ensayo de un captador solar estático optimizado para esta aplicación.
- Diseño preliminar completo de la tecnología desarrollada con respaldo de gas para un sistema de 100-1000 m³/día.
- Evaluación completa del sistema solar de ósmosis propuesto desde los puntos de vista termodinámico, técnico, económico y ambiental.
- Comparación de la tecnología desarrollada frente a otras técnicas de desalación solares y convencionales.
- Análisis de explotación de resultados.

CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Durante el año 2005, 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.
- Estudio de la distribución espectral de la radiación solar.
- Tratamiento de imágenes de satélite para cálculo de la radiación solar.

A continuación se describen en detalle las actuaciones más relevantes referentes a estas líneas de actividad.

ACCESO A LA INFORMACIÓN RADIOMÉTRICA DEL CIEMAT

Este proyecto se trata de un proyecto cofinanciado con fondos FEDER, fondos del Plan Nacional de I+D+I así como fondos internos. Responde al deseo de disponer de acceso *on line* a datos de radiación solar de calidad fundamentalmente para su aprovechamiento energético en el contexto de las actividades de la PSA en particular y del CIEMAT en general. El comienzo de este Proyecto se remonta a 2001 y se pretende continuar hasta 2010, dependiendo de la disponibilidad de fondos para su mantenimiento.

Desde 2001 a 2004, las principales actuaciones se centraron en la puesta a punto de la información que quería ser distribuida, fundamentalmente: datos de una **nueva estación radiométrica en la PSA** (de alta calidad y en el marco de la BSRN) y datos de radiación solar resultado del **tratamiento de imágenes de satélite**.

En 2004 también se procedió a la instalación de una nueva **estación radiométrica en el CEDER** (Soria), con el fin de mejorar las bases de datos de calidad de radiación solar en España, y mejorar los modelos de tratamiento de imágenes de satélite.

Con todo ello, el Grupo de Radiación Solar dependiente de la PSA, dispone de información procedente de estas tres fuentes.

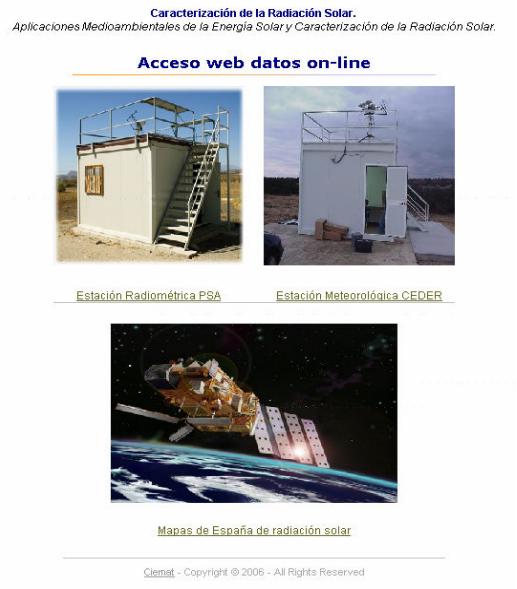


Figura 90. Información disponible en la web.

1) **Estación Radiométrica BSRN de la PSA:**

En cuanto a la estación radiométrica BSRN de la PSA, durante los años 2001 a 2003, se procedió a:

- La selección del emplazamiento óptimo y ubicación de los elementos estructurales.
- Selección de la instrumentación.
- Diseño de la configuración de la adquisición de datos.

Durante 2004, las actuaciones principales estuvieron relacionadas con el diseño de la base de datos y la implementación de las herramientas de explotación, para finalmente en 2005 terminar de depurar las herramientas de explotación y la implementación de filtros.

2) **Estación radiométrica del CEDER (Soria).**

Durante 2005, se ha procedido a la incorporación de la información de esta estación entre los datos generados por el Grupo de Radiación Solar. Si bien se trata de una estación menos dotada instrumentalmente, es de total autonomía por estar configurada con elementos comerciales muy robustos. La información de esta estación es filtrada semanalmente con herramientas externas y volcada al servidor central.

3) **Tratamiento de imágenes de satélite.**

Esta actividad, desarrollada en el contexto de Proyectos del Plan Nacional de I+D+I, se ha venido desarrollando desde 1999. Hasta 2004, las actuaciones se centraron en:

- Desarrollo de la metodología.
- Adquisición y puesta a punto de las bases de datos de satélite.
- Adquisición y puesta a punto de las bases de datos terrestres.
- Desarrollo de modelos de tratamiento.
- Aplicación de los modelos desarrollados al total de las imágenes.
- Generación de resultados.

Durante 2005 se ha procedido a la adaptación de la información para su consulta a través de la aplicación web. La problemática central ha consistido en dotar a la información procedente de la imagen del satélite Meteosat, de una Proyección característica, que posibilite su consulta a partir de unas coordenadas geográficas determinadas.

En la actualidad la aplicación cuenta con un total de 66 usuarios:

- 4 usuarios administradores (2 en PSA y 2 en Madrid). Con privilegios totales de acceso, modificación y control del sistema de adquisición de datos, base de datos y explotación. Se incluye el acceso a datos registrados al segundo.
- 25 usuarios PSA/CIEMAT. Con acceso a los datos promediados al minuto (media, mínima, máxima y desviación estándar) de las variables registradas en las estaciones de medida.
- 37 usuarios externos. Con acceso a datos horarios y diarios registrados en las estaciones de medida.

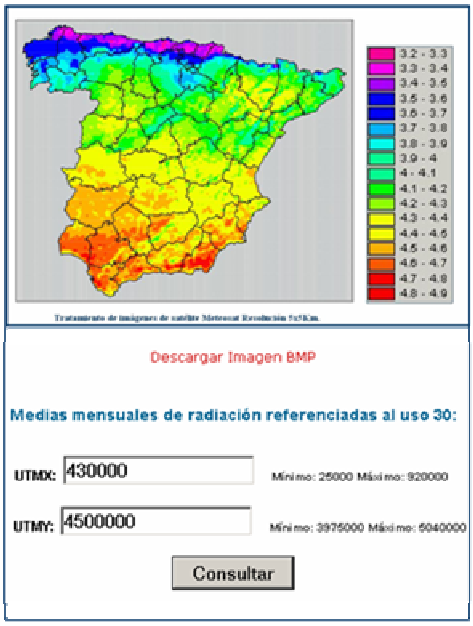


Figura 91. Acceso a la radiación solar calculada a partir de imágenes de satélite.

Mes	Valor Radiación
Enero	2.26
Febrero	3.09
Marzo	4.44
Abril	5.35
Mayo	5.94
Junio	6.80
Julio	6.83
Agosto	6.17
Septiembre	4.73
Octubre	3.62
Noviembre	2.52
Diciembre	1.85

Almería, 12 de Mayo de 2006
Plataforma Solar de Almería
Ciemat

Figura 92. Presentación de las medias mensuales de radiación global diaria sobre superficie horizontal (en kWh/m²y día)en un emplazamiento concreto.

PROYECTO MEDERAS

Se trata de un proyecto cofinanciado a través del Plan Nacional de I+D+I, cuyo nombre completo es: MEDIDA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR Y CARACTERIZACIÓN DE SU INFLUENCIA EN LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA POR DISTINTAS TECNOLOGÍAS. En el contexto de este proyecto, lanzado durante el segundo semestre de 2005, se persiguen como objetivos principales:

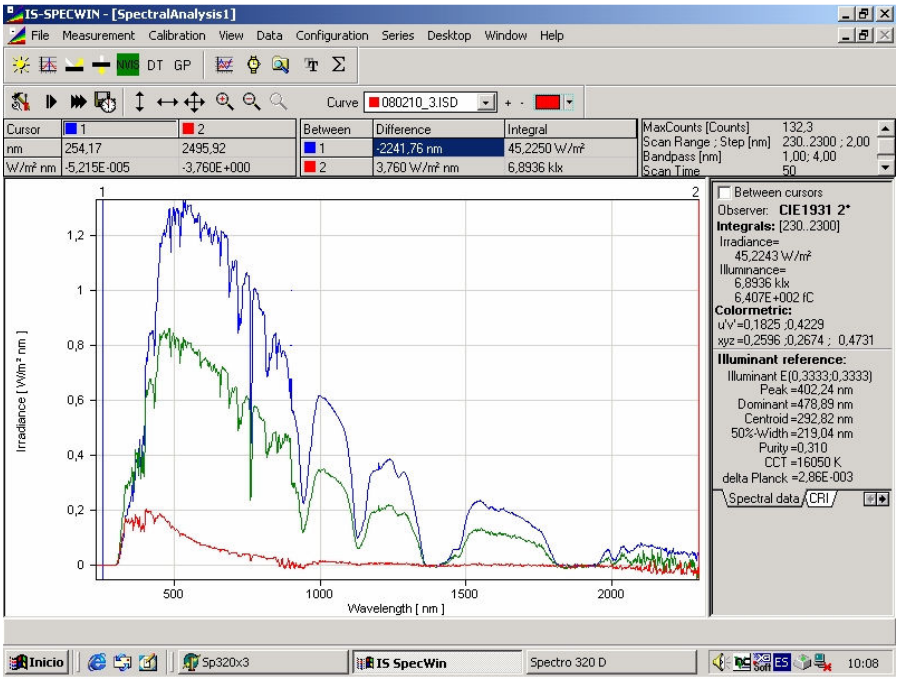


Figura 93. Medidas espectrales registradas en la PSA.

- Desarrollo de metodologías automáticas de filtrado y clasificación de los espectros medidos.

A partir del funcionamiento del espectrorradiómetro de la PSA, se dispone de una extensa base de datos de espectros de radiación solar. Estos espectros, se registran de forma automática obteniéndose 2 espectros de cada una de las componentes de la radiación solar cada hora del día desde la salida hasta la puesta del Sol. Por el contrario, la mayoría de los registros de información espectral se realizan a través de campañas específicas donde el volumen de información es mucho menor y se posibilita el filtrado y chequeo visual de la información registrada. En este caso se plantea la necesidad de que el filtrado se realice de manera automática, no existiendo herramientas desarrolladas a tal efecto.

- Validación de modelos espectrales de la radiación global, difusa y directa normal..

Existen varios modelos espectrales, pero han sido desarrollado teniendo en cuenta ciertas hipótesis de partida. En el contexto de este proyecto se procede a la validación de estos modelos en todas las condiciones atmosféricas registradas durante la campaña de medidas.

- Caracterización de parámetros atmosféricos locales a partir de la distribución espectral de la radiación solar en la zona desértica del sureste español.

La información espectral supone una importante fuente de información para la caracterización de los parámetros atmosféricos locales. Estos parámetros, que a su vez determinan la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra en un emplazamiento concreto, no están suficientemente caracterizados en atmósferas desérticas como la de la PSA.

- Caracterización y análisis de la influencia de la distribución espectral de la radiación solar en las distintas tecnologías.

Otro de los objetivos destacados del Proyecto se centra en la influencia de la distribución en las aplicaciones de aprovechamiento energético de la radiación solar. Hasta la fecha la influencia mejor caracterizada es el efecto de la distribución espectral en la generación fotovoltaica. En el contexto de este proyecto, se procede a la instalación de paneles fotovoltaicos de distintas tecnologías junto a la medida de la distribución espectral de la radiación solar, para cuantificar la relación en cada caso.

Este Proyecto, ha sido invitado a presentar una continuación, ampliando el estudio del efecto de la distribución espectral en otras tecnologías de aprovechamiento de la radiación solar.

PROYECTOS DE COLABORACIÓN CON EMPRESAS PROMOTORAS DE CENTRALES SOLARES

Durante 2005, y fruto de la situación socio-política del mercado energético en España, la promoción de Plantas solares ha empezado a crecer considerablemente en España. En la medida que aumenta la actividad en este sector, un mejor conocimiento de la radiación solar como recurso energético de las mismas, comienza a tener una influencia relevante en el estudio de costes- beneficios de esta actividad, como en cualquier actividad empresarial.

A lo largo de este año se han realizado numerosos contactos con empresas que finalmente se han materializado en la realización de diversas asistencias técnicas y tres Acuerdos de Colaboración. Debido al carácter confidencial de estas relaciones, a continuación de enuncian únicamente el contenido de los Acuerdos de Colaboración, nombrándolos simbólicamente.

ACUERDO DE COLABORACIÓN A

Se trata de un Acuerdo con una empresa promotora de Plantas Solares de Torre. La colaboración (enmarcada en el contexto de un Proyecto Europeo) tiene como objetivos la realización de las siguientes Tareas por parte del Grupo de Radiación Solar:

1) Selección del emplazamiento de la Planta y de la estación de medida.
2) Configuración de la estación de medida y soporte en la instalación de la misma.
3) Filtrado y análisis de datos registrados.
4) Extrapolación a largo plazo de las medidas utilizando estimaciones de satélite.
5) Generación serie representativa para el estudio del aprovechamiento energético.

Durante 2005 se han realizado las tareas correspondientes a los oivos1, 2 y 3, así como se ha comenzado el tratamiento de imágenes de satélite y la generación de modelo necesarios para la consecución del cuarto objetivo.

ACUERDO DE COLABORACIÓN B

En este caso se trata de una colaboración con una empresa promotora de Huertos Fotovoltaicos. Esta colaboración tiene por objetivo principal el suministro y tratamiento (por parte de CIEMAT) de toda la información disponible sobre el potencial de la radiación solar en emplazamientos concretos en los que ésta empresa esté interesada en promover un proyecto particular. Además del tratamiento de la información medida disponible, se utilizarán los resultados del tratamiento de imágenes de satélite y su adaptación al emplazamiento objeto de estudio. La colaboración, incluye la realización por parte de CIEMAT de tanta documentación científico técnica sea precisa para la información del potencial de la radiación solar tanto a inversores como a entidades financiera.

ACUERDO DE COLABORACIÓN C

Este acuerdo se ha realizado con una empresa promotora de los dos tipos de instalaciones nombrados en los Acuerdos A y B, por lo que la colaboración cumple con los tipos de objetivos comentados. Por un lado, se dará soporte a la configuración e instalación de la estación de medida, así como se realizará un estudio de la radiación solar incidente en el plano de la superficie captadora, considerando la tecnología de cada promoción (radiación directa, global inclinada, global con seguimiento determinado. Las metodologías de trabajo variarán en cada caso, adaptándose a las necesidades particulares de cada iniciativa.

La Realización de estos Acuerdos de Colaboración, requieren de la dedicación de distintos técnicos para cada uno de ellos, lo que permite mantener la confidencialidad y la capacidad de respuesta en un momento dado. Durante el 2005 se ha llegado a la tasa máxima de dedicación en esta materia, situación se prorrogará al menos durante 2006 en base a las relaciones contractuales adquiridas.

INFORME RADIOMÉTRICO Y METEOROLÓGICO ANUAL 2005

La estación radiométrica y meteorológica de la Plataforma Solar de Almería (PSA) está localizada en la latitud 37º 5' N, longitud -2º 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, con una elevación máxima sobre el horizonte de 5.2º, 2º y 4.2º respectivamente, 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 dirección del viento, las medias se han obtenido operando conjuntamente con su correspondiente velocidad, previa conversión a coordenadas cartesianas.

El presente informe meteorológico ha sido elaborado con los datos recogidos durante el 2005 en esta estación radiométrica y meteorológica. En todas las gráficas, la hora está expresada como 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 94 y Figura 95 se muestran las medias horarias mensuales de irradiación directa y global. En ellas se aprecia que los valores mayores de irradiación media directa se alcanzan en las horas centrales del día en el mes de enero y en los meses de verano junio y julio. Valores altos, auque menores que los anteriores, se encuentran también en el mediodía del mes de abril. El valor máximo de irradiancia directa registrado durante el 2005 ha sido **1113 W/m²**, el 14 de febrero, a las 13h (GMT). El valor medio diario accumulado anual de irradiación directa ha sido **5717 W/m²**, siendo en enero de **6860 W/m²** y en julio de **8400 Wh/W/m²**.

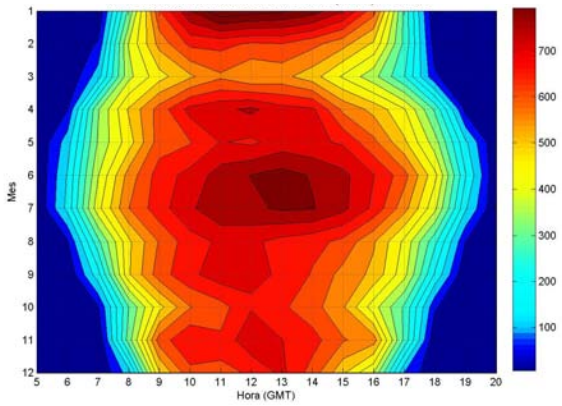


Figura 94. Perfil de medias horarias mensuales de irradiación directa

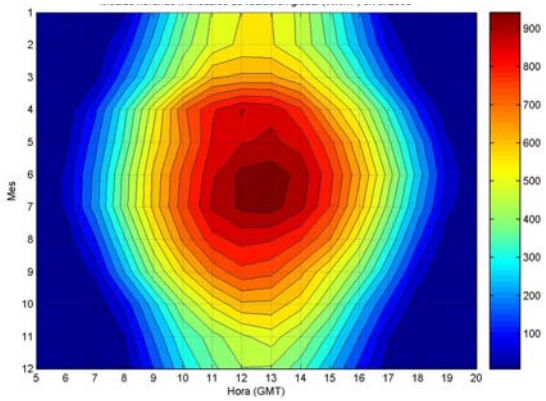


Figura 95. Perfil de medias horarias mensuales de irradiación global

En la Figura 95 se aprecia que los valores mayores de irradiación media global se alcanzan en las horas centrales del día en los meses de verano junio y julio. Se dejan ver también valores altos al mediodía del mes de abril. Estos altos valores tanto en radiación directa como en global en el mes de abril se atribuyen a una atmósfera muy transparente en esa época del año. El valor máximo de irradiancia global registrado durante el 2005 ha sido **1268 W/m²**, el 22 de mayo, al mediodía solar. El valor medio diario acumulado anual de irradiación global ha sido **5145 W/m²**, siendo en enero de **3350 W/m²** y en julio de **8020 W/m²**.

TEMPERATURA

En las Figura 96 yFigura 97 se muestran conjuntamente los valores medios, máximos y mínimos mensuales y el perfil de medias horarias mensuales, respectivamente. Los valores máximos de temperatura registrados han sido **42.0 ºC** en el sensor situado a 2m y de

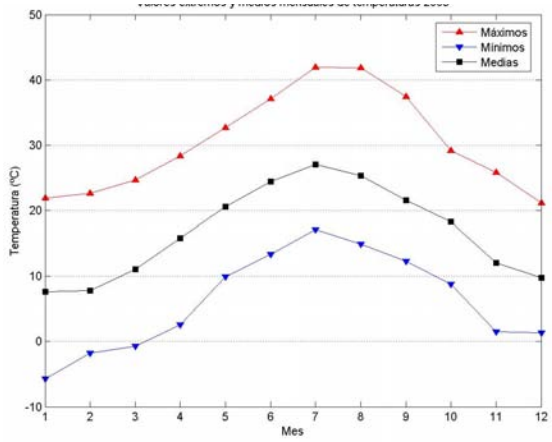


Figura 96. Representación de los valores máximos, medios y mínimos mensuales de temperatura

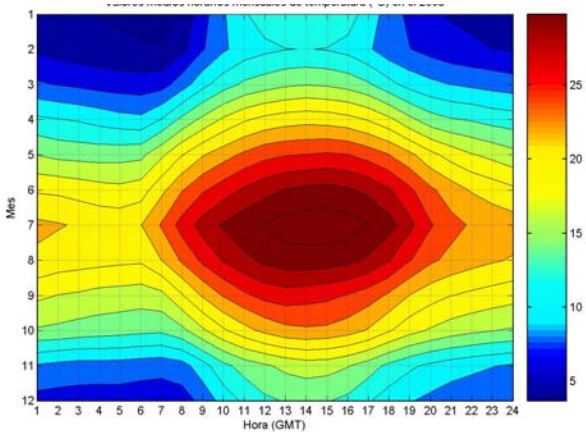


Figura 97. Perfil de medias horarias mensuales de temperaturas

41.1 ºC en el sensor de 10m, ambos registrados el 17 de julio después del mediodía solar. Los valores mínimos son, respectivamente, **-5.7 ºC** y **-4.2 ºC** a las 7h (GMT) del 27 de enero. En enero, la media mensual a 2m es **8 ºC** y a 10m, **9 ºC**. En julio, la media mensual es de **27 ºC** en ambas alturas. La media anual es de **17 ºC**.

En la Figura 97, se aprecia la inercia de las altas temperaturas, que se prolongan en las tardes en los meses de verano, especialmente en el mes de julio. Se observa también que las temperaturas al mediodía solar son muy estables en los meses de enero y febrero.

HUMEDAD RELATIVA

En la Figura 98 y la Figura 99 se muestran conjuntamente los valores medios, máximos y mínimos mensuales y el perfil de medias horarias mensuales de humedad, respectivamente, a la altura de 2m. Los valores máximos registrados han sido de **93.6%** en el sensor situado a 2m, registrado a las 9h del 20 de marzo del 2005, y de **95.1%** en el sensor de 10m, registrado simultáneamente al anterior. Los valores mínimos son, respectivamente, **6.0%** y **5.1%**, ambos registrados el 30 de junio a las 15h (GMT). En enero, la media mensual a 2m es **56%** y a 10m, **55%.** En julio, la media mensual a 2m es **40%** y a 10m, **42%.** La media anual es **53%** en ambas alturas. En la Figura 99, se aprecia que los valores más bajos de humedad se concentran en las horas centrales del día de los meses de mayo, junio y julio. Los valores más altos de humedad se registran durantes las noches en las estaciones de transición, primavera y otoño.

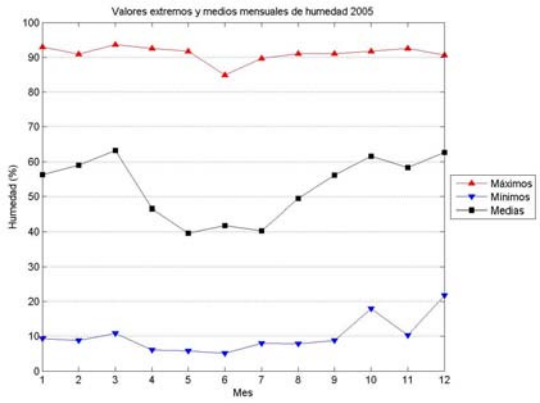


Figura 98. Representación de los valores máximos, medios y mínimos mensuales de humedad

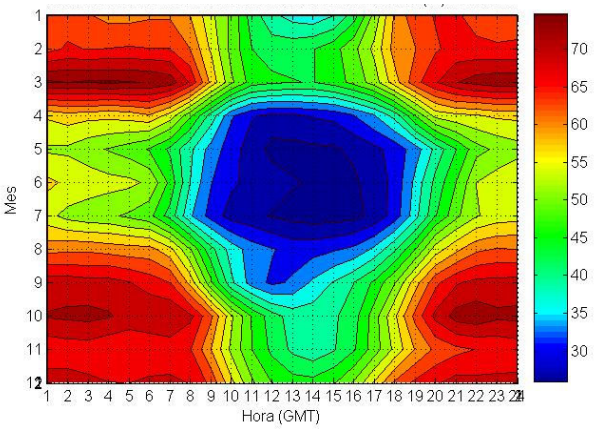


Figura 99. Perfil de medias horarias mensuales de humedad

VIENTO

En la Figura 100 se muestran conjuntamente los valores medios y máximos mensuales de la velocidad de viento, registrados a 2 m y 10 m. La ráfaga de viento más fuerte registrada en el anemómetro de 2m fue de **17.1 m/s** (61.6 km/h), en la madrugada del 26 de noviembre; en el anemómetro de 10m, la ráfaga máxima fue de **19.9 m/s** (71.6 km/h), registrado en la mañana del 15 de febrero.

En la Figura 101 se muestra el perfil de medias horarias mensuales de la velocidad de viento a 2m. En esta figura se aprecia que las noches suelen ser muy calmas y que el viento suele levantarse del mediodía en adelante.

En la Figura 102, se representan los porcentajes de ocurrencia en la dirección de procedencia del viento. Durante el 2005 se ha registrado un predominio del viento del este con el 29% de los casos. Las procedencias más comunes, aparte de la del este, son del suroeste, sureste 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.

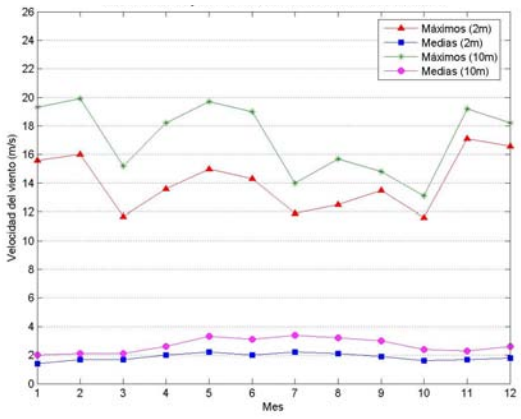


Figura 100. Representación de los valores máximos, medios y mínimos mensuales de la velocidad del viento a 2 m y a 10 m

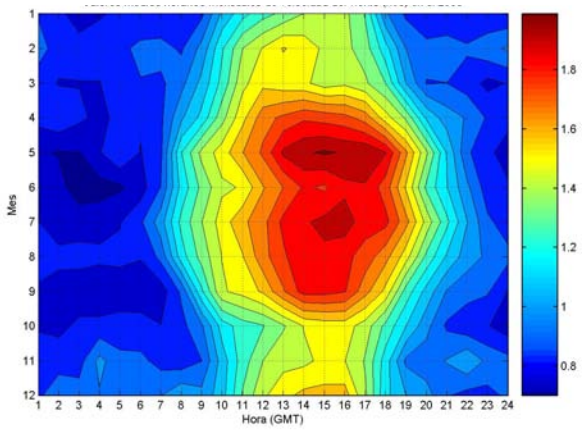


Figura 101. Perfil de medias horarias mensuales de velocidad del viento a 2 m

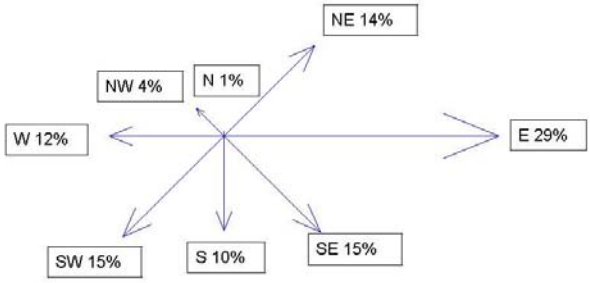


Figura 102. Porcentajes de ocurrencias de la dirección de procedencia del viento en el 2005.

PRECIPITACIÓN

Durante el año 2005 se han recogido un total de **127 l/m²** en los 32 días en los que hizo acto de presencia este fenómeno meteorológico. No se han registrado precipitaciones durante el mes de julio y prácticamente el mes de agosto. Los meses en los que se ha recogido mayor cantidad de precipitación han sido marzo y noviembre, en las estaciones de transición, primavera y otoño. El día en el que se registró el máximo de lluvia fue el 7 de septiembre, con **12.3 l/m²** de precipitación recogida. En la Figura 103 se presentan en diagrama de barras la precipitación recogida de cada mes, la precipitación máxima recogida en un día de cada mes y el número de días de cada mes en que se ha registrado precipitación.

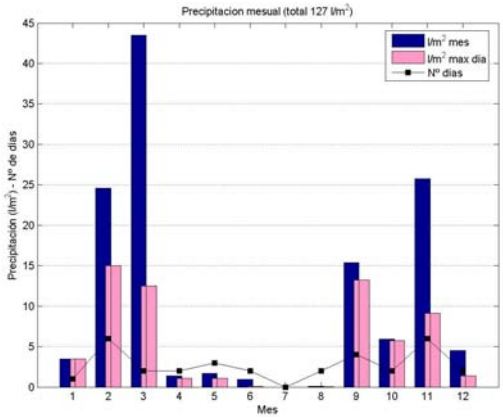


Figura 103. Representación los valores de precipitación recogidos mensualmente, así como el valor máximo de precipitación recogida en un día y el número de días de precipitación en cada mes.

Eventos

El 10 de junio recibimos la visita del Sr. Hinrichs-Rawles, director del 'Departamento Central' del Ministerio Alemán de Medio Ambiente y Seguridad Nuclear (BMU). A este departamento están adscritas las actividades del BMU relacionadas con las energías renovables y la protección del clima. El motivo de la visita ha sido obtener información de primera mano sobre las actividades de investigación que realiza el DLR conjuntamente con el CIEMAT en las instalaciones de la PSA.

Figura 104. El Sr. Hinrichs-Rawles expresó el interés del BMU en nuestras actividades

El 9 de julio recibimos de manos de la 'Fundación Terra' el premio 'Sol y Paz 2005' en la modalidad de 'Labor Colectiva'.

Figura 105. Foto de la Consejera con todos los galardonados

El premio se entregó en el marco del 'Encuentro Solar 2005' que tuvo lugar en el Parque de las Ciencias de Granada, con la presencia de la Consejera de Educación de la Junta de Andalucía, Dña. Cándida Martínez López.

El 13 de julio recibimos la visita de la Ministra de Medio Ambiente, Doña Cristina Narbona Ruiz y del entonces Secretario de Estado de Universidades e Investigación, Don Salvador Ordóñez Delgado.

Figura 106. El Director General del CIEMAT presidió el acto de bienvenida

Figura 107. Visita a las instalaciones del proyecto de desalinización

Amabas personalidades fueron recibidas por el Director General del CIEMAT, Don Juan Antonio Rubio Rodríguez y por el Director del Departamento de Energía, del que depende directamente la PSA, Don Cayetano López Martínez.

Se realizó una visita por todas las instalaciones de ensayo de la PSA, prestando un especial interés a las relacionadas con el tratamiento de aguas con energía solar.

Figura 108. Acto oficial de la inauguración

Figura 109. De izquierda a derecha: Amadeo Rodríguez (UAL-Director del CIESOL), Alfredo Martínez (rector de la UAL), Cayetano López (director del Departamento de Energía del CIEMAT) y Sixto Malato (CIEMAT-Subdirector del CIESOL)

Este año se ha dado un paso mas en el fortalecimiento de la colaboración con la Universidad de Almería con la inauguración del edificio CIESOL, en el campus de la Cañada.

D. Cayetano López, Director del Departamento de Energía del CIEMAT y D. Alfredo Martínez Almécija, rector de la UAL, presidieron el acto de inauguración de este edificio del centro mixto CIEMAT-UAL. Este edificio estará dedicado a laboratorios y salas para reuniones y cursos a celebrar conjuntamente entre ambas instituciones.

Referencias Documentación

[1] Agüera A., Perez Estrada L. A., Ferrer I., Thurman E. M., Malato S. and Fernandez-Alba A. R. "Application of time-of-flight mass spectrometry to the analysis of phototransformation products of diclofenac in water under natural sunlight". J. Mass Spectrometry, 40, 908-915, 2005.

[2] Alados-Arboledas L., Horvath H., Pavese G., Exposito F., Querol X., Ramírez L., Alcántara Ruiz A., Olmo F.J., Lyamani H., Foyo-Moreno I., Gangl M., Fenk L., Jost B., Leone L., del Castillo S., Escudero M., Espinar B. (2003) Columnar properties of the atmospheric aerosol during the INDALO2003 field campaign. European Aerosol Conference, Ghent (Bélgica), Septiembre 2005.

[3] Alarcón y col. Design and setup of a hybrid solar seawater desalination system: the AQUASOL Project. Proceedings of the ISES Solar World Congress, August 8-12, 2005, Orlando, USA, 2005.

[4] Augugliaro V., Garcia-Lopez E. Loddo V., Malato-Rodriguez S., Maldonado I., Marcì G., Molinari R., Palmisano L. "Degradation of lincomycin in aqueous medium: coupling of solar photocatalysis and membrane separation". Solar Energy, 79, 402-408, 2005.

[5] Ballesteros Martín M.M, Quesada Soriano I., Rodríguez Porcel E.M., Sánchez Pérez J.A., Acién Fernández F.G., García Sánchez J.L., Casas López J.L., Malato S. Coupling of photocatalysis and biological treatment for persistent water contaminants renoval. Biodegradation of photocatalysis intermediates by Pseudomonas Putida. X Congreso Mediterráneo de Ingeniería Química. Barcelona, España. Abstract T05-155, pp. 354. Poster. 15-18 Noviembre, 2005.

[6] Ballestrín, J.; Monterreal, R.; Rodríguez:, M. "Medida de la potencia de la radiación solar concentrada" . III Congreso español de Metrología (11-13 Mayo 2005, Zaragoza).

[7] Berenguel M., Klempous R., Maciejewski H., Nikodem J., Nikodem M., Valenzuela L. Data Analysis of a Distributed Solar Collector Field. 10th International Workshop on Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2005, Las Palmas de Gran Canaria, España, Febrero, 2005.

[8] Berenguel M., Klempous R., Maciejewski H., Nikodem M., Nikodem J., Rudas I., Valenzuela L. Contribution to the Control of a Distributed Solar Collector Field. 10th International Workshop on Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2005, Las Palmas de Gran Canaria, España, Febrero, 2005.

[9] Berenguel Manuel, Cirre Cristina M., Klempous Ryszard, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, and Valenzuela Loreto. Hierarchical Control of a Distributed Solar Collector Field, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3643 (2005), pp. 614-620.

[10] Blanco Galvez J.; Malato Rodriguez S. Solar Photochemistry Applications, in Renewable Energy Systems: Direct Solar Energy, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK [http://www.eolss.net], 2005d.

[11] Blanco Galvez J.; Malato Rodriguez S. Solar Photochemistry Technology, in Renewable Energy Systems: Direct Solar Energy, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK [http://www.eolss.net], 2005c.

[12] Blanco Galvez J.; Malato Rodriguez S. Solar Photochemistry, in Renewable Energy Systems: Direct Solar Energy, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK [http://www.eolss.net], 2005b.

[13] Blanco J. "El reactor solar fotocatalítico: estado del arte " Capítulo 17 del libro "Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación de agua". M.A. Blesa and J. Blanco Eds.

ISBN in process, pp. 271-294, 2005a.

[14] Blanco J. y Alarcón D. Improving the efficiency of high capacity solar thermal seawater desalination systems: the AQUASOL Project. IDS Online Web Conference. http://www.idswater.com, 2005e.

[15] Buck, R.; Heller, P.;Schwarzbözl, P.; Sugarmen, Ch.; Ring, A.; Tellez, F.M.; Enrile, J. "Solar-Hybrid Gas Turbine Plants: Status and Perspectives". EuroSun-2004 Conference. Pp. 1-822-831. ISBN: 3-9809656-0-0. Vol. 1-3; & ISBN: 3-9809656-4-3 CD-ROM.

[16] Chapelon, A., Herrmann, J.M., "The AQUACAT project/detoxification and potabilisation of water by solar photocatalysis in semi-arid countries" Appl. Cat. B: Environ. News Brief , 50, pp.1-5. 2005.

[17] Cirre Cristina M., Valenzuela Loreto, Berenguel Manuel, Camacho Eduardo F.. "Feedback Linearization Control for a Distributed Solar Collector Field", 16th IFAC World Congress, Praga, República Checa, Julio, 2005.

[18] Cirre Cristina M., Valenzuela Loreto, Berenguel Manuel, Camacho Eduardo F., Zarza Eduardo. Fuzzy Reference Governor for a Distributed Solar Collectors Field, 1st International Congress Energy and Environment Engineering and Management, Portalegre, Portugal, 18-20 Mayo, 2005.

[19] 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

[20] 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.

[21] Eickhoff, M.; Valenzuela, L.; Eck, M.; León, J.; Rheilander, J. "Start up / shut down procedures and control schemes for the INDITEP plant". Informe técnico INDITEP-EN-SF-05 del proyecto INDITEP, Plataforma Solar de Almería, Julio de 2005.

[22] Espinar B. (2005) Control de calidad de datos radiométricos y validación de modelos de cálculo de la radiación solar a partir de imágenes de satélite. Colaboración Ecole des Mines Paris (en Sophia-Antipolis, Francia) y Universidad de Almería. Plan Propio de Investigación de la Universidad de Almería 2004.

[23] Espinar B., Polo J., Zarzalejo L.F. (2005) Sensitivity analysis, validation and improvement for the solar radiation estimation model from satellite images Heliosat 2 in the Iberian Peninsula. 1st SOLLAB Doctoral Colloquium, German Aerospace Center (DLR), Cologne, (Alemania). Octubre 2005.

[24] Farré M. J., Franch M. I., Malato S., Ayllón J. A., Peral J. and Doménech X. "Degradation of some biorecalcitrant pesticides by Homogeneous and Heterogeneous Photocatalytic Ozonation". Chemosphere, 58, 1127-1133, 2005.

[25] Fernández P., Blanco J., Sichel C., Malato S., "E. coli deactivation by solar photocatalysis with slurry and supported titanium dioxide at CPC collectors **"**. Libro de proceedings 8th International Conference on Solar Energy and Applied Photochemistry & 5th International Workshop on Environmental Photochemistry. Photoenergy Center, Ain Shams University, Cairo. Luxor, Egypt, 20-25 February 2005c.

[26] Fernández P., Blanco J., Sichel C., Malato S., "Water disinfection by solar photocatalysis using compound parabolic collectors", Catalysis Today, 101, 345-352, 2005b.

[27] Fernández-Ibáñez P. "Desinfección con reactores solares: experiencia operativa" Capítulo 14 del libro "Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación de agua". M.A. Blesa and J. Blanco Eds. ISBN in process, pp. 221-235, 2005a.

[28] Fernández-Reche J, Cañadas I, Sánchez M et al, PSA Solar Furnace: a facility for testing PV Cells under concentrated solar radiation. Solar Energy Materials and Solar Cells. (Submitted 2005)

[29] Gernjak W., Malato S., Blanco J., Maldonado, M.I. Alarcón D. C., Fernández P., Oller I., Pérez-Estrada L. "Coupling AOPs and Biological Treatment – Recent Results of the "CADOX" Project". Oral presentation. The Second European Conference on Oxidation and Reduction Technologies for Ex-Situ and In-Situ Treatment of Water, Air and Soil (ECOR- 2), Göttingen, Germany, June 12-15, 2005a.

[30] Gernjak W., Maldonado M.I., Oller I., Pérez-Estrada L., Fürhacker M. and Malato S. "Solar

Photo-Fenton Treatment – Process Parameters and Process Control". Oral presentation. The Second European Conference on Oxidation and Reduction Technologies for Ex-Situ and In-Situ Treatment of Water, Air and Soil (ECOR- 2), Göttingen, Germany, June 12-15, 2005b.

[31] Gumy D., Fernández-Ibáñez P., Malato S., Pulgarin C., Enea O., Kiwi J. "Supported Fe/C and Fe/Nafion/C catalysts for the photo-Fenton degradation of Orange II under solar irradiation", Catalysis Today, 101, 375-382, 2005.

[32] Heller, P., Pfander, M., Denk, T., Téllez, F., Valverde, A., Fernandez, J., and Ring, A. (2005). "Test and evaluation of a solar powered gas turbine system." Solar Energy, In Press, Uncorrected Prof..

[33] Heras M.R., Jiménez M.J., San Isidro M.J., Zarzalejo L.F., Pérez M.. (2005) Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept. Solar Energy, 78, 85-96.

[34] Hincapie M., Maldonado M.I., Oller I., Gernjak W., Sánchez-Pérez J.A., Ballesteros M.M., Malato S. "Solar photocatalytic degradation and detoxification of EU priority substances". Catalysis Today, 101, 203-210, 2005b.

[35] Hincapié M., Peñuela G., Malato S., Maldonado M. I. "Comparación en la fotodegradación catalítica de los herbicidas alacloro y diuron por radiación solar y artificial". Tecnologías emergentes para estudiar los problemas de tratamiento de agua en países en desarrollo. Puerto Iguazú (Rep. Argentina), Libro de resúmenes, p83. Poster. 14-19 Octubre 2005a.

[36] Klempous Ryszard, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto. Data Driven Methods and Data Analysis of a Distributed Solar Collector Field, 4th International Conference APLIMAT 2005, Bratislava, Eslovaquia, Febrero, 2005.

[37] Malato Rodríguez S., Blanco Gálvez J., Fernández Ibáñez P., Alarcón Padilla D., Maldonado Rubio M.I. "Photocatalytic water treatment: practical applications with solar energy". III Encontro sobre aplicaçoes ambientais de processos oxidativos avançados. Campinas, Brasil, Book of abstracts, CC-07. Invited Lecture. 3-5 Octubre. 2005b.

[38] Malato Rodríguez S., Blanco Gálvez J., Maldonado Rubio M. I., Fernandez Ibañez P., Gernjak W., Oller Alberola I.. Treatment of chlorinated solvents by TiO_2 photocatalysis and photo-Fenton: influence of operating conditions in a solar pilot plant. Chemosphere, 58, 391-398, 2005f.

[39] Malato Rodriguez S.; Blanco Galvez J. Photochemical Conversion of Solar Energy, in Renewable Energy Systems: Direct Solar Energy, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK [http://www.eolss.net], 2005g.

[40] Malato Rodriguez S.; Blanco Galvez J. Research and Environmental Issues in the 1990s, in Renewable Energy Systems: Direct Solar Energy, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK [http://www.eolss.net], 2005i.

[41] Malato Rodriguez S.; Blanco Galvez J. Solar Photocatalysis, in Renewable Energy Systems: Direct Solar Energy, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK [http://www.eolss.net], 2005h.

[42] Malato S., Blanco J. "Tecnología solar aplicada a la depuración de agua conteniendo plaguicidas". Cooperación Agraria, 58, 36-40, 2005e.

[43] Malato S., Blanco J., Alarcón D.C., Maldonado M.I., Fernández-Ibañez P. "Solar photocatalytic water detoxification. Technology and application overview". 7th European Congress on Catalysis. Sofia, Bulgaria, Book of abstracts, p. 199. Keynote Lecture. 28 August-1 September, 2005a.

[44] Malato S., Blanco J., Maldonado Rubio M.I., Fernández P., Gernjak W., Oller I. "Tratamiento de aguas conteniendo contaminantes orgánicos persistentes mediate combinación de procesos de oxidación avanzada y biológicos. Proyecto CADOX". Tecnologías emergentes para estudiar los problemas de tratamiento de agua en países en desarrollo. Puerto Iguazú (Rep. Argentina), Libro de resúmenes, p20. Conferencia Plenaria. 14-19 Octubre 2005c.

[45] Malato S., Vincent M., Collares-Pereira M., Doménech X., Farinha Mendes J., Perrot J. Y., Tanghe T., Pulgarin C., Muñoz J. A. "A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants. "CADOX" project. Recent results". Final P-THREE-workshop "Advanced wastewater technologies for the removal of organic contaminants and potential impact of the water framework directive".

Wiesbaden, Germany, Book of abstract pp. 14. Oral presentation. 12 December 2005d.

[46] Maldonado M. I., Malato S., Fernández P., Gernjak W., Oller I., Pérez-Estrada L., Blanco J., Alarcón D.. A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants (The CADOX project). X Congreso Mediterráneo de Ingeniería Química. Barcelona, España. Abstract T05-024, pp. 248. Poster. 15-18 Noviembre, 2005a.

[47] Marcos, M.J.; Pérez-Rábago, C.; Ballestrín, J.; Rodríguez-Alonso, M.; Estrada, C.A. "Outdoor uncertainty on heat flux measurement". Presentado a 2005 Solar World Congress (ISES, International Energy Society), Orlando (USA), 6-12 Agosto 2005.

[48] Monterreal, R. Protocolo de Ensayos y Evaluación del Helióstato Sanlúcar 90. CIEMAT-PSA, 19-09-2002.

[49] Oller I., Gernjak W., Maldonado M. I., Fernández-Ibáñez P., Blanco J., Sánchez-Pérez J.A., Malato S.. Photocatalytic treatment of Dimethoate by solar photocatalysis at pilot plant scale. Environ. Chem. Letters, 3, 118-121, 2005b.

[50] Oller I., Malato S., Sánchez-Pérez J.A., Blanco J., Maldonado M.I., Gernjak W., Pérez-Estrada L. "A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants. "CADOX" project. Recent results". 1st EMCO workshop "Analysis and removal of contaminants from wastewaters for the implementation of the Water Framework Directive (WFD)". Dubrovnik, Croatia. Book of abstracts, pp. 81-82. Oral. 20-21 October 2005a.

[51] Osuna, R., Romero, M., Fernández, V., Sánchez, M., Ruiz, V., and Silva, M. "EURECA: Advanced receiver for direct superheated steam generation in solar towers, as an option for increasing efficiency in large low cost direct steam generation plants." 2005 Solar World Congress, Orlando, Florida.

[52] Perez-Estrada L.A., Malato S., Gernjak W., Agüera A., Thurman E. M., Ferrer I. and Fernandez-Alba A.R. "Photo-Fenton degradation of diclofenac: identification of main intermediates and degradation pathway". Environ. Sci. Technol., 39, 8300-8306. 2005b.

[53] Perez-Estrada L.A., Maldonado M.I., Gernjak W., Agüera A., Fernandez-Alba A.R., Ballesteros M.M., Malato S. "Decomposition of diclofenac by solar driven photocatalysis at pilot plant scale". Catalysis Today, 101, 219-226, 2005a.

[54] Pitz-Paal, R., Dersch, J., Milow, B., Romero, M., Téllez, F., Ferriere, A., Langnickel, U., Steinfeld, A., Karni, J., Zarza, E., and Popel, O. (2005). "European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping." SES6-CT-2003-502578 (CE-ECOSTAR Final Report).

[55] Pitz-Paal, R., Dersch, J., Milow, B., Téllez, F., Ferriere, A., Langnickel, U., Steinfeld, A., Karni, J., Zarza, E., and Popel, O. "Development steps for concentrating solar power technologies with maximum impact on cost reduction." Proceedings of ISEC2005 International Solar Energy Conference, Orlando, Florida.

[56] Polo, J. (2005) Estimación de la irradiancia solar directa diaria en España a partir de las imágenes del satélite Meteosat. Diploma de Estudios avanzados. Facultad de Físicas. Universidad Complutense de Madrid.

[57] Ramírez L., Zarzalejo L.F.,Polo J., Marchante R. (2005) Tratamiento de imágenes de satélite para cálculo de la radiación solar en Andalucía y Extremadura. Acuerdo específico de colaboración AICIA/CIEMAT. Informe Final. Febrero de 2005.

[58] Rincón, A.G., and Pulgarin, C., "Use of coaxial photocatalytic reactor (CAPHORE) in the TiO_2 photo-assisted treatment of mixed E. coli and Bacillus sp. and bacterial community present in wastewater," Catalysis Today, 101, pp. 331-344, 2005.

[59] Rodríguez M., Malato S., Pulgarin C., Contreras S., Curcó D., Giménez J. and Esplugas S. "Optimizing the solar photo-Fenton process in the treatment of contaminated water. Determination of intrinsic kinetic constants for scale-up". Solar Energy, 79, 360-368, 2005.

[60] Rojas, E; Cañadas, I., 'Calor solar en procesos industriales'. Congreso Nacional sobre Energías Renovables CONEERR 2005. Noviembre de 2005, en Murcia, España. Depó. Legal. MU-1834-2005 (este es más una declaración de intenciones generales: hasta dónde se puede llegar/qué procesos pueden/son aplicables el aporte solar=> se habla más de cilindroparabólicos y de alta concentración).

[61] Rojas, E; Cañadas, I., 'Energía solar térmica para procesos industriales'. Ingeniería Química, 424, pp160-166, Mayo 2005. (orientado más hacia qué hay que tener en cuenta para una aplicación actualmente factible a un precio razonable, por lo que se habla de baja tempe-

ratura, instalaciones actuales, etc.)

[62] Sánchez, B.; Coronado, J.M.; Candal, R.; Portela, R.; Tejedor, I.; Anderson, M.A.; Tompkins, D.; Lee, T. "Preparation of TiO_2 coatings on PET monoliths for the photocatalytic elimination of trichloroethylene in the gas phase". Appl. Catal. B. (en prensa. Available online 15 May 2006)

[63] Sarria V., Kenfack S., Malato S., Blanco J., Pulgarín C. "Dispositivo integrada fotocatalítico/fotovoltaico para la descontaminación de aguas". Tecnologías emergentes para estudiar los problemas de tratamiento de agua en países en desarrollo. Puerto Iguazú (Rep. Argentina). Libro de resúmenes, p71. Poster. 14-19 Octubre 2005a.

[64] Sarria V., Kenfack S., Malato S., Blanco J., Pulgarín C. "New Helio-Photocatalytic Photovoltaic Hybrid System for Simultaneous Water Decontamination and Solar Energy Conversion". Solar Energy, 79, 353-359, 2005b.

[65] Sichel C., Fernández P., Lorenz K., Blanco J. "Drinking water treatment in solar reactors with immobilized photocatalysis". ISBN: 84-7834-498-5, Ed. CIEMAT, 2005b.

[66] Sichel C., Fernández-Ibáñez P., Blanco J., Malato S. "E. coli inactivation with immobilized catalyst in solar photoreactors". Libro de proceedings. 10th Mediterranean Congress of Chemical Engineering. Barcelona, España, 15-18 November 2005c.

[67] Sichel C., Fernández-Ibáñez P., Blanco J., Malato S., "Disinfection of E. coli with immobilized TiO_2 in solar collectors". Libro de proceedings. Second European Conference on Oxidation and Reduction Technologies for Ex-situ and In-situ treatment of water, air and soil. University of Göttingen, Göttingen, Germany, 12-15 June 2005a.

[68] Valenzuela Loreto, Zarza Eduardo, Berenguel Manuel, Camacho Eduardo F. Control concepts for direct steam generation in parabolic troughs, Solar Energy, Vol. 78, Iss. 2 (2005), pp. 301-311.

[69] Zarza, E.; Rojas. M.E.; González, L.; Caballero, J.M.; Rueda, F. " INDITEP: The First DSG Precommercial Solar Power Plant" . Artículo presentado en el 12th Solar PACES International Symposium

[70] Zarzalejo L.F. (2005) Estimación de la Irradiancia Global Horaria a partir de Imágenes de Satélite. Desarrollo de modelos Empíricos. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid.

[71] Zarzalejo L.F., Ramirez L., Polo J. (2005). Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite-derived cloud index. Energy, 30(9), 1685-1697.

[72] Zarzalejo, L.F. (2005) La energía solar en la Edificación. Capítulos 1, 2, 4 y 16. ISBN: 84-7834-501-9.

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 Nacional de la Recherche Scientifique (F)
COT	Carbono Orgánico Total
COVs	compuestos orgánicos volátiles
CPC	colector parabólico compuesto
CRS	Sistema de Receptor Central
DCS	Sistema de collectores 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
GACS	Grupo de Alta Concentración Solar
GC-AED	cromatografía de gases con detector de emisiones atomicas
GC-MS	cromatografía de gases acoplado a masas
GDV	generación directa de vapor
HDPE	polietileno de alta densidad
HICON-PV	HIgh CONcentration PV Power System
HPLC-UV	high-performance liquid chromatography
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)
INNOHYP-CA	Innovative high temperature routes for Hydrogen Production – Coordinated Action
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
MIMs	módulos integrados monolíticos
NTUA	National Technical Univ. of Athens
PAO	Procesos Avanzados de Oxidación
PCHA	Primer Campo de Helióstatos Autónomos
PET	tereftalato de polietileno
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
QUV	Marca registrada de Q-Panel Lab
RTU	Universidad Técnica de Riga
SCADA	Supervisory Control and Data Adquisition 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)
SolLAB	'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
TRC	tecnología de receptor centra
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