



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



# PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# **Plataforma Solar de Almería**

---

**El mayor centro de  
investigación europeo  
dedicado a las tecnologías  
termosolares y fotoquímicas**

---



## Tabla de contenidos

1	Presentación General.....	13
2	Infraestructuras e Instalaciones .....	19
2.1	Sistemas Cilindroparabólicos .....	19
2.1.1	...La planta experimental DISS .....	19
2.1.2	...Lazo de ensayos HTF .....	20
2.1.3	...PROMETEO: Instalación de ensayo para verificar nuevos componentes y fluidos de transferencia de calor para grandes captadores cilindroparabólicos .....	22
2.1.4	...La instalación del Lazo de Ensayo de Captadores Cilindroparabólicos (PTTL) .....	23
2.1.5	...NEP: La instalación para Aplicaciones de Poligeneración.....	24
2.1.6	...Lazo de Ensayos de Fluidos Innovadores (gases presurizados) en captadores cilindroparabólicos .....	25
2.1.7	...Instalación de captadores cilindroparabólicos TCP-100 2.3-MWth .....	27
2.2	Otros Sistemas de Ensayo de Componentes para la Tecnología Cilindroparabólica.....	28
2.2.1	...KONTAS: Banco de ensayos giratorio para sistemas cilindroparabólicos .....	28
2.2.2	...Ensayos acelerados de vida útil del comportamiento de ensamblajes de rotación y expansión (REPAs) para sistemas cilindroparabólicos.....	29
2.2.3	...El Lazo FRESDEMO .....	30
2.3	Sistemas de Almacenamiento Térmico.....	31
2.3.1	...Lazo de Ensayos de Sales Fundidas para Sistemas de Energía Térmica .....	31
2.3.2	...Banco de pruebas de lecho empaquetado con aire atmosférico .....	33
2.4	Sistemas de Receptor Central.....	34
2.4.1	...La Planta CESA-I de 6 MWth.....	34
2.4.2	...La instalación SSPS-CRS de 2,5 MWth .....	35
2.4.3	...Sistema de Receptor Central AORA .....	37
2.5	Instalación de Hornos Solares.....	38
2.5.1	...Horno Solar SF-60 .....	38
2.5.2	...Horno Solar SF-40 .....	40
2.5.3	...Horno Solar SF-5 .....	41
2.6	Sistemas Parabólicos DISH.....	42
2.6.1	...EURODISH .....	42
2.6.2	...Banco de ensayos de envejecimiento acelerado y durabilidad de materiales .....	43
2.7	Instalaciones experimentales de Desalación Solar.....	43
2.7.1	...Instalaciones de Destilación Multiefecto.....	44
2.7.2	...Instalación CSP+D .....	46
2.7.3	...Instalaciones de Ensayo de Destilación por Membranas .....	48

2.8	Instalaciones experimentales de Tratamientos Solares del Agua.....	51
2.8.1	...SOLWATER .....	52
	Plantas piloto CPC solares .....	52
	Simuladores solares .....	54
	Planta piloto de ozonización .....	55
	Planta piloto de nanofiltración.....	56
	Planta piloto de radiación UVC.....	57
	Equipamiento para monitorización de radiación solar .....	59
	Planta piloto biológica .....	60
	Cámara de cultivo .....	61
2.8.2	...HYWATOX .....	62
	Planta piloto de generación fotocatalítica de hidrógeno .....	62
2.9	Instalaciones para la caracterización óptica y análisis de durabilidad de reflectores solares - OPAC .....	63
2.10	Instalaciones Experimentales para la Evaluación de Eficiencia Energética en Edificios.....	66
3	Laboratorios.....	69
3.1	Laboratorio para la caracterización geométrica de captadores solares - GeoLab.....	69
3.2	Laboratorio de Radiometria - RadLab .....	70
3.3	Ensayos y caracterización de receptores para sistemas termosolares de concentración - SRTLab .....	72
3.4	Laboratorio para la evaluación de la durabilidad y caracterización de materiales bajo radiación solar concentrada - MaterLab .....	73
3.4.1	...Sala de metalografía .....	73
3.4.2	...Sala de Microscopía.....	74
3.4.3	...Sala de Microscopía.....	74
3.4.4	...Sala de Termogravimetría.....	75
3.4.5	...Sala de Ciclo Térmico .....	75
3.4.6	...Sala de Microscopía Electrónica de Barrido.....	75
3.5	Laboratorio de Tecnologías del Agua - WATLAB.....	75
3.5.1	...Laboratorio general .....	76
3.5.2	...Laboratorio de cromatografía.....	76
3.5.3	...Laboratorio de microbiología.....	77
3.5.4	...Laboratorio de microscopía.....	78
3.6	Laboratorio para la evaluación de materiales para sistemas de almacenamiento térmico - TESLab .....	79
3.7	Laboratorio de Desalación de la PSA.....	80
3.7.1	...Planta para estudiar aplicaciones de destilación por membranas en configuraciones de contacto directo, "air-gap" y "permeate-gap" .....	80

3.7.2...Banco d ensayos para evaluar la destilación por membranas con membranas planas.....	81
3.7.3...Banco de ensayos para ósmosis directa y ósmosis de presión retardada con dos efectos .....	82
3.8 Laboratorio de Recubrimientos Ópticos Avanzados - OCTLAB .....	83
3.9 Laboratorio de medios porosos para sistemas de concentración solar - POMELAB.	85
3.10 Laboratorio de Combustibles Solares - SFUELS .....	86
3.11 Red radiométrica de la PSA.....	87



## Lista de figuras

Figura 1.	Integración de la PSA en la organización de CIEMAT. ....	13
Figura 2.	Vista aérea de la PSA.....	14
Figura 3.	Estructura de organización interna de la PSA en 2021. ....	15
Figura 4.	Distribución del personal fijo de la PSA en diciembre de 2020. ....	16
Figura 5.	Personal de la PSA en 2020. ....	16
Figura 6.	Diagrama de flujo simplificado del lazo DISS de la PSA. ....	19
Figura 7.	Vista de la planta DISS en funcionamiento.....	20
Figura 8.	Diagrama del lazo de ensayos HTF situado en la PSA.....	21
Figura 9.	Vista de la instalación de ensayos PROMETEO. ....	23
Figura 10.	Esquema simplificado de la instalación PTTL. ....	24
Figura 11.	Campo solar NEP PolyTrough 1200. ....	25
Figura 12.	Vista de la instalación experimental IFL (con captadores cilindroparabólicos) utilizando gas comprimido como fluido de transferencia de calor.....	26
Figura 13.	Diagrama simplificado del sistema de instalación experimental IFL situado en la PSA.....	27
Figura 14.	Diagrama de la instalación de captadores cilindroparabólicos TCP-100 2,3 MWth. ....	28
Figura 15.	Vista lateral del banco de ensayos KONTAS y la unidad de calefacción/refrigeración (lado derecho).....	29
Figura 16.	Diagrama esquemático del lazo de ensayo REPA de PSA (a) y vista norte de la instalación de ensayo (b).....	30
Figura 17.	Vista del captador linear Fresnel levantado en la PSA. ....	31
Figura 18.	Lazo de ensayos exterior de sales fundidas (MOSA).....	32
Figura 19.	Banco de ensayos interior de MOSA (BES-II). ....	33
Figura 20.	Fotografía tomada desde la parte superior del tanque, mostrando su espacio interior y los termopares a diferentes longitudes y posiciones radiales. ....	33
Figura 21.	Investigadora ajustando algunos parámetros desde la parte superior del tanque. ....	33
Figura 22.	La instalación CESA-I vista desde el norte. ....	34
Figura 23.	Medición on-line de la extinción solar en la sala de control de la instalación CESA-I. ....	35
Figura 24.	Vista aérea de la instalación experimental SSPS-CRS.....	36
Figura 25.	Un heliostato autónomo en el campo SSPS-CRS. ....	36
Figura 26.	Vista general del sistema de receptor central AORA.....	38
Figura 27.	Heliostato HT120 en seguimiento. ....	39
Figura 28.	Parte trasera de la faceta. ....	39
Figura 29.	Atenuador del Horno Solar SF-60 de la PSA.....	39
Figura 30.	Vista interior del Horno Solar SF-60 de la PSA en funcionamiento. ....	39
Figura 31.	Interior del Horno Solar SF-40, mostrando el captador parabólico. ....	41

Figura 32.	Captador del horno solar SF-5. ....	42
Figura 33.	Vista frontal y trasera del EURODISH. ....	42
Figura 34.	Vista del disco parabólico DISTAL- II con el motor original Stirling. ....	43
Figura 35.	Pruebas de envejecimiento acelerado en prototipos de tubos metálicos en un disco parabólico DISTAL-II.....	43
Figura 36.	La planta MED SOL-14 de la PSA (a) bomba de absorción de calor de doble efecto LiBr-H <sub>2</sub> O (b) y campo de 606-m <sup>2</sup> de captadores solares estáticos (c). ....	44
Figura 37.	El campo solar de 606-m <sup>2</sup> con captadores de placa plana de gran apertura (AQUASOL-II). ....	45
Figura 38.	Vista exterior del edificio CSP+D con sus aerocondensadores (a) y vista parcial del interior del banco de ensayo CSP+D (b). ....	47
Figura 39.	Vista general del banco de ensayos de refrigeración-híbrida: (a) Circuito de refrigeración: torre de refrigeración húmeda (1) y aereocondensador (2). (b) Circuito de intercambio: condensador refrigerado por aire (3), depósito de condensación (4) y condensador de superficie (5). ....	48
Figura 40.	Vista interior (a) y exterior (b) del banco de ensayos experimental de Destilación por Membranas dentro de la instalación de Desalación solar térmica de la PSA. ....	49
Figura 41.	Banco de ensayos para la investigación combinada de FO-RO. ....	50
Figura 42.	Depósitos llenos de agua de mar real para realizar ensayos de desalación en circuito cerrado. ....	51
Figura 43.	Vista de varias plantas piloto CPC solares para purificación de agua. a) instalaciones CPC I, b) instalaciones CPC II. ....	53
Figura 44.	Vista de un CPC 2 m <sup>2</sup> (ELECTROX) acoplado a planta piloto Electro-Fenton. ....	54
Figura 45.	Vista de planta piloto con módulo tipo CPC y tipo-U (NOVA 75 V 1.0). ....	54
Figura 46.	Simulador solar SUNTEST XLS+.....	55
Figure 47.	Fotografías de las mejoras en la planta piloto de ozonización: a) Reactor de tipo columna de contacto nuevo de 5800 L; b) Tanque presurizado; c) Bomba Venturi para generación de micro-nano-burbujas. ....	56
Figura 48.	a) Planta piloto de nanofiltración; b) Nueva interfaz de Labview para el control y la automatización de la planta piloto. ....	57
Figura 49.	Planta pilto de rdiación UVC instalada en la PSA.....	57
Figura 50.	Planta piloto de oxidación por aire húmedo.....	58
Figura 51.	a) Planta piloto de electro-oxidación; b) Célula electroquímica de la planta solar de electro-oxidación; y c) Diagrama de la planta solar de electro-oxidación. ....	59
Figura 52.	Piranómetro CUV-5 (a). Vista de todos los piranómetros (configuración horizontal (b) e inclinado (c)).....	60
Figura 53.	Planta piloto biológica instalada en la PSA.....	61
Figura 54.	Planta piloto MD + cristalizador desarrollada por Apria Systems S.L. ....	61
Figura 55.	Cámara de cultivo para la reutilización de aguas de riego residuales en cultivos en la PSA.....	62
Figura 56.	Planta piloto solar de generación fotocatalítica de hidrógeno. ....	63
Figura 57.	Laboratorio de caracterización óptica de reflectores solares OPAC (a) y laboratorio de análisis de durabilidad (b) de la instalación OPAC.....	65

Figura 58.	(a) Recinto de ensayo PASLINK de CIEMAT realizando un ensayo térmico de un módulo fotovoltaico, (b) Esquema del sistema PAS, (c) Detalle del mecanismo giratorio, (d) Exterior del recinto de ensayo CETeB. ....	67
Figura 59.	(a) Edificio monozona, (b) Prototipo de edificio ARFRISOL en uso, (c) Chimenea Solar. Configuración que incluye losas de Material de Cambio de Fase. (d) Ensayo de fachada ventilada en recinto de ensayo. Configuraciones diferentes con cara externa clara y oscura. ....	68
Figura 60.	Desviaciones angulares (a) y factor de intercepción (b) de un módulo de captador cilindroparabólico analizado por fotogrametría. ....	70
Figura 61.	Vista del equipo de radiometría de PSA. ....	70
Figura 62.	Sensor de calibración IR utilizando un cuerpo negro. ....	71
Figura 63.	Vista de la cámara de ensayo HEATREC para medir las pérdidas de calor en tubos receptores (a) y banco de ensayos RESOL para medir la eficiencia óptica de los receptores (b). ....	72
Figura 64.	Vista de la sala de metalografía en el edificio de hornos solares. ....	74
Figura 65.	Vista de a) sala de microscopía, b) Balanza termogravimétrica dentro de su sala. ....	74
Figura 66.	Vista general del nuevo laboratorio de tecnologías de agua de PSA. ....	76
Figura 67.	a) Sistema Metrohm Ion chromatograph. b) Vista general del laboratorio de cromatografía de la PSA. c) Analizador Agilent Ultra-fast UPLC-DAD. d) SCIEX TripleTOF 5600+. ....	77
Figura 68.	Vista general del laboratorio de microbiología de la PSA. ....	78
Figura 69.	a) SEM (Microscopio electrónico de barrido). b) Microscopio óptico para técnica FISH. ....	79
Figura 70.	Usando el dispositivo HDR. ....	80
Figura 71.	Planta para estudiar aplicaciones de destilación por membranas. ....	81
Figura 72.	Banco de ensayos para evaluar la destilación por membranas con membranas planas. ....	82
Figura 73.	Banco de ensayos para FO y PRO. ....	83
Figura 74.	Equipamiento del laboratorio de recubrimientos ópticos avanzados. ....	84
Figura 75.	Banco de ensayos para receptores volumétricos. ....	85
Figura 76.	Banco de ensayos para medir diferencias de presiones configurado hasta 300°C. ....	86
Figure 77.	Vista general de la estación METAS. ....	87
Figura 78.	Instalaciones para calibración. ....	88
Figura 79.	Estaciones radiométricas de la PSA. ....	88



## Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de las plantas piloto CPC disponibles en las instalaciones de PSA.....	52
---	----



# 1 Presentación General

---

La *Plataforma Solar de Almería* (PSA), una división del *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* (CIEMAT), es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de tecnologías solares de concentración y fotoquímica de Europa. Las actividades de la PSA están integradas en la organización de CIEMAT como una división de I+D del Departamento de Energía.

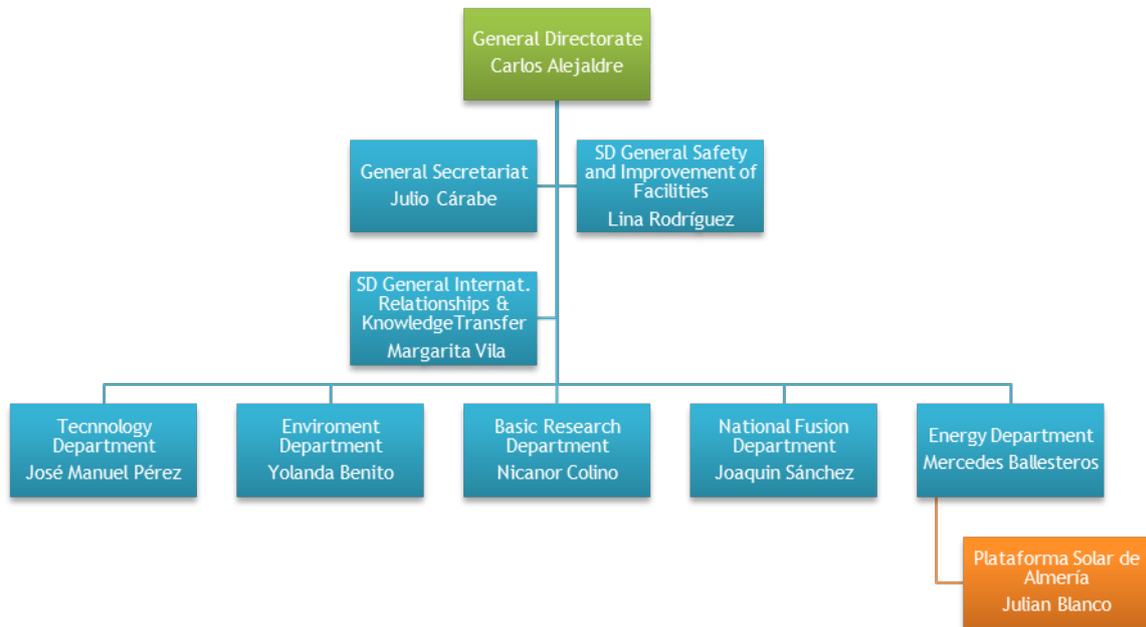


Figura 1. Integración de la PSA en la organización de CIEMAT.

Los siguientes objetivos inspiran sus actividades de investigación:

- Contribuir a establecer un suministro energético mundial limpio y sostenible.
- Contribuir a la conservación de los recursos energéticos europeos y a la protección de su clima y medio ambiente.
- Promover la introducción en el mercado de tecnologías termosolares y las derivadas de procesos químicos solares.
- Contribuir al desarrollo de una industria española de exportación de energía termosolar competitiva.
- Reforzar la cooperación entre empresas e instituciones científicas en el ámbito de la investigación, el desarrollo, la demostración y la comercialización de tecnologías termosolares.
- Fortalecer innovaciones tecnológicas enfocadas a la reducción de costes, contribuyendo a un a mayor aceptación de las tecnologías termosolares.
- Promover la cooperación tecnológica internacional, especialmente en el área mediterránea.
- Asistir a la industria en la identificación de oportunidades en el mercado de la energía termosolar.

Desde 2021, la actividad de investigación de la PSA se ha estructurado en torno a siete unidades de I+D bajo la dirección de un Coordinador Técnico, además de una unidad sólida para gestionar y coordinar todas las instalaciones y laboratorios, llamada Unidad de Gestión de la PSA. Además de los diferentes servicios horizontales (servicios informáticos, instrumentación, mantenimiento, operación, ingeniería civil, etc.) en esta Unidad de Gestión de la PSA se incluyen dos instalaciones adicionales (METAS y LECE) ubicadas físicamente dentro de la PSA, aunque gestionadas por personal asociado formalmente fuera de la estructura de la PSA.



Figura 2. Vista aérea de la PSA.

Las siete unidades de la PSA son las siguientes:

- Tecnologías Termosolares de Foco Lineal. Dedicada a ensayar, evaluar y desarrollar componentes y aplicaciones para captadores solares de foco lineal.
- Tecnologías Termosolares de Foco Puntual. El objetivo es proporcionar asesoramiento técnico a las partes interesadas del sector industrial junto con la investigación e innovación relacionadas con las tecnologías solares de receptor central, tales como la medición del flujo solar concentrado, la I+D de nuevos fluidos y receptores, y el análisis óptico.
- Almacenamiento Térmico de Energía. Abordar el diseño, ensayo y optimización de sistemas de almacenamiento térmico para temperaturas superiores a 100°C.
- Materiales para Tecnologías Termosolares de Concentración. Abordar el desarrollo y ensayo de materiales nuevos o mejorados para tecnologías termosolares o su aplicación, así como el tratamiento térmico, envejecimiento o modificación de materiales.
- Procesos Termoquímicos para la Producción de Combustibles Solares y Materias Primas. Esto incluye procesos de altas temperaturas basados en energía solar concentrada para producir hidrógeno y otras materias primas valiosas y de alto consumo energético.

- Aplicaciones Solares Térmicas. Dedicada al desarrollo y evaluación de aplicaciones de la tecnología termosolar para procesos industriales, incluyendo desalación y concentración de salmuera.
- Tratamientos Solares de Agua. Enfocada en explorar las posibilidades químicas de la energía termosolar, especialmente su potencial para la descontaminación y desinfección de agua, así como la producción de combustibles solares mediante procesos fotoquímicos.

En apoyo de estas Unidades de I+D se encuentran las Unidades de Dirección y Servicios Técnicos mencionadas anteriormente. Estas unidades son en gran medida autosuficientes en la ejecución de su presupuesto, planificación, objetivos científicos y gestión de recursos técnicos. No obstante, las siete unidades de I+D comparten muchos recursos, servicios e infraestructuras de la PSA, por lo que mantienen una comunicación fluida con las Unidades de Dirección y Servicios, que coordinan los servicios de apoyo técnico y administrativo. Por su parte, la Oficina del Director debe garantizar que las capacidades de apoyo, las infraestructuras y los recursos humanos se distribuyan de manera eficiente. También es la Oficina del Director la que canaliza las demandas a las diversas unidades de apoyo general ubicadas en las oficinas principales del CIEMAT en Madrid.

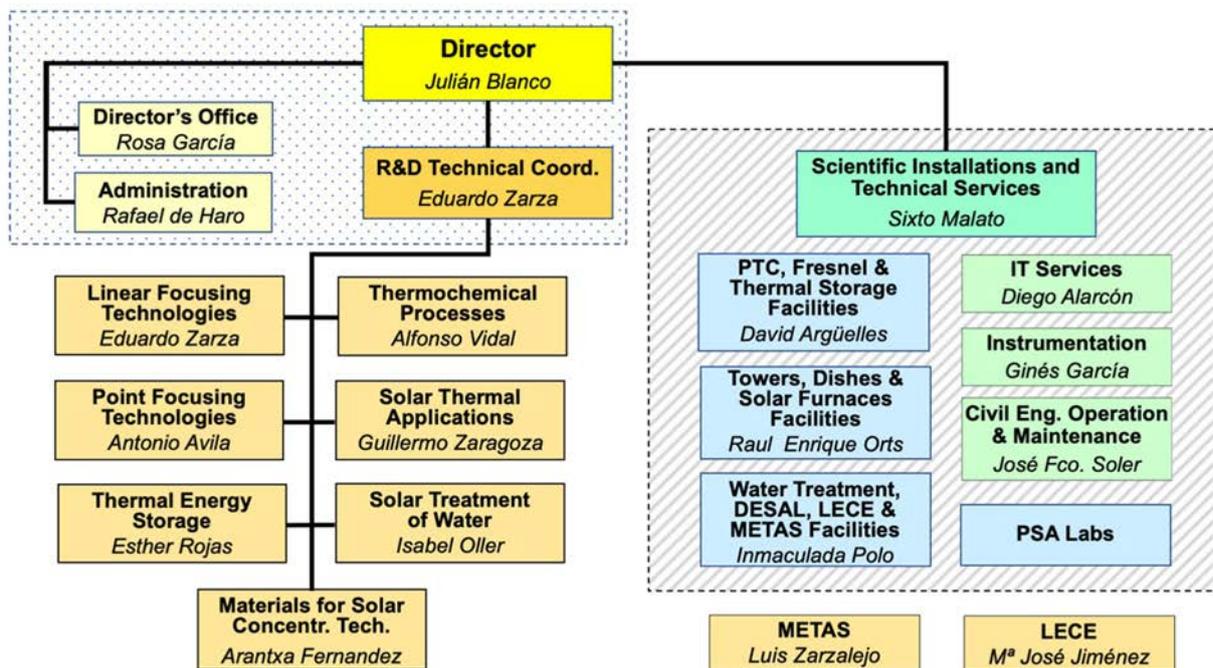


Figura 3. Estructura de organización interna de la PSA en 2021.

Los compromisos científicos y técnicos de la PSA y la carga de trabajo que esto implica son asumidos por un equipo de 134 personas que desde diciembre de 2020 conforman la plantilla permanente que presta sus servicios a la Plataforma Solar de Almería. Además de este personal, existe un importante flujo de personal como investigadores visitantes, becarios y beneficiarios de subvenciones, gestionados por la Oficina del Director. De las 122 personas que trabajan diariamente en la PSA, 65 son personal del CIEMAT, 13 de las cuales se encuentran en las oficinas principales de Madrid.

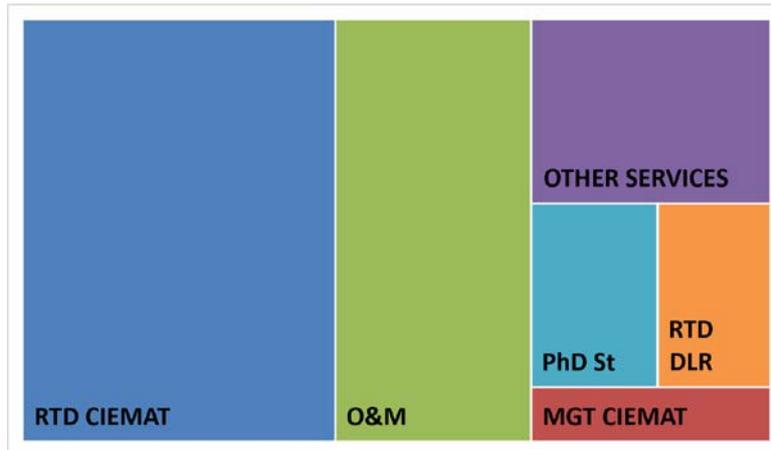


Figura 4. Distribución del personal fijo de la PSA en diciembre de 2020.

Además, las 8 personas que forman la delegación permanente del DLR como consecuencia de sus compromisos actuales con el acuerdo hispano-alemán también hacen una importante contribución.

El resto del personal está formado por un grupo no menos importante, dadas las características del centro. Se trata del personal que trabaja para la contrata en servicios de operación, mantenimiento y limpieza de las diferentes instalaciones. De estas 32 personas, 15 trabajan en operación, 13 en mantenimiento y 4 en limpieza. El contrato de servicios auxiliares está compuesto por 5 administrativos y secretarías, 7 técnicos de informática para servicios a usuarios y otras 5 personas del contrato de seguridad, lo que hace un total de 17 personas.



Figura 5. Personal de la PSA en 2020.

Hay que destacar el esfuerzo que el CIEMAT ha realizado durante los últimos años para proporcionar a la PSA los recursos humanos necesarios. Este esfuerzo continuo nos permite emprender nuestra tarea con mayor garantía de éxito.

El presupuesto de gastos de PSA tiene una tendencia al alza, en gran parte debido a los mayores ingresos, tanto de la financiación de proyectos de la Comisión Europea como del Plan nacional de I+D+i, aunque el factor más importante fue el aumento de los ingresos de la investigación contratada por empresas privadas.



## 2 Infraestructuras e Instalaciones

### 2.1 Sistemas Cilindroparabólicos

#### 2.1.1 La planta experimental DISS

Esta instalación de ensayos fue construida y puesta en funcionamiento en 1998 para experimentar con la generación directa de vapor a alta presión y alta temperatura (100 bar/400°C) en tubos absorbedores de captadores cilindroparabólicos. Fue la primera instalación construida en el mundo donde los procesos bifásicos de flujo de agua/vapor en captadores cilindroparabólicos podían estudiarse en condiciones solares reales. Posteriormente esta instalación se modificó para permitir la generación de vapor a 500°C.

La instalación (ver Figura 6 y Figura 7) consta de dos subsistemas, el campo solar de captadores cilindroparabólicos y el balance de planta (BOP). En el campo solar, el agua de alimentación se precalienta, evapora y convierte en vapor sobrecalentado a una presión máxima de 100 bar y una temperatura máxima de 500°C a medida que circula a través de los tubos absorbedores de una fila de captadores cilindroparabólicos de 1.000 m de longitud con una superficie total de captación solar de 3.838 m<sup>2</sup>. El sistema puede producir un caudal nominal de vapor sobrecalentado de 1 kg/s. En el balance de planta, este vapor sobrecalentado se condensa, procesa y reutiliza como agua de alimentación para el campo solar (operación de circuito cerrado).

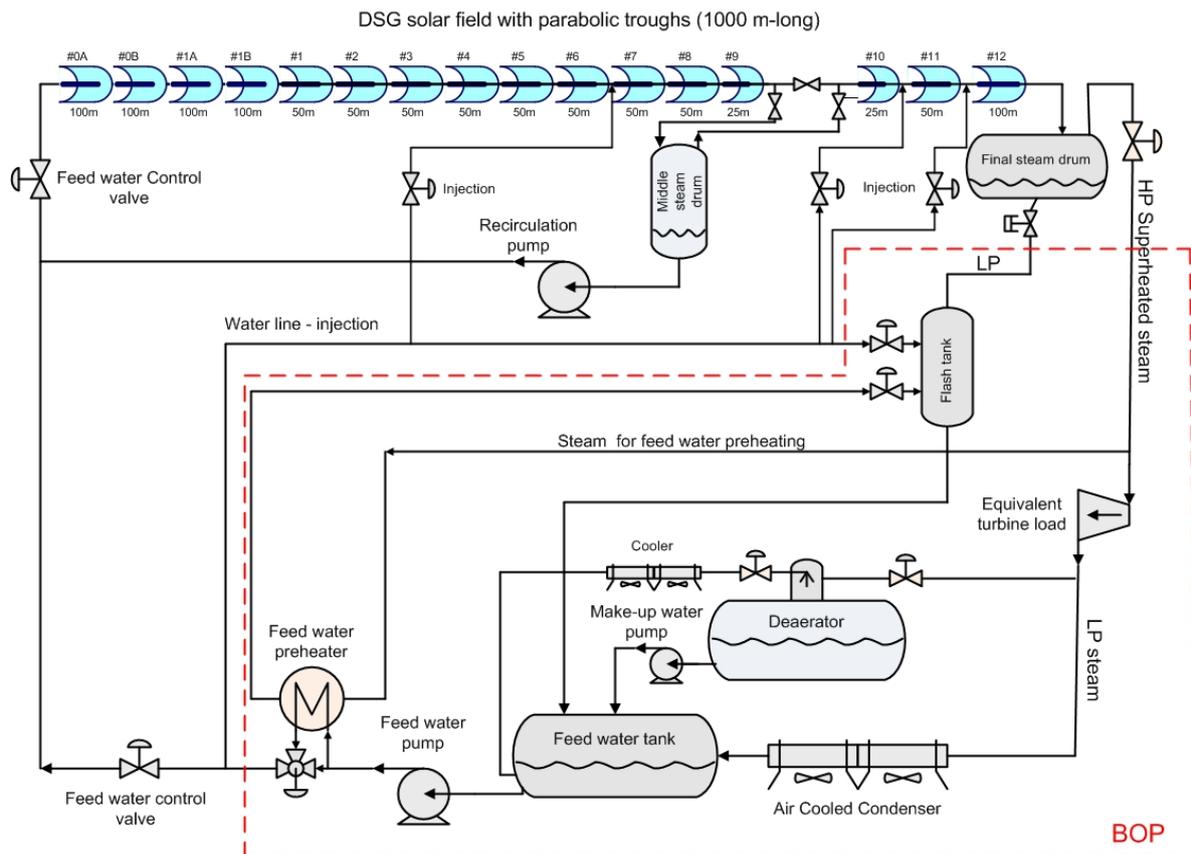


Figura 6. Diagrama de flujo simplificado del lazo DISS de la PSA.

El funcionamiento de la instalación es altamente flexible y se puede trabajar desde presiones bajas ( $\approx 30$  bar) hasta 100 bar. También está equipado con un conjunto completo de válvulas que permiten configurar el campo solar para recirculación (zonas de evaporación y sobrecalentamiento perfectamente diferenciadas), para un solo paso (el separador intermedio de agua-vapor y la bomba de recirculación ubicada en el campo solar no se utilizan en este modo de funcionamiento) y en modo de inyección (el agua de alimentación se inyecta en diferentes puntos a lo largo de la fila del captador). La instalación cuenta con una amplia gama de instrumentos para el monitorizado completo del sistema (caudales y temperaturas de los fluidos en las diversas zonas del campo solar, caídas de presión en captadores y tuberías, y gradientes térmicos en las secciones transversales de los tubos absorbedores, etc.) y un sistema de adquisición de datos y control del proceso que tiene una base de datos donde se registran datos cada 5 s.



Figura 7. Vista de la planta DISS en funcionamiento.

Entre las capacidades asociadas a esta instalación están las siguientes:

- Pruebas de componentes para campos solares de captadores cilindroparábolicos con generación directa de vapor (GDV) en sus tubos receptores (receptores, juntas rotativas o mangueras flexibles, separadores de vapor de agua, instrumentación específica, etc.)
- Estudio y desarrollo de esquemas de control para campos solares con GDV.
- Estudio y optimización de los procedimientos de operación que deben implantarse en este tipo de campos solares.
- Estudio termo-hidráulico bifásico de flujo agua/vapor en tubos horizontales con flujo de calor no homogéneo.

### 2.1.2 Lazo de ensayos HTF

El lazo de ensayos HTF se construyó en 1997 y es una instalación ideal para evaluar los componentes del captador cilindroparábolicos en condiciones reales de operación con energía solar. La instalación está debidamente equipada para cualificar y monitorizar los siguientes componentes:

- Nuevos diseños de captadores cilindroparábolicos (hasta 75 m de largo)
- Espejos de captadores cilindroparábolicos
- Tubos absorbedores de captadores cilindroparábolicos
- Nuevos diseños de juntas rotativas o mangueras flexibles para conectar captadores cilindroparábolicos en los campos solares.
- Sistemas de seguimiento solar.

La instalación consiste en un circuito cerrado de aceite térmico conectado a tres captadores solares de 75 m de longitud conectados en paralelo, pudiendo operar solo uno a la vez (ver diagrama simplificado de la instalación en la Figura 8). El eje de rotación este-oeste de los captadores solares aumenta el número de horas por año en que el ángulo de incidencia de la radiación solar es inferior a 5°. El aceite térmico utilizado en esta instalación (Syltherm 800®) tiene una temperatura máxima de trabajo de 420°C y un punto de congelación de - 40°C.

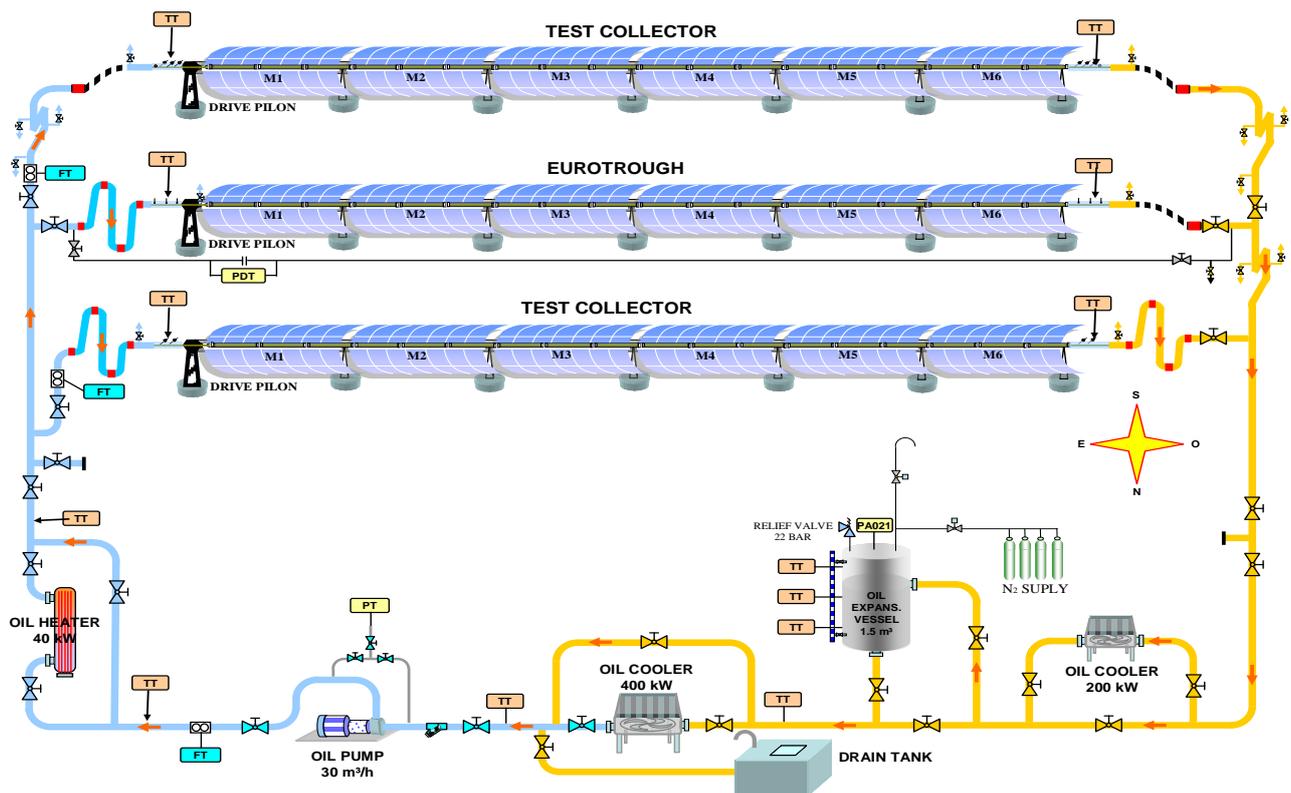


Figura 8. Diagrama del lazo de ensayos HTF situado en la PSA.

El circuito de aceite de la instalación, que tiene una presión máxima de trabajo de 18 bar, está compuesto por los siguientes elementos:

- Tanque de expansión de aceite de 1 m<sup>3</sup> de capacidad, con inertización automática de nitrógeno.
- Tanque de drenaje del circuito de aceite.
- Aeroenfriador de aceite mecánico, con control de velocidad del aire y enfriamiento máximo de 400 kW.
- Bomba centrífuga de aceite, con un caudal de hasta 8,3 litros por segundo.

- Dos calentadores de aceite eléctricos de 40 kW cada uno.

El primer prototipo de captador EuroTrough desarrollado por un consorcio europeo con la ayuda financiera de la Comisión Europea se instaló y evaluó en condiciones reales de trabajo en esta instalación en 1998. Tras esta evaluación, este prototipo de captador se utiliza para evaluar y calificar nuevos diseños de tubos receptores, reflectores y otros componentes para captadores cilindroparabólicos.

Las actividades principales en el lazo de ensayos HTF están relacionadas con el estudio del rendimiento óptico y térmico de captadores cilindroparabólicos completos (eficiencia óptica, modificador por ángulo de incidencia (IAM) y eficiencia global/pérdidas de calor) y tubos receptores.

### **2.1.3 PROMETEO: Instalación de ensayo para verificar nuevos componentes y fluidos de transferencia de calor para grandes captadores cilindroparabólicos**

Un circuito cerrado experimental está instalado en el área noreste de la PSA. Fue diseñado y construido por la empresa Iberdrola Ingeniería y Sistemas en 2010, comenzando la campaña de ensayos a lo largo del año siguiente. La planta piloto fue transferida a CIEMAT-PSA para ser utilizada como lazo de ensayos.

El lazo de ensayos orientado este-oeste permite la calificación de todos los componentes de un captador y de captadores completos de una longitud de hasta 150 m, es decir, estructuras, reflectores, receptores de 70 a 90 mm de diámetro y juntas móviles. Permite el seguimiento solar que cubre todos los ángulos de incidencia de radiación solar en un día gracias a su orientación este-oeste. Está equipado con instrumentación y controles de alta precisión para mediciones rigurosas, rápidas y automatizadas. Actualmente hay dos captadores cilindroparabólicos de 100 m de largo y con una longitud de apertura de 7,5 m cada uno instalados en la planta piloto.

Los módulos captadores se conectan al balance de planta (BOP) en configuración paralela o en serie utilizando la válvula ad hoc. Una bomba circula el fluido de transferencia de calor de silicona (SHTF) con un flujo de masa similar al de las centrales eléctricas comerciales. El flujo másico se mide directamente usando un caudalímetro tipo Vortex y los tipos de medidor de flujo de presión diferencial. Un enfriador de aire controlado disipa la energía recolectada y asegura una temperatura HTF constante ( $\pm 1\text{K}$ ) en la entrada del campo de captadores. Los sensores para medir las temperaturas de entrada y salida son muy precisos y pueden calibrarse in situ. Una estación meteorológica proporciona datos precisos de radiación y viento.



Figura 9. Vista de la instalación de ensayos PROMETEO.

#### 2.1.4 La instalación del Lazo de Ensayo de Captadores Cilindroparabólicos (PTTL)

Esta gran instalación de ensayo se implementa en una parcela de 420 m x 180 m de la PSA y se compone de dos campos solares:

- el campo Norte está diseñado para instalar con una orientación E-O captadores cilindroparabólicos completos con una longitud máxima de 180 m la unidad. Se pueden instalar hasta cuatro captadores completos en paralelo.
- el campo Sur está diseñado para instalar lazos completos de captadores cilindroparabólicos (PTC), es decir, varios captadores conectados en serie, con una longitud máxima de 640 m y orientados Norte-Sur. Se pueden instalar hasta cuatro lazos completos en paralelo.

Cada campo cuenta con un circuito de aceite completo instalado en una plataforma de hormigón de 30 m x 30 m entre los dos campos, y ambos circuitos comparten: un tanque de expansión de aceite con una capacidad de 30 m<sup>3</sup>, una caldera de gas con una potencia térmica de 250 kW, una estación meteorológica equipada con radiación solar, sensores de temperatura ambiente y de viento, y el sistema de adquisición de datos (DAS). Además, de estos elementos comunes, el circuito de aceite asociado a los campos Norte y Sur se compone de:

- Campo norte: una bomba de aceite (75 m<sup>3</sup>/h) provista de control de velocidad, un enfriador de aceite refrigerado por aire (1,5 MWt) capaz de enfriar el aceite a 70°C cuando la temperatura del aire ambiente es de 40°C, tuberías de aceite que conectan el circuito a los elementos comunes (es decir, tanque de expansión y calentador de aceite).
- Campo sur: una bomba de aceite (125 m<sup>3</sup>/h) provista de control de velocidad, un enfriador de aceite refrigerado por aire (4 MWt), tubería de aceite que conecta el circuito a los elementos comunes (es decir, tanque de expansión y calentador de aceite).

Cada circuito de aceite también cuenta con un tanque de drenaje de aceite lo suficientemente grande como para recibir todo el aceite existente en el circuito, un conjunto completo de sensores para monitorizar el flujo másico del aceite, las presiones y temperaturas, así como válvulas de control para regular el flujo de aceite a valores deseados según los ensayos a realizar.

Esta instalación de ensayo de tamaño real al aire libre ofrece las siguientes posibilidades:

- Calificación de prototipos PTC completos que evalúan su eficiencia óptica máxima, modificador de ángulo de incidencia y pérdidas térmicas,
- Evaluación de la durabilidad y fiabilidad de los espejos PTC, tubos receptores, juntas rotativas, mangueras flexibles, sistemas de seguimiento solar y todos los elementos instalados en filas completas de captadores,
- Evaluación de algoritmos de control en campo solar PTC

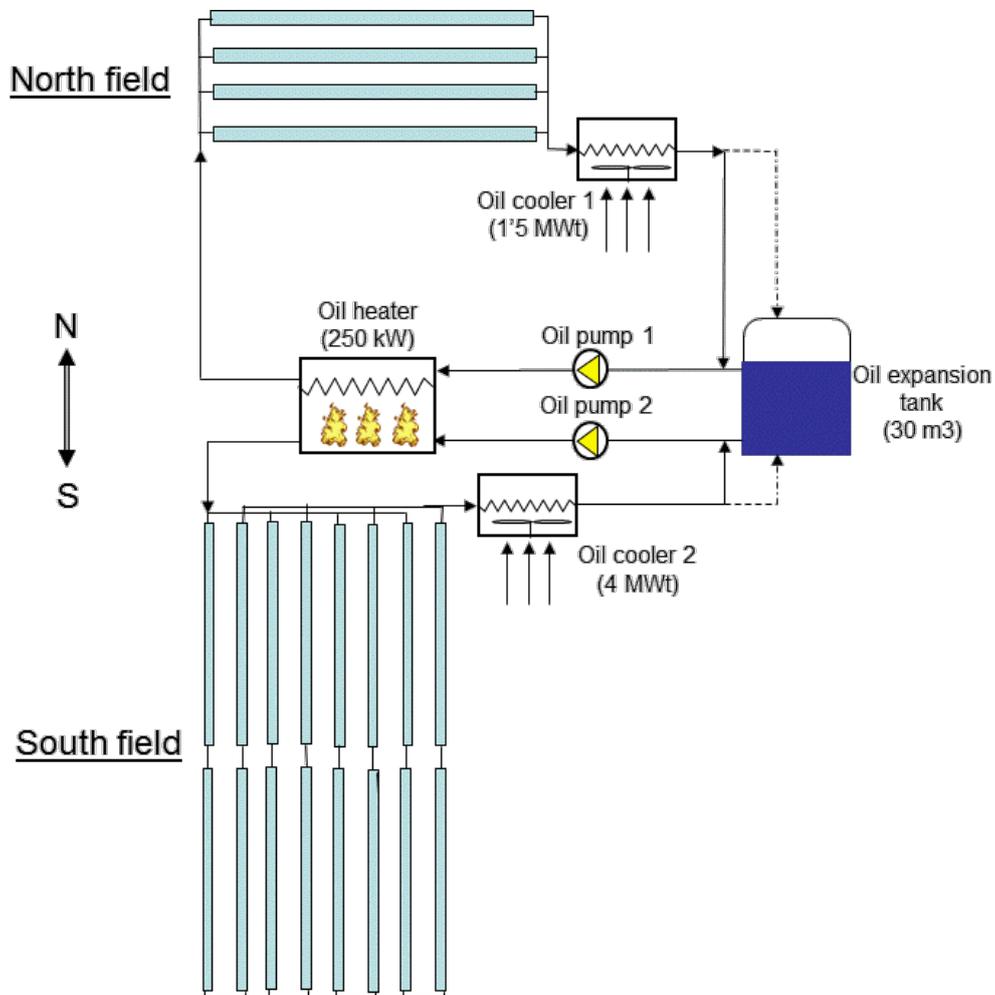


Figura 10. Esquema simplificado de la instalación PTTL.

### 2.1.5 NEP: La instalación para Aplicaciones de Poligeneración

La poligeneración es un proceso integral cuyo objetivo es obtener tres o más productos a partir de uno o varios recursos naturales. En el caso de la energía solar, la energía térmica procedente de un campo solar se emplea para varias aplicaciones simultáneas, tales como generación de electricidad, desalación de agua para suministro de agua potable y obtención de agua caliente sanitaria (ACS).

El objetivo de esta instalación es el estudio preliminar del comportamiento de un campo solar de captadores cilindroparábolicos con baja relación de concentración, la evaluación de su viabilidad como fuente de calor en diseños de poligeneración, en particular en procesos CSP+D (es decir, generación de electricidad + desalación de agua) que requieren temperaturas alrededor de 200°C.

El captador solar seleccionado fue el prototipo Polytrough 1200 de NEP Solar. Tiene una producción de 15,8 kW por módulo (0,55 kW/m<sup>2</sup>) en condiciones nominales, con una temperatura media del captador de 200°C, y una eficiencia por encima del 55% en el rango de 120-220°C (para 1.000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia directa normal).

El campo está configurado con ocho captadores colocados en 4 lazos conectados en paralelo, con 2 captadores en serie por cada lazo. Esta configuración aporta 125 kW de energía térmica. La temperatura del aceite térmico puede ser de hasta 220°C, lo que permite así evaluar diferentes esquemas de poligeneración utilizando energía solar térmica.

Actualmente el campo solar también se utiliza para generar vapor para alimentar la bomba de calor por absorción de doble efecto de la planta MED de PSA.

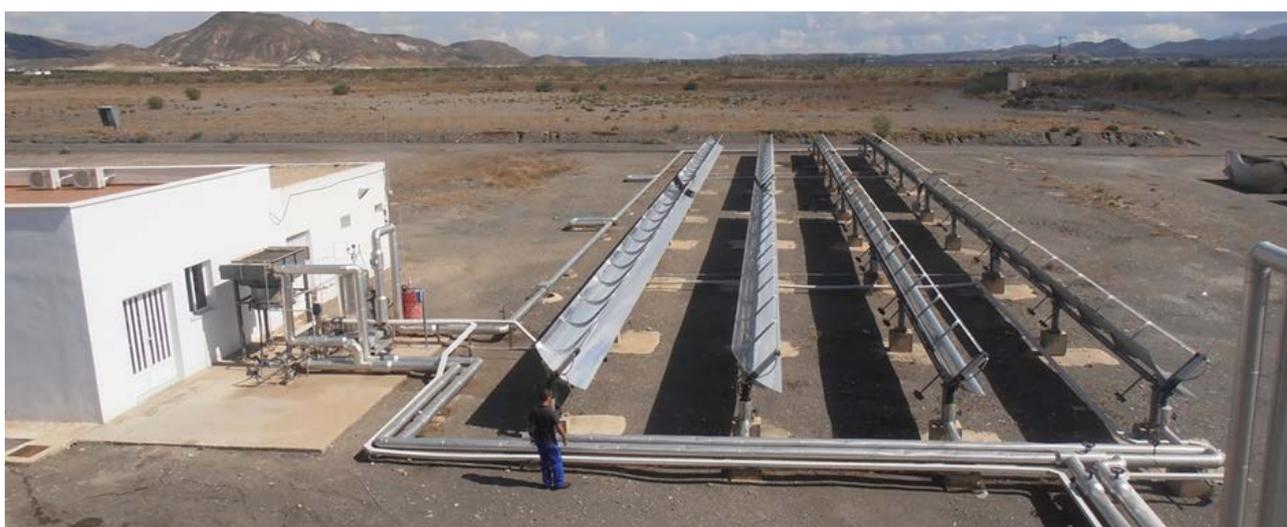


Figura 11. Campo solar NEP PolyTrough 1200.

### **2.1.6 Lazo de Ensayos de Fluidos Innovadores (gases presurizados) en captadores cilindroparabólicos**

El objetivo de esta instalación experimental es estudiar el uso de gases presurizados como fluido de transferencia de calor en captadores cilindroparabólicos, evaluando su comportamiento bajo diversas condiciones reales de operación.

El lazo de ensayos experimental (ver Figura 12) se encuentra al norte del edificio de control de la planta experimental DISS, que alberga el equipo necesario para el control y la adquisición de datos de este lazo de ensayos experimental. Este lazo de ensayos fue diseñado originalmente para trabajar a presiones y temperaturas de hasta 100 bar y 400°C, y consta de los siguientes componentes:

- Dos captadores cilindroparabólicos EUROtrough orientados Este-Oeste, cada uno de 50 m de largo con una superficie de captador de 274,2-m<sup>2</sup>. Los captadores están conectados en serie.
- Un enfriador de aire de 400 kW capaz de disipar la energía térmica en el fluido suministrado por los captadores. Cuenta con dos ventiladores motorizados de 4 kW.

- Un ventilador impulsado por un motor de 15 kW que suministra el caudal de gas necesario para enfriar adecuadamente los tubos del receptor.
- Un sistema de adquisición y control de datos que permite monitorizar completamente la temperatura, el caudal, la presión, el haz de irradiancia solar y la humedad en el sistema.
- Válvulas de control automático que permiten una variación precisa y segura en el caudal de alimentación del fluido del captador.
- Un circuito auxiliar para llenar los tubos del circuito de prueba con el gas utilizado como fluido de transferencia de calor.



Figura 12. Vista de la instalación experimental IFL (con captadores cilindroparabólicos) utilizando gas comprimido como fluido de transferencia de calor.

Dado que las pruebas a 400°C se completaron con éxito a finales de 2009, esta instalación se actualizó para alcanzar temperaturas de hasta 515°C y se conectó a un sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas de dos tanques para probar su capacidad conjunta para recolectado y almacenamiento de energía solar térmica con el fin de utilizarla en ciclos térmicos de alto rendimiento. Este aumento en las condiciones de trabajo del lazo de ensayos a 100 bar y 515°C hizo necesaria la implementación de diferentes mejoras en su diseño (los tubos absorbedores convencionales en uno de los dos captadores fueron reemplazados por tubos avanzados de alta temperatura, se instalaron tubos de acero inoxidable para la zona de alta temperatura y se hicieron cambios en el sistema de control).

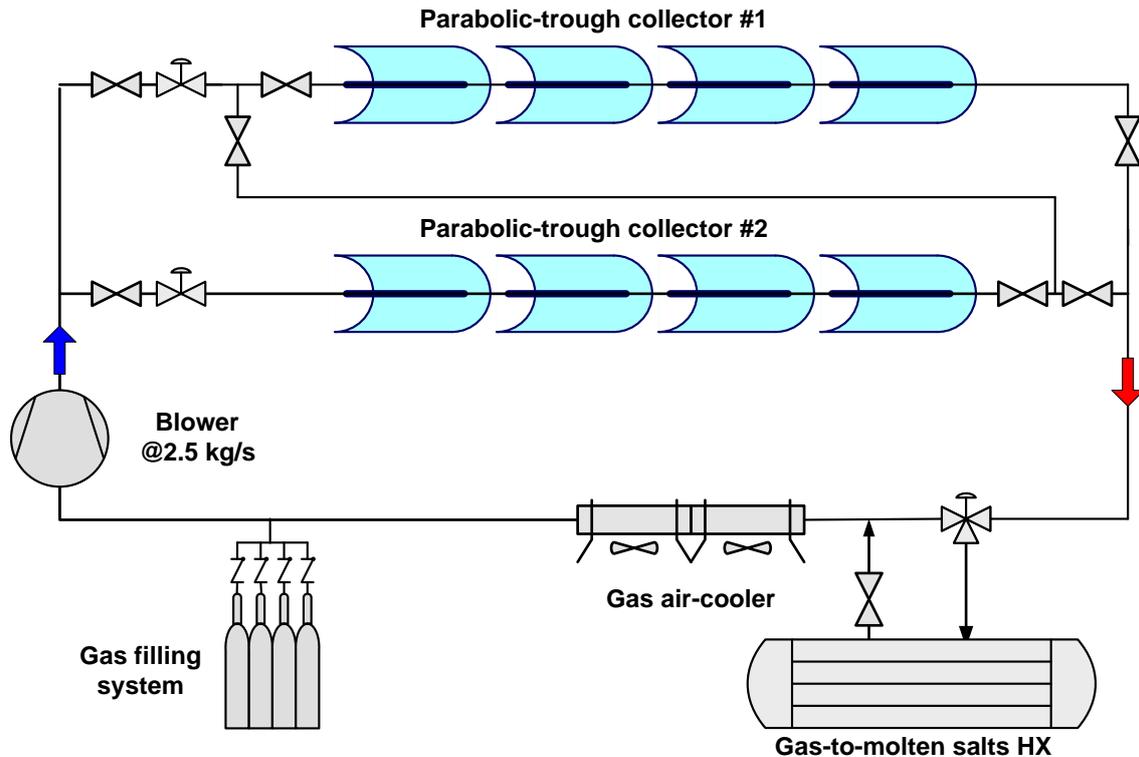


Figura 13. Diagrama simplificado del sistema de instalación experimental IFL situado en la PSA.

### 2.1.7 Instalación de captadores cilindroparábolicos TCP-100 2.3-MWth

Esta instalación de ensayos se implementó en 2014 y está compuesta por el campo solar TCP-100 y un tanque de almacenamiento de termoclina con 115 m<sup>3</sup> de aceite térmico Santotherm-55.

El campo solar está compuesto por seis captadores cilindroparábolicos, modelo PTC-100, instalados en tres lazos paralelos, con dos captadores en serie dentro de cada lazo, ver Figura 14. Cada captador está compuesto por ocho módulos de captadores cilindroparábolicos con una longitud total de 100 m y un ancho de parábola de 5,77 m. La superficie total de captación solar de cada captador es de 545 m<sup>2</sup>. La distancia focal es 1,71 m, el factor de intercepción geométrica es  $\geq 0,95$ , y el rendimiento óptico máximo es 77,5%. Los tubos receptores utilizados en este campo solar fueron suministrados por Archimede Solar Energy (Italia) y el fluido de trabajo es Syltherm®800.

El campo solar está conectado a un tanque de expansión de aceite de 10 m<sup>3</sup> para una temperatura máxima de 400°C. La energía térmica se puede transferir desde el circuito primario del campo solar a un tanque de almacenamiento de aceite termoclino con un volumen total de 176 m<sup>3</sup> y 115 m<sup>3</sup> de aceite Santotherm 55 con una temperatura máxima de trabajo de 300°C.

Esta instalación de ensayos está especialmente diseñada para realizar estudios relacionados con sistemas de control para campos solares de captadores cilindroparábolicos. Esta es la razón por la cual hay dos lazos de captadores con el sistema de seguimiento solar desarrollado por PSA, mientras que el tercer lazo está provisto con un sistema comercial de seguimiento solar con movimiento continuo.

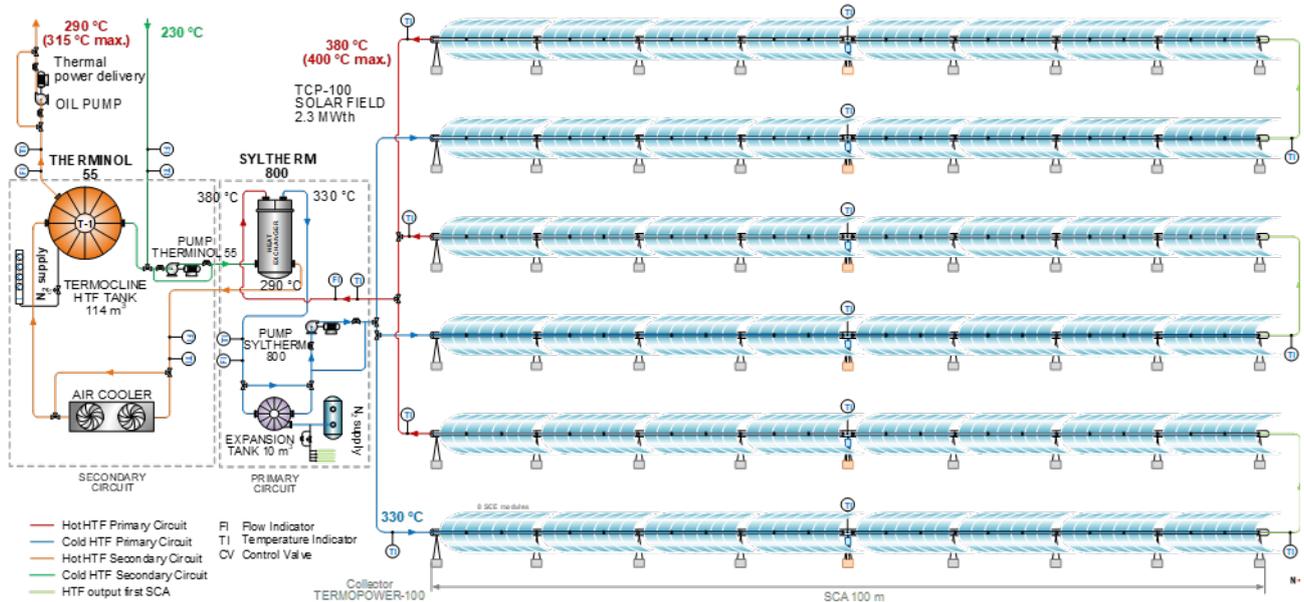


Figura 14. Diagrama de la instalación de captadores cilindroparabólicos TCP-100 2,3 MWth.

## 2.2 Otros Sistemas de Ensayo de Componentes para la Tecnología Cilindroparabólica

### 2.2.1 KONTAS: Banco de ensayos giratorio para sistemas cilindroparabólicos

En 2009 se construyó en la PSA un banco de pruebas giratorio para componentes de captadores cilindroparabólicos, KONTAS. El concepto fue desarrollado por DLR en el marco del acuerdo hispano-alemán entre CIEMAT y DLR, esta instalación de prueba ahora es utilizada conjuntamente por ambas entidades.

El banco de pruebas permite la calificación de todos los componentes del captador y módulos completos de una longitud de hasta 20 m, es decir, estructuras, reflectores, receptores y juntas flexibles. Permite un seguimiento de la radiación solar incidente en cualquier ángulo deseado. Está equipado con instrumentación y controles de alta precisión para mediciones rigurosas, rápidas y automatizadas.

El banco de ensayos descansa sobre raíles montados directamente sobre la base. Estos raíles forman un anillo interno y otro externo. El captador en sí está montado sobre una plataforma de acero con seis ruedas de acero. La rotación de la plataforma en los raíles alrededor del rodamiento central se realiza mediante motores que impulsan cuatro de estas ruedas.

El módulo captador está conectado a una unidad de calentamiento y refrigeración del aceite térmico, que también se encuentra en la plataforma. Una bomba hace circular el aceite térmico Syltherm 800® como fluido de transferencia de calor (HTF) con un flujo másico similar al de filas de captadores solares cilindroparabólicos de las plantas comerciales. El caudal másico se mide directamente utilizando el principio de medición de Coriolis permitiendo minimizar las incertidumbres de la densidad. La unidad de calefacción y refrigeración disipa la energía que el HTF caliente recoge atravesando el módulo y garantiza una temperatura de HTF constante ( $\pm 1K$ ) en la entrada del

captador. Los sensores para medir las temperaturas de entrada y salida son muy precisos y pueden calibrarse in situ. Una estación meteorológica de alta precisión proporciona datos precisos de radiación y viento.



Figura 15. Vista lateral del banco de ensayos KONTAS y la unidad de calefacción/refrigeración (lado derecho).

### 2.2.2 Ensayos acelerados de vida útil del comportamiento de ensamblajes de rotación y expansión (REPAs) para sistemas cilindroparabólicos

La instalación de prueba REPA es el resultado de fusionar las actividades de CIEMAT en la Tarea 14.4 del proyecto europeo SFERA-II (terminado en 2017) y las actividades de DLR en el marco del proyecto nacional alemán StaMeP. La instalación ahora es utilizada por CIEMAT y DLR en una colaboración conjunta.

El banco de pruebas se divide en dos secciones funcionales, la llamada unidad cinemática, para sostener y mover las piezas REPA que se probarán, y la unidad de balance de planta para suministrar el fluido de transferencia de calor acondicionado (ver Figura 16.a).

La unidad de balance de planta está compuesta por una bomba HTF de velocidad variable que circula el HTF a través de una tubería con un tipo de collar calefactor eléctrico adaptado antes de pasar por REPA para ser probado, colocado en la unidad cinemática. La línea de retorno va directamente al lado de succión de la bomba que cierra el circuito. El sistema está conectado a un tanque de expansión capaz de compensar la diferencia de volumen causada por la variación de densidad del fluido de trabajo cuando cambia su temperatura.

La unidad cinemática (ver Figura 16.b) está preparada para acomodar muestras de juntas rotativas y mangueras flexibles con geometrías variables y ajustables, tales como longitudes focales. Está preparada para realizar movimientos de rotación y traslación con las siguientes características:

- Unidad de accionamiento: estructura modificada de la unidad de accionamiento EuroTrough
- El ángulo de rotación es de 205° y la posición de reposo a 25° hacia abajo
- Hasta 45° de movimiento lateral, representando la expansión térmica del tubo absorbedor
- Preparada para las dimensiones de los nuevos diseños de PTC (longitud focal desde 1 m a 2,3 m)
- Medida de las fuerzas de reacción y torsión de los ensamblajes a ensayar

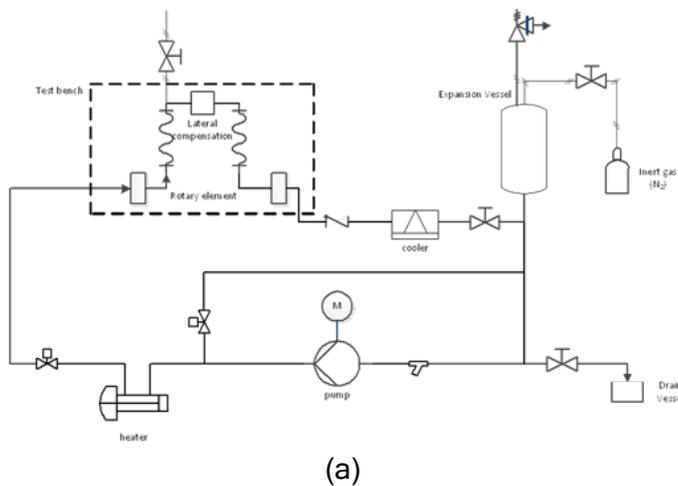


Figura 16. Diagrama esquemático del lazo de ensayo REPA de PSA (a) y vista norte de la instalación de ensayo (b).

### 2.2.3 El Lazo FRESEDEMO

El lazo FRESEDEMO es una planta de demostración piloto de la tecnología 'Concentrador Lineal Fresnel'. Este módulo de 100 m de longitud y 21 m de ancho tiene una superficie total de espejo primario de 1.433 m<sup>2</sup> distribuidos en 1.200 facetas montadas sobre 25 filas paralelas que abarcan toda la longitud del lazo. Este lazo captador está diseñado para DSG a una presión máxima de 100 bar y una temperatura máxima de 450°C.

Este lazo se conecta a las tuberías a la planta DISS de la PSA, desde donde se le suministra vapor de origen solar de diferentes calidades, presiones y temperaturas con el fin de realizar ensayos en tres regímenes de trabajo diferentes: precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento.



Figura 17. Vista del captador lineal Fresnel levantado en la PSA.

## 2.3 Sistemas de Almacenamiento Térmico

### 2.3.1 Lazo de Ensayos de Sales Fundidas para Sistemas de Energía Térmica

Esta instalación está compuesta, por un lado, de un lazo de ensayos situado en el exterior, que es una réplica de un sistema comercial de almacenamiento de energía térmica con 40 t de sales de nitrato fundidas y una configuración doble-tanque y, por otro lado, de un banco de ensayos situado en el interior de un edificio llamado BES-II.

El lazo exterior MOSA, es la mayor instalación experimental a nivel mundial similar a un sistema comercial de almacenamiento con sales fundidas de doble tanque a escala reducida, por lo que todo lo relacionado con este tipo de sistemas puede ser probado en esta instalación a escala relevante y extrapolada. Algunas aplicaciones de esta instalación son:

- Comprobación de componentes (bomba, caudalímetros, etc.) para su utilización en un entorno de sales fundidas.
- Optimización de los procedimientos de operación normal para una configuración de un sistema de dos tanques.
- Optimización de procedimientos de actuación en situaciones de riesgo para una configuración de un sistema de dos tanques.
- Validación de modelos y simulación de sistemas térmicos de sales fundidas.
- Caracterización de intercambiadores para sales fundidas/aceite térmico.
- Caracterización de tanques termoclinos.

Para más información ver: M.M. Rodríguez-García, M. Herrador Moreno, E. Zarza Moya, 2014, Lessons learnt during the design, construction and start-up phases of a molten salt testing facility, [Applied Thermal Engineering, 62 - 2, 520-528](#), ISSN 1359-4311.



Figura 18. Lazo de ensayos exterior de sales fundidas (MOSA).

BES-II, una instalación interior de la PSA, está especialmente diseñada para probar válvulas, transmisores de presión y otros pequeños componentes de las sales fundidas en condiciones reales de trabajo hasta 600°C y 40 bar. En este banco de ensayos pueden probarse componentes con diámetros nominales desde 2" hasta 6".



Figura 19. Banco de ensayos interior de MOSA (BES-II).

Para más información ver: M.M. Rodríguez-García, E. Rojas, M. Pérez, 2016, Procedures for testing valves and pressure transducers with molten salt, [Applied Thermal Energy, 101, 139-146](#).

### 2.3.2 Banco de pruebas de lecho empacado con aire atmosférico

Esta instalación tiene un tanque de almacenamiento aislado de  $0,1 \text{ m}^3$  en el que se pueden probar diferentes configuraciones de materiales y lechos empacados, utilizando aire atmosférico como fluido de transferencia de calor. Con una potencia eléctrica máxima de 15 kW, es posible un proceso de carga con aire hasta  $900^\circ\text{C}$ . Los termopares a lo largo de su longitud y en diferentes posiciones radiales proporcionan un mapa preciso de temperaturas del lecho empacado.

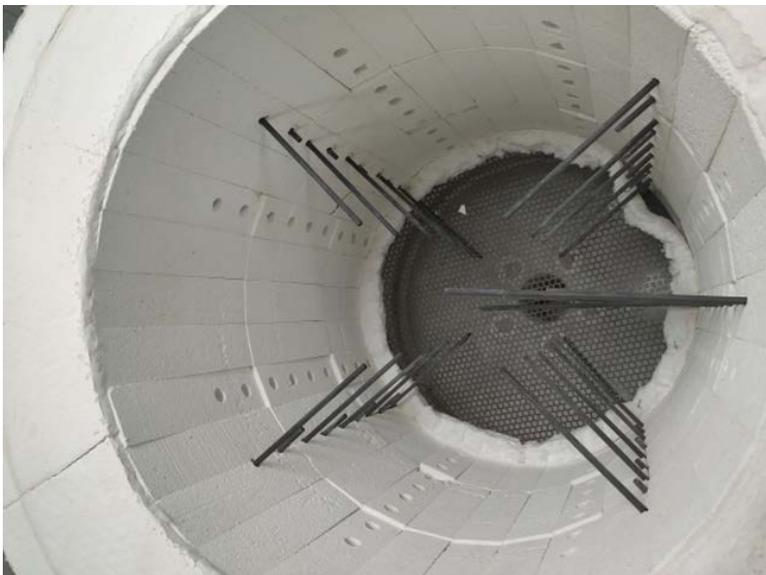


Figura 20. Fotografía tomada desde la parte superior del tanque, mostrando su espacio interior y los termopares a diferentes longitudes y posiciones radiales.



Figura 21. Investigadora ajustando algunos parámetros desde la parte superior del tanque.

Para más información ver: E. Alonso, E. Rojas, R. Bayón, 2020, Packed-bed thermocline testing facility with air as HTF for sensible thermal energy storage, Eurosun 2020 Congress

## 2.4 Sistemas de Receptor Central

La PSA tiene dos instalaciones excepcionales para ensayos y validación de componentes y aplicaciones de tecnología de receptor central. Las instalaciones SSPS-CRS y CESA-I permiten llevar a cabo proyectos y validar tecnologías en el rango de cientos de kilovatios. Son instalaciones al aire libre especialmente acondicionadas para escalar y cualificar sistemas antes de la demostración comercial.

### 2.4.1 La Planta CESA-I de 6 MWth

La planta CESA-I (ver Figura 22) se inauguró en mayo de 1983 para demostrar la viabilidad de las plantas solares de receptor central y permitir el desarrollo de la tecnología necesaria. En la actualidad, la planta CESA-I es una instalación muy flexible operada para probar subsistemas y componentes tales como heliostatos, receptores solares, almacenamiento térmico, turbinas de gas solarizadas, sistemas de control e instrumentos de medición de radiación solar concentrada de alto flujo. También se usa para otras aplicaciones que requieren altas concentraciones de fotones en superficies relativamente grandes, como en procesos químicos o de alta temperatura, tratamiento superficial de materiales o experimentos de astrofísica.



Figura 22. La instalación CESA-I vista desde el norte.

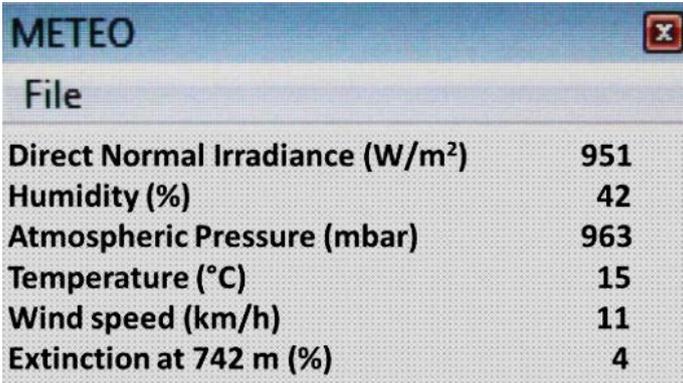
La radiación solar directa es recolectada por el campo de 330 x 250 m con orientación sur de 300 heliostatos de 39,6 m<sup>2</sup> distribuidos en 16 filas. Los heliostatos tienen un valor de reflectancia medio nominal de 0,91, el error de seguimiento solar en cada eje es de 1,2 mrad y la calidad de la imagen del haz reflejado es de 3 mrad. La instalación CESA-I tiene la experiencia más extensa en heliostatos de vidrio y metal en el mundo, con unidades de primera generación fabricadas por SENER y CASA, así como unidades de segunda generación con facetas reflectantes fabricadas por ASINEL y facetas y prototipos de tercera generación desarrollados por CIEMAT y SOLUCAR. A pesar de tener más de 20 años, el campo de heliostatos está en buenas condiciones de funcionamiento debido a un programa estratégico de reemplazo continuo de facetas y mantenimiento y reemplazo de los mecanismos de accionamiento.

Al norte del campo solar CESA-I hay dos áreas adicionales utilizadas como plataformas de prueba para nuevos prototipos de heliostatos, uno ubicado a 380 m de la torre y el otro a 500 m de la torre.

La potencia térmica máxima entregada por el campo en la apertura del receptor es de 6 MWth con una irradiancia de diseño típica de 950 W/m<sup>2</sup>, logrando un flujo máximo de 3,3 MW/m<sup>2</sup>. El 99% de la potencia se concentra en un círculo de 4 m de diámetro y el 90% en un círculo de 2,8 m.

Actualmente, la medida de extinción solar está disponible on-line en la sala de control de la instalación de la PSA CESA-I, facilitando las tareas de operación diarias (Figura 23). Cabe destacar que esto es la primera vez que sucede en una planta de torre solar. El sistema de medición de la extinción ha sido desarrollado por CIEMAT en la PSA y funciona tomando imágenes simultáneas del mismo objetivo Lambertiano a muy diferentes distancias utilizando dos sistemas ópticos idénticos con cámaras digitales, lentes y filtros adecuados.

En este momento se encuentra en funcionamiento un contador de partículas en suspensión cuya medición es de interés para estudios de extinción solar, ensuciamiento y evaluación de receptores volumétricos.



METEO	
File	
Direct Normal Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	951
Humidity (%)	42
Atmospheric Pressure (mbar)	963
Temperature (°C)	15
Wind speed (km/h)	11
Extinction at 742 m (%)	4

Figura 23. Medición on-line de la extinción solar en la sala de control de la instalación CESA-I.

#### 2.4.2 La instalación SSPS-CRS de 2,5 MWth

La planta SSPS-CRS fue inaugurada como parte del proyecto SSPS (Small Solar Power Systems) de la Agencia Internacional de Energía en septiembre de 1981. Originalmente concebida para demostrar la generación continua de electricidad, inicialmente utilizó un receptor refrigerado por sodio líquido que también actuaba como medio de almacenamiento térmico. En la actualidad, esta

instalación de ensayo se dedica principalmente a probar pequeños receptores solares en el rango de 200 a 500 kWth.



Figura 24. Vista aérea de la instalación experimental SSPS-CRS.

El campo de heliostatos está compuesto por 91 unidades de primera generación de 39,3 m<sup>2</sup> fabricadas por Martin-Marietta. El campo de heliostato SSPS-CRS original se mejoró hace varios años con la conversión de todos sus heliostatos en unidades completamente autónomas alimentadas por energía fotovoltaica, con control centralizado comunicado por radio utilizando un concepto desarrollado y patentado por investigadores de PSA (Figura 25). Este primer campo de heliostatos autónomo, que no requiere de infraestructura para el cableado, fue posible gracias a la asistencia financiera del programa PROFIT del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España.



Figura 25. Un heliostato autónomo en el campo SSPS-CRS.

El valor nominal promedio de reflectividad del campo es de 0,90, el error de seguimiento solar es de 1,2 mrad por eje y la calidad del haz óptico reflejado es de 3 mrad. En condiciones típicas de  $950 \text{ W/m}^2$ , la potencia térmica total reflejada por el campo solar es de 2,5 MW<sub>th</sub> y su flujo máximo es de  $2,5 \text{ MW/m}^2$ . El 99% de la potencia se recoge en una circunferencia de 2,5 m de diámetro y el 90% en una circunferencia de 1,8 m. La torre de metal de 43 m de altura tiene tres plataformas de ensayo. Los dos primeros están ubicados a 28 y 26 m, y están preparados para probar nuevos receptores para aplicaciones termoquímicas. La tercera plataforma de ensayo está en la parte superior de la torre a 43 m, y alberga una habitación cerrada con grúa y banco de pruebas calorimétricas para la evaluación de pequeños receptores volumétricos de presión atmosférica y reactores solares para la producción de hidrógeno. La infraestructura de la torre se completa con una grúa con capacidad para 4 TN y un montacargas con capacidad de 1.000 kg.

La torre SSPS-CRS está equipada con una gran cantidad de dispositivos auxiliares que permiten la ejecución de una amplia gama de pruebas en el campo de la química termosolar. Todos los niveles de ensayo tienen acceso a aire presurizado ( $29 \text{ dm}^3/\text{s}$ , 8 bar), nitrógeno puro suministrado por una planta criogénica, donde el  $\text{N}_2$  líquido se almacena en un tanque de líquido con una capacidad de 6 TN. Esta instalación es eficiente y segura de operar y es extremadamente versátil para proporcionar todas las variantes posibles. La planta puede proporcionar caudales de  $\text{N}_2$  desde 70 kg/h a 250 kg/h con autonomía de varios días o incluso semanas. También hay generadores de vapor con capacidad de 20 y 60 kg/h de vapor, agua de refrigeración con una capacidad de hasta 700 kW, agua desmineralizada (ASTM tipo 2) de un tanque de almacenamiento de  $8 \text{ m}^3$  para usar en generadores de vapor o directamente en el proceso, y la infraestructura de red de datos que consiste en cable Ethernet y fibra óptica.

En la torre SSPS-CRS hay un sistema híbrido de medición de flujo de calor para medir la energía solar incidente concentrada por el campo de heliostatos. Este método comprende dos sistemas de medición, uno directo y otro indirecto. El sistema de medición directa consta de varios sensores de flujo de calor con un diámetro frontal de 6,32 mm y un tiempo de respuesta en microsegundos. Estos microsensores se colocan en una barra móvil, que se monta frente a la ventana del reactor. El sistema de medición indirecta funciona ópticamente con una cámara CCD calibrada que utiliza un sensor de flujo de calor refrigerado por agua como referencia para convertir los niveles de escala de grises en valores de flujo de calor.

En el nivel ensayo de 25 m, se puede utilizar un voladizo con un protector térmico para colocar una cámara (óptica o IR) a sólo unos metros de la apertura.

### **2.4.3 Sistema de Receptor Central AORA**

A finales de 2019, se incorporó al catálogo de instalaciones de la PSA un nuevo sistema de torre. El sistema de receptor central AORA es una torre de 35 m con un receptor volumétrico presurizado (tipo porcupine) instalado para calentar aire a una presión de 15 bar y temperatura nominal de  $800^\circ\text{C}$ ; acoplado a una turbina de gas solarizada de 100 kW<sub>e</sub> de Ansaldo. Los  $880 \text{ m}^2$  de campo solar están compuestos por 55 heliostatos con  $16 \text{ m}^2$  de superficie reflectante cada uno. El aire caliente del escape de la turbina se puede usar también para cogeneración o poli-generación: 175 kW<sub>th</sub> de energía extra están disponibles para impulsar procesos térmicos a temperatura media-baja ( $<250^\circ\text{C}$ ).



Figura 26. Vista general del sistema de receptor central AORA.

## 2.5 Instalación de Hornos Solares

### 2.5.1 Horno Solar SF-60

El horno solar SF60 consiste básicamente en un helióstato plano de 130 m<sup>2</sup> que refleja los rayos solares en un concentrador parabólico de 108 m<sup>2</sup> que los vuelve a reflejar concentrándolos en el foco de la parábola, donde se sitúan las muestras a ensayar. La entrante de luz solar se regula mediante un atenuador de lamas situado entre el helióstato y el concentrador. Por último, el horno solar dispone de una mesa de ensayos, móvil en tres ejes, que se utiliza para colocar las muestras a ensayar en el foco.

En este horno, el helióstato recoge la radiación solar y la redirige al concentrador. La superficie reflectante del helióstato está formada por facetas planas, que reflejan los rayos solares horizontales y paralelos - sin concentración - al eje óptico del concentrador disco-parabólicos, siguiendo continuamente el sol.

El helióstato del horno solar SF-60 consta de 117 facetas planas, con una superficie reflectante de 1 m<sup>2</sup> cada una, más 52 facetas planeas de 0,25 m<sup>2</sup>, lo que da una superficie reflectante total de 130 m<sup>2</sup>. Estas facetas han sido diseñadas, fabricadas, ensambladas y alineadas por técnicos de PSA. Todas las facetas tienen forma cuadrada y consisten en un espejo plano Rioglass© de 3 mm de espesor plateado en su parte posterior (espejo de segunda superficie). Los técnicos del horno solar también son responsables de un nuevo método de fijación de la faceta en un marco que minimiza la deformación de la superficie reflectante. La Figura 27 y Figura 28 muestran el helióstato instalado en este horno solar y un detalle de la parte posterior de la faceta, respectivamente.



Figura 27. Heliostato HT120 en seguimiento.



Figura 28. Parte trasera de la faceta.

El concentrador parabólico es el componente principal del horno solar, el cual concentra la luz solar incidente proveniente del heliostato, multiplicando la energía radiante en el foco. El concentrador del horno solar SF60 está compuesto de 462 facetas hexagonales de curvatura esférica con tres radios de curvatura distintos, distribuidas de menor a mayor desde el centro al exterior de la parábola, dependiendo de su distancia al foco

El atenuador (Figura 29), consta de un conjunto de lamas horizontales, que giran sobre su eje para regular la cantidad de luz solar que incide en el concentrador. La energía total en el foco es proporcional a la radiación que atraviesa el atenuador. Finalmente, la mesa de ensayo es un soporte móvil con movimiento en los tres ejes espaciales (X, este-oeste; Y, norte-sur; Z, arriba-abajo), situado bajo el foco del concentrador, que se utiliza para ubicar con gran precisión las probetas a ensayar en el foco. También se utiliza para la instalación de diferentes soportes y dispositivos auxiliares necesarios para la realización de los ensayos.



Figura 29. Atenuador del Horno Solar SF-60 de la PSA.



Figura 30. Vista interior del Horno Solar SF-60 de la PSA en funcionamiento.

La combinación de todos los componentes descritos da lugar a la distribución de densidad de flujo en el foco, que es lo que caracteriza a un horno solar. Esta distribución generalmente tiene una geometría gaussiana. Para la medida de la distribución de la densidad de flujo en el foco se utiliza una cámara CCD conectada a un procesador de imágenes y un blanco lambertiano. Las características del foco con una apertura del 100% y una radiación solar de  $1.000 \text{ W/m}^2$  son: flujo máximo,  $650 \text{ W/cm}^2$ , potencia total, 80 kW y diámetro focal, 20 cm.

## 2.5.2 Horno Solar SF-40

El horno solar SF-40 consiste principalmente en un disco parabólico de 8,5 m de diámetro, y  $56,5 \text{ m}^2$  de superficie de reflexión, con una distancia focal de 4,5 m (ver Figura 31). La superficie del concentrador consta de 12 pétalos o sectores curvados de fibra de vidrio cubiertos con espejos adhesivos de 0,8 mm en la cara frontal. La parábola así formada se mantiene en la parte posterior mediante una estructura de anillo espacial para darle rigidez y mantenerla vertical. El nuevo horno solar SF-40 alcanza una concentración máxima de 5.000 soles y tiene una potencia de 40 kW. Su tamaño de enfoque es de 12 cm de diámetro y ángulo de borde  $\alpha = 50,3^\circ$ . Su eje óptico es horizontal y es del tipo "on-axis", esto es, colector parabólico, foco y helióstato están alineados en el eje óptico de la parábola. Además del concentrador, el horno SF40 incluye un helióstato plano con una superficie reflectante de  $100 \text{ m}^2$ , un atenuador de lamas y una mesa de ensayos con movimiento de tres ejes.

El foco del SF-40 está dispuesto en el plano vertical. Para trabajar en el plano horizontal, en el área focal se dispone de un espejo inclinado provisto de sistema de refrigeración, que gira  $90^\circ$  el haz de rayos incidentes en el foco, situándolo en el plano horizontal. La instalación se completa con un sistema de gas y una cámara de vacío -MiniVac 2-, que permite realizar pruebas en atmósfera controlada y en vacío, para que las muestras no se oxiden durante los ensayos.

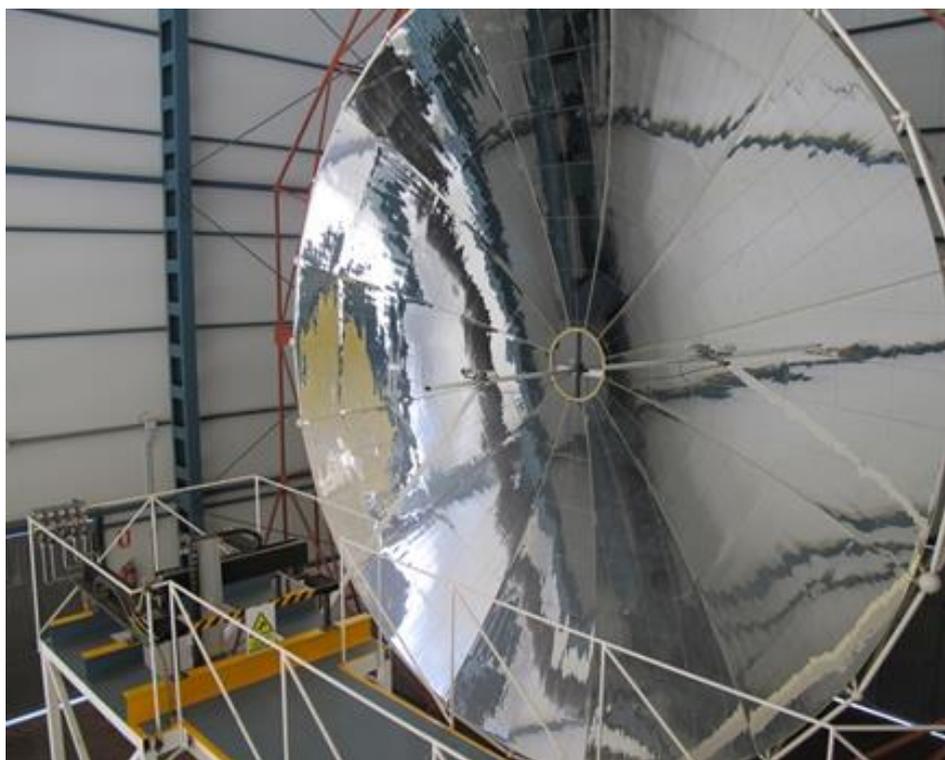


Figura 31. Interior del Horno Solar SF-40, mostrando el captador parabólico.

### 2.5.3 Horno Solar SF-5

Diseñado y construido en el PSA, este sistema está en funcionamiento desde 2012 y está enfocado a pruebas que requieren un alto flujo radiante, fuertes gradientes y muy altas temperaturas. El Horno Solar SF5 tiene una potencia de 5 kW, alcanza concentraciones superiores a 7000 soles, su diámetro de enfoque es de 2,5 cm, y se dedica principalmente al tratamiento térmico de materiales a alta temperatura, en condiciones de vacío y de atmósfera controlada, para lo que se utiliza una cámara de vacío provista de un sistema de gas.

Difiere sustancialmente del horno solar SF60 existente en PSA y la mayoría de los hornos solares operativos, ya que funciona en un eje vertical, es decir, el captador parabólico y el helióstato están alineados verticalmente en el eje óptico del paraboloide mientras que, en la mayoría de los hornos solares existentes, están alineados horizontalmente. La principal ventaja de los hornos solares de eje vertical es que el foco está dispuesto en un plano horizontal, de modo que las muestras pueden tratarse en una superficie horizontal, simplemente colocándolas directamente en el foco, solo con un soporte y ninguna fijación, evitando problemas de pérdida de material por gravedad en aquellos ensayos en las que el tratamiento requiere la fusión superficial de las muestras.

Básicamente consiste en un espejo captador de 8,7 m<sup>2</sup>, colocado boca abajo con la superficie reflectante orientada hacia el suelo, situado en una torre metálica de 18 m de altura. En el centro de la base de la torre hay un helióstato plano de 25 m<sup>2</sup>, cuyo centro de rotación está alineado con el eje óptico del concentrador. En la parte superior de la torre, en la sala de ensayos, y 2 m debajo del vértice del captador, hay una mesa de ensayos. Finalmente, bajo la mesa de ensayos y al nivel del suelo de la sala de ensayos, se sitúa el atenuador de lamas.



Figura 32. Captador del horno solar SF-5.

## 2.6 Sistemas Parabólicos DISH

### 2.6.1 EURODISH

Bajo el proyecto hispano-alemán EUROdish, se diseñaron y construyeron dos nuevos prototipos de disco/Stirling (ver Figura 33), descartando la tecnología de membrana tensionada y aplicando un sistema moldeado de material compuesto. Estos discos parabólicos se pueden usar para probar nuevos prototipos de motores Stirling, o para realizar cualquier otra prueba que requiera un foco con 50 kWth como máximo y una concentración máxima de 16.000 soles en el foco.



Figura 33. Vista frontal y trasera del EURODISH.

## 2.6.2 Banco de ensayos de envejecimiento acelerado y durabilidad de materiales

Esta instalación consta de 3 unidades de disco parabólico modelo DISTAL-II con 50 kW de potencia térmica total y sistema de seguimiento solar de dos ejes. En los discos DISTAL-II, los motores Stirling iniciales han sido reemplazados por diferentes plataformas de prueba para colocar los materiales o prototipos a pequeña escala de receptores de alta concentración y realizar ciclos de temperatura acelerados. Con ciclos de enfoque y desenfoque rápidos, las muestras colocadas en el foco del captador parabólico soportan una gran cantidad de ciclos térmicos en un corto intervalo de tiempo, lo que permite un envejecimiento acelerado del material. Estas plataformas se pueden utilizar para una gran variedad de aplicaciones: ensayos con materiales, ensayos con receptores volumétricos enfriados por aire (metal o cerámica), ensayos con prototipos de receptores de pequeño tamaño con o sin fluido de transferencia de calor, etc.

Los tres discos parabólicos DISTAL-II (Figura 34) se instalaron en la PSA en 1996 y 1997, utilizando la tecnología de membrana estirada. Estos discos parabólicos tienen un diámetro de 8,5 m, proporcionando una energía térmica de 50 kWth con unas condiciones nominales de insolación ( $950 \text{ W/m}^2$ ). Su distancia focal es de 4,1 m, presentando una concentración máxima de 16.000 soles en el foco. Estos captadores se pueden usar para cualquier experimento que requiera un enfoque con las características mencionadas anteriormente (50 kWth máximo y 16.000 soles de concentración máxima en el foco).

El banco de pruebas de durabilidad y envejecimiento acelerado de materiales se complementa con el laboratorio para las evaluaciones de durabilidad y caracterización de materiales bajo radiación solar concentrada existente en PSA, que se describe en la sección de laboratorios de este documento (sección 3.3).



Figura 34. Vista del disco parabólico DISTAL- II con el motor original Stirling.



Figura 35. Pruebas de envejecimiento acelerado en prototipos de tubos metálicos en un disco parabólico DISTAL-II.

## 2.7 Instalaciones experimentales de Desalación Solar

## 2.7.1 Instalaciones de Destilación Multiefecto

### 2.7.1.1 Instalación de Destilación Solar Multiefecto

Esta instalación está formada por los siguientes subsistemas:

- Planta (MED) de destilación multiefecto de 14 etapas.
- Campo de captadores solares estáticos de placa plana y gran apertura.
- Sistema de almacenamiento térmico basado en agua.
- Bomba de absorción de calor de doble efecto (LiBr-H<sub>2</sub>O).
- Caldera de gas pirotubular.

La unidad de destilación multiefecto está formada por 14 etapas o efectos, dispuestas verticalmente y con alimentación directa de agua de mar al primer efecto (configuración de alimentación frontal o forward-feed). Con un caudal nominal de alimentación de 8 m<sup>3</sup>/h, la producción de destilado es de 3 m<sup>3</sup>/h, y el consumo térmico de la planta es 190 kWth, con una relación de rendimiento (kg de destilado producidos por cada 2.326 kJ de energía térmica suministrados a la planta) por encima de 9. La concentración salina del destilado se sitúa alrededor de 5 ppm. La diferencia de temperatura nominal entre la primera etapa y la última es de 40°C, con una temperatura máxima de operación de 70°C en la primera etapa. El fluido de transferencia de calor en el sistema es agua, que se calienta a su paso por el campo de captadores solares y la energía adquirida es transferida a su vez al sistema de almacenamiento. El agua caliente procedente de este sistema de almacenamiento aporta a la planta MED la energía térmica necesaria para su operación.



(a)



(b)



(c)

Figura 36. La planta MED SOL-14 de la PSA (a) bomba de absorción de calor de doble efecto LiBr-H<sub>2</sub>O (b) y campo de 606-m<sup>2</sup> de captadores solares estáticos (c).

El campo solar (AQUASOL-II) está formado por 60 captadores estáticos de placa plana (Wagner LBM 10HTF) con un área total de apertura de 606 m<sup>2</sup> y está conectado con un sistema de almacenamiento térmico (40 m<sup>3</sup>) a través de un intercambiador de calor.

La bomba de calor por absorción de doble efecto (LiBr-H<sub>2</sub>O) está conectada al último efecto de la planta MED. El vapor saturado de baja presión (35°C, 56 mbar abs) generado en esta última etapa aporta al evaporador de la bomba de calor la energía térmica necesaria a baja temperatura, que de otra manera sería vertida al medioambiente, reduciendo a la mitad el consumo de energía térmica necesario para un proceso convencional de destilación multiefecto. El sistema fósil de apoyo es una caldera de gas propano que asegura las condiciones de operación de la bomba de calor (vapor saturado a 180°C, 10 bar abs), así como la operación de la planta MED en ausencia de radiación solar.

### 2.7.1.2 Banco de ensayos para Aplicaciones de Desalación Solar Térmica

El objetivo de esta instalación es el estudio del rendimiento de captadores solares estáticos de gran apertura y su comportamiento cuando se acopla a sistemas de desalación térmica que operan a temperaturas de entre 60-90°C.

El modelo de captador instalado es el LBM 10HTF con 10,1 m<sup>2</sup> de área de apertura y fabricado por Wagner & Co. El campo solar está formado por 60 captadores con 606 m<sup>2</sup> de área de apertura total y una potencia térmica de 323 kWth en condiciones nominales de operación (rendimiento de conversión solar-térmica del 59% para una irradiancia global de 900 W/m<sup>2</sup> y una temperatura media del captador de 75°C).



Figura 37. El campo solar de 606-m<sup>2</sup> con captadores de placa plana de gran apertura (AQUASOL-II).

El campo AQUASOL-II está formado por 4 lazos con 14 captadores individuales en cada lazo (dos filas conectadas en serie por lazo con 7 captadores conectados en paralelo por fila), y un pequeño lazo adicional con 4 captadores conectados en paralelo, todos ellos con una inclinación de 35° y orientación sur. Cada fila tiene su propio sistema de llenado/vaciado que consiste en dos depósitos de agua, desde los que se bombea el fluido de transferencia de calor a los captadores al comienzo de la operación diaria y donde se vuelve a depositar todo el volumen de agua de los captadores, bien al final de la operación o cuando se alcanza el límite de temperatura (por encima de 100°C). El campo solar tiene válvulas de control de caudal que permiten tener una distribución uniforme del mismo en todos los lazos sin regulación adicional. Además, la instalación dispone de un enfriador de aire que permite la disipación de toda la energía del campo solar por completo, lo que resulta muy útil para ensayos de rendimiento a distintas temperaturas. Los cinco lazos de captadores están conectados con un sistema de almacenamiento térmico a través de un intercambiador de calor. El sistema de almacenamiento térmico consiste en dos tanques de agua conectados entre sí, con una capacidad total de almacenamiento de 40 m<sup>3</sup>. Este volumen permite suficiente autonomía de operación al sistema fósil de apoyo para alcanzar las condiciones nominales de operación en la planta desaladora.

La flexibilidad del campo solar permite la operación de cada lazo independientemente, por medio de sus propias válvulas y sistema de bombeo. Cada lazo está conectado a un intercambiador de calor individual que ofrece la posibilidad de acoplarlo con cualquier sistema de desalación térmica a baja temperatura para llevar a cabo ensayos bajo condiciones reales de radiación solar.

## **2.7.2 Instalación CSP+D**

### *2.7.2.1 Banco de Ensayos CSP+D: Integración de la Planta de Desalación MED y Plantas Termosolares de Generación Eléctrica*

Esta instalación está dedicada a la investigación del acoplamiento entre plantas termosolares de generación directa (CSP) y de desalación (CSP+D). La instalación está compuesta por dos generadores de vapor (250 kW y 500 kW) que se abastecen energéticamente mediante el aceite térmico procedente de un campo solar de captadores cilindroparabólicos capaz de operar con temperaturas de hasta 400°C y un sistema eléctrico auxiliar para el aumento de temperatura a demanda hasta los 530°C. Los generadores de vapor pueden producir vapor a distintas presiones, lo que permite recrear cualquiera de las extracciones intermedias típicas o el vapor exhausto a la salida de una turbina en una planta termosolar de potencia. El vapor de baja presión se obtiene haciendo pasar el vapor obtenido de los generadores por dos secciones de tuberías diferentes (diámetro 12") equipada con válvulas de control, lo que permite obtener vapor saturado a dos niveles diferentes: 0,074 bar/42°C (caudal nominal de 119 kg/h, caudal máximo de 360 kg/h) y a 0,16 bar/58°C (caudal nominal de 195 kg/h, caudal máximo de 360 kg/h).

El vapor de alta y baja presión se utilizan como vapor motriz y de succión, respectivamente, en un tren de cuatro eyectores de vapor acoplados a la planta MED de la PSA, simulando el comportamiento de una planta MED trabajando con termocompresión de vapor (TVC-MED). Los eyectores de vapor pueden trabajar con vapor motriz en un amplio rango de condiciones de presión (40 - 6 bar; 4 - 2 bar), lo que también permite la caracterización experimental de este tipo de dispositivos. A su vez, el vapor de baja presión también se puede condensar a través de dos aerocondensadores convencionales evitando su paso a través de por los eyectores de vapor, con objeto de investigar en el campo de sistemas de refrigeración de plantas CSP. La flexibilidad de la instalación permite la evaluación de prototipos innovadores de sistemas de refrigeración en

condiciones reales de operación y su comparación con aerocondensadores convencionales disponibles en el mercado.



Figura 38. Vista exterior del edificio CSP+D con sus aerocondensadores (a) y vista parcial del interior del banco de ensayo CSP+D (b).

#### 2.7.2.2 Planta piloto de refrigeración híbrida

Esta instalación de ensayos es una planta piloto completamente equipada para evaluar sistemas innovadores de refrigeración para plantas CSP. En la actualidad la instalación cuenta con un refrigerador híbrido compuesto por una torre de refrigeración húmedo y una torre de refrigeración seca (Intercambiador de calor refrigerado por aire). El circuito hidráulico del banco de ensayos ha sido diseñado para poder hacer experimentos con refrigeración húmeda y seca de manera individual al igual que en configuración conjunta, tanto en serie como en paralelo. La instalación también puede comparar un sistema de refrigeración híbrido con un condensador convencional refrigerado por aire.

La instalación de refrigeración híbrida consta de tres circuitos: circuito de refrigeración, circuito de intercambio y circuito de calefacción. En el circuito de refrigeración, el agua refrigerante que circula dentro del haz tubular de un condensador de superficie se enfría a través del aerocondensador ( $200 \text{ kW}_{th}$ ) y de la torre de refrigeración húmeda ( $200 \text{ kW}_{th}$ ), que son prototipos funcionales que han sido construidos por la empresa francesa Hamon D'Hondt. En el circuito de intercambio, un generador de vapor de  $80 \text{ kW}_{th}$  produce vapor saturado (en torno a  $120 - 300 \text{ kg/h}$ ) a diferentes temperaturas ( $42 - 60^\circ\text{C}$ ), que después es condensado en el condensador de superficie mientras libera el calor de condensación al agua refrigerante aumentando su temperatura. El condensado procedente del condensador de superficie va a un depósito que suministra agua al generador de vapor a través de una bomba cuando es necesario. En el circuito de calefacción, el campo solar de captadores estáticos AQUASOL-II suministra el agua caliente que acciona el generador de vapor. La instalación también puede comparar el sistema de refrigeración híbrido con un aerocondensador convencional ( $335 \text{ kW}_{th}$ ). Para ello, se ha instalado un bypass en el circuito de intercambio para que el generador de vapor pueda proporcionar el vapor tanto al condensador de superficie conectado al refrigerador híbrido como al aerocondensador.

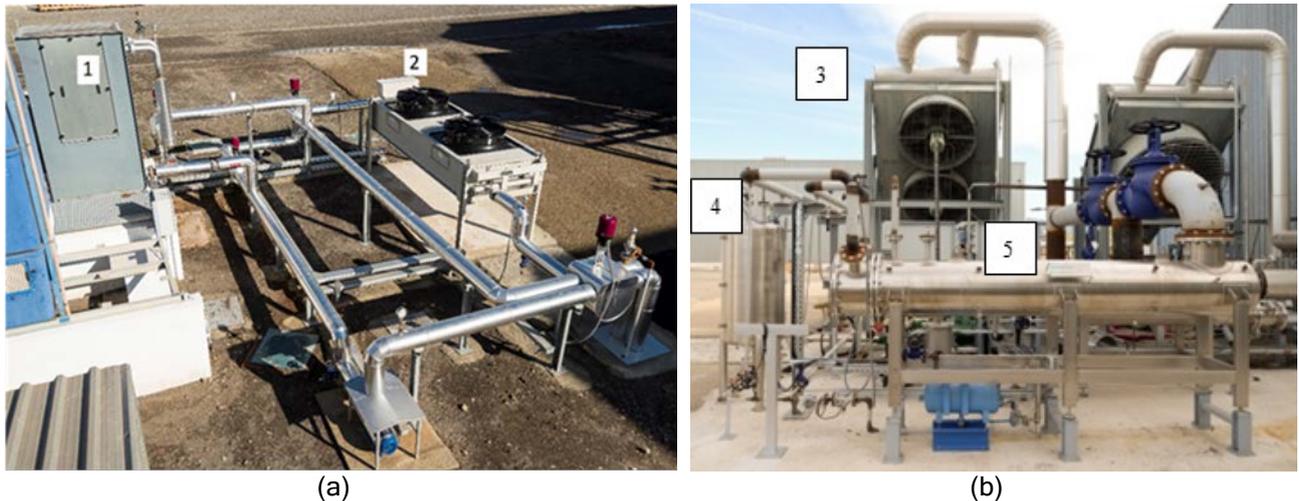


Figura 39. Vista general del banco de ensayos de refrigeración-híbrida: (a) Circuito de refrigeración: torre de refrigeración húmeda (1) y aereocondensador (2). (b) Circuito de intercambio: condensador refrigerado por aire (3), depósito de condensación (4) y condensador de superficie (5).

### 2.7.3 Instalaciones de Ensayo de Destilación por Membranas

La instalación está diseñada para la evaluación de aplicaciones de desalación solar térmica. Hay dos campos solares de captadores planos: uno de 20 m<sup>2</sup> con dos filas paralelas de cinco captadores en serie (Solaris CP1 Nova, de Solaris, España), y otra de 40 m<sup>2</sup> con cuatro captadores de gran tamaño en paralelo (LBM 10HTF, de Wagner Solar, España). Ambos campos están conectados a tanques de agua de 1.500 litros que sirven de acumuladores de calor para la regulación térmica y almacenamiento, y tienen un sistema de distribución que permite la conexión simultánea de varias unidades. Los bancos de ensayos permiten un suministro de calor estacionario utilizando el almacenamiento térmico o suministro directo de energía solar sin almacenamiento. La instalación está completamente automatizada y monitorizada (temperaturas y caudales) y permite la regulación del caudal de calor. La potencia térmica máxima es 7 kWth en un caso y 14 kWth en el otro, y puede suministrar agua caliente con temperatura de hasta 90°C aproximadamente.

La instalación tiene un circuito de agua separado que puede utilizarse para refrigeración (alrededor de 3.5 kWth) en las unidades de desalación y como un sistema para suministrar agua de mar simulada, con la posibilidad de trabajar en lazo abierto o cerrado. En el último caso, las corrientes de destilado y salmuera son recogidas y mezcladas juntas para ser reutilizadas como alimentación en las unidades de desalación pasando a través de un sistema de disipación de calor. Actualmente la instalación opera con módulos de destilación por membranas y tiene una amplia gama de prototipos comerciales y pre-comerciales de distintos fabricantes. La lista de módulos MD que han sido o están siendo evaluados es:

- 1) Módulos comerciales de placa y marco en configuración “air-gap” (AGMD) de Scarab (superficie total de membrana 2,8 m<sup>2</sup>).
- 2) Dos prototipos de placas y marcos en configuración “permeate-gap” (PGMD) de Keppel Seghers (ambos con una superficie total de membrana de 9 m<sup>2</sup>), uno compacto (M33) y otro dividido en tres módulos separados conectados en serie para mayor recuperación energética (PT5).



(a)



(b)

Figura 40. Vista interior (a) y exterior (b) del banco de ensayos experimental de Destilación por Membranas dentro de la instalación de Desalación solar térmica de la PSA.

- 3) Módulos comerciales PGMD de enrollamiento Oryx 150 de Solar Spring (10 m<sup>2</sup>).
- 4) Dos módulos de enrollamiento AGMD de Aquastill con superficie de membrana de 7 m<sup>2</sup> y 24 m<sup>2</sup> cada uno.
- 5) Unidades WTS-40A y WTS-40B de Aquaver, basados en la tecnología de destilación por membranas de vacío multi-efecto utilizando módulos fabricados por Memsys (5,76 m<sup>2</sup> y 6,4 m<sup>2</sup> superficie total de membrana respectivamente).
- 6) Dos módulos en espiral de Trimem que operan en configuración PGMD con una superficie total de membranas de 5,15 y 6,1 m<sup>2</sup>.
- 7) Tres módulos en espiral de Aquastill que operan en configuración AGMD mejorada con vacío,

con una superficie total de membranas de 7,2 y 25,9 m<sup>2</sup>, respectivamente.

### 2.7.3.1 Planta Piloto para el estudio de Combinaciones de Ósmosis Directa y Ósmosis Inversa

La planta tiene tres unidades diferentes (Figura 41) que pueden ser acopladas de distinta forma entre ellas: (i) ósmosis directa; (ii) osmosis inversa; (iii) microfiltración. La unidad de ósmosis directa (FO) consta de un módulo en espiral de 4" de membrana de triacetato de celulosa (CTA) con once hojas de membranas de 1,5 m<sup>2</sup> de superficie cada una, suministradas por HTI. El caudal nominal es 3,6 m<sup>3</sup>/h. La unidad de osmosis inversa (RO, del inglés reverse osmosis) tiene 4 depósitos que pueden ser conectados en serie o en paralelo, con 4 membranas cada uno. El caudal nominal es 3 m<sup>3</sup>/h, y el sistema de bombeo puede trabajar a distintas presiones hasta un máximo de 80 bar. La unidad está diseñada para que se puedan ensayar membranas para ósmosis inversa de agua de mar (SWRO, del inglés seawater reverse osmosis), osmosis inversa de agua salobre (BWRO, del inglés brackish water reverse osmosis) o nanofiltración (NF, del inglés nanofiltration). Finalmente, hay una unidad de microfiltración con 3 m<sup>3</sup>/h de caudal nominal. La instalación está completamente monitorizada con sensores de presión, conductividad y caudalímetros, y está diseñada de manera flexible con respecto a la interconexión de las unidades, de forma que la FO puede utilizarse como pretratamiento para la RO, la NF puede utilizarse en combinación con la FO, e incluso la FO puede utilizarse en modo PRO (ósmosis por presión retardada) utilizando el sistema de bombeo de la unidad de RO.



Figura 41. Banco de ensayos para la investigación combinada de FO-RO.

### 2.7.3.2 Sistema de suministro de agua de mar en circuito cerrado para ensayos de destilación.

Este sistema consta de tres depósitos con un volumen total de 300 m<sup>3</sup> de agua de mar real conectados en serie (Figura 42). Los depósitos están conectados a un circuito hidráulico que permite suministrar agua a las diferentes plantas pilotos de desalación de la PSA con el caudal requerido por cada una de ellas. El circuito también puede retornar la salmuera y el agua destilada a los depósitos, para que el volumen total y la salinidad se conserven.



Figura 42. Depósitos llenos de agua de mar real para realizar ensayos de desalación en circuito cerrado.

## 2.8 Instalaciones experimentales de Tratamientos Solares del Agua

Las principales instalaciones relacionadas con la purificación de agua solar se enumeran y describen a continuación:

- Plantas piloto CPC solar (captador parabólico compuesto).
- Simuladores solares.
- Planta piloto UVC.
- Planta piloto de ozonización.
- Planta piloto de nano-filtración
- Planta piloto para la producción foto-catalítica de hidrógeno con energía solar.
- Planta piloto de oxidación con aire húmedo.
- Planta piloto de electro-oxidación.
- Equipamiento para monitorizar radiación solar (UVA y global).
- Plantas piloto para tratamiento biológico.
- Cámara de cultivo experimental.

## 2.8.1 SOLWATER

### Plantas piloto CPC solares

Desde 1994 se han instalado varias plantas piloto CPC en las instalaciones de PSA (Figura 43). Básicamente, estas plantas piloto solares están formadas por módulos que pueden conectarse en serie. Cada módulo consta de una serie de fotorreactores colocados en el foco de un espejo de aluminio anodizado con forma de captador parabólico compuesto (CPC) para optimizar la captación de fotones solares en el tubo fotorreactor. Los módulos se colocan en una plataforma inclinada a 37° de la horizontal para maximizar la captación solar global de fotones durante todo el año. Además, las plantas piloto pueden estar equipadas con sistemas adicionales para diferentes propósitos, por ejemplo: tanques de sedimentación (para recuperación de catalizador), sistemas de calefacción y enfriamiento para control de temperatura, acoplamiento con otras tecnologías de tratamiento como biotratamiento, ozonización, etc. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los reactores CPC ya instalados.

Tabla 1. Resumen de las plantas piloto CPC disponibles en las instalaciones de PSA.

Año	CPC (m <sup>2</sup> )	Volumen total / iluminado (L)	Flujo o estático	Diámetro del tubo (mm)	Sistemas añadidos/Características
1994	3x3	250/108	Flujo	50	
2002	15	300	Flujo	32	
2004 (CADOX)	4	75/40	Flujo	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 50L sistema de ozonización</li> <li>- Sistema de tratamiento biológico del agua</li> <li>- Seguimiento (pH, T, ORP, O<sub>2</sub>, caudal, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) y control (pH, T, caudal)</li> </ul>
2007 (SOLEX)	3,08(x2)	40/22	Flujo	32	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prototipos gemelos</li> <li>- Pantalla de Plexiglass</li> <li>- Control del O<sub>2</sub> disuelto y de la temperatura</li> <li>- Especialmente desarrollado para aplicaciones de foto-Fenton</li> </ul>
2008 (FIT)	4,5	60/45	Flujo	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguimiento (pH, T, O<sub>2</sub>, caudal) y control (T (20-55°C), caudal).</li> <li>- Tanque de sedimentación de 100 L para la separación por catalizadores</li> </ul>
2010 (FIT-2)	4,5	60/45	Flujo	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguimiento (pH, T, O<sub>2</sub>, caudal) y control (T (20-55°C), O<sub>2</sub>, caudal)</li> <li>- -Tanque de sedimentación</li> </ul>
2011 (HIDRO-CPC)	2,1	25/14,24	Flujo	32	<ul style="list-style-type: none"> <li>- -Acopado a la planta de generación de H<sub>2</sub></li> </ul>
2011 (CPC25)	1	25/11,25	Flujo	50	
2013 (ELECTROX)	2	40/25	Flujo	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acoplado a la planta de electro-foto-Fenton</li> </ul>
2013 (NOVO75)	2	74/68.2	Flujo	75	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguimiento (pH, T, O<sub>2</sub>, caudal) y control (T, O<sub>2</sub>, caudal)</li> </ul>
2013 (CPC25)	1	25/11,25	Flujo o estático	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De volumen variable. Versátil para diferentes volúmenes de agua</li> </ul>
2013 (SODIS-CPC)	0.58(x2)	25/25	Estático	200	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo coste, sin sistema de recirculación</li> </ul>
2016 (NOVO 75 V1.0)	2.03 (x2)	34 o 53	Flujo o estático	75	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dos módulos: CPC o tipo-U utilizados alternativamente</li> <li>- Tubos instalados en posición vertical</li> <li>- Inyección de aire en los tubos</li> </ul>

Año	CPC (m <sup>2</sup> )	Volumen total / iluminado (L)	Flujo o estático	Diámetro del tubo (mm)	Sistemas añadidos/Características
					<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguimiento (pH, T, O<sub>2</sub>, caudal) y control (T, O<sub>2</sub>, caudal)</li> <li>- Sistema de control automático para llenar el sistema en función de la energía incidente</li> <li>- Panel solar para calentar agua</li> </ul>



(a)



(b)

Figura 43. Vista de varias plantas piloto CPC solares para purificación de agua. a) instalaciones CPC I, b) instalaciones CPC II.

Como se menciona en la Tabla 1, el foto-reactor CADOX está completamente monitorizado (pH, T, ORP, O<sub>2</sub>, caudal, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y controlado (pH, T, caudal). Además, conectado a este fotorreactor, hay un sistema biológico de tratamiento de agua que consta de tres tanques: un tanque cónico de 165 L para el acondicionamiento de aguas residuales, un tanque de recirculación cónica de 100 L y un reactor biológico de fondo plano de 170 L. El reactor biológico consiste en un sistema de lecho fijo donde soportes de polipropileno de anillo Pall® que ocupan 90-95 L del total del reactor pueden ser colonizados por el fango activo procedente de una EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales).

La Figura 44 muestra el captador CPC de 2 m<sup>2</sup> que consta de 10 tubos de vidrio de borosilicato (50 mm de diámetro), un volumen iluminado de 22 L y un volumen total de 75 L. Este reactor es un ejemplo de acoplamiento entre sistemas de tratamiento, en particular este CPC está conectado a cuatro electrocélulas para la investigación experimental en procesos electro-foto-Fenton para la descontaminación y desinfección de aguas.

En 2016, se instaló en la PSA una nueva planta piloto con dos módulos de captadores de 2 m<sup>2</sup> con una geometría de espejo diferentes (CPC y espejo tipo U) (Figura 45). Está compuesto por un tanque de alimentación de polipropileno de 192 L de volumen total y un tanque de preparación de 92,5 L, conectado por gravedad a los foto-reactores tipo CPC y U, con volúmenes operativos de 34 y 53 L, respectivamente. Toda la planta piloto está equipada y controlada automáticamente por un sensor solar UVA. Además, la planta piloto está equipada con un panel de calentamiento solar de agua que permite aumentar la temperatura del agua antes de descargarla en los fotorreactores.



Figura 44. Vista de un CPC 2 m<sup>2</sup> (ELECTROX) acoplado a planta piloto Electro-Fenton.



Figura 45. Vista de planta piloto con módulo tipo CPC y tipo-U (NOVA 75 V 1.0).

### Simuladores solares

Junto con estas plantas piloto, hay dos simuladores solares provistos de lámparas de xenón para experimentos de descontaminación y desinfección de agua a pequeña escala. En ambos sistemas, la intensidad de la radiación se puede controlar y modificar. Ambos simuladores solares XLS+ contienen un filtro UV (Suprax) con limitación de longitud de onda a 290 nm que simula la radiación solar externa. La temperatura también se puede modificar y controlar en ambos sistemas mediante un sistema de enfriamiento (SUNCOOL).

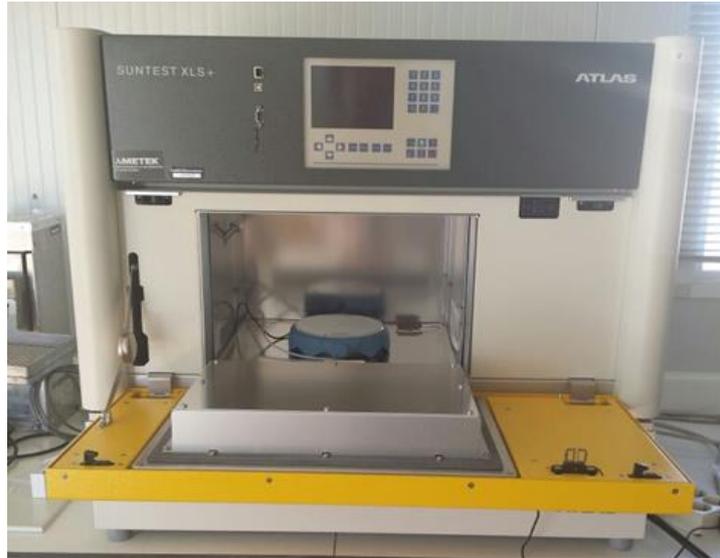


Figura 46. Simulador solar SUNTEST XLS+.

### Planta piloto de ozonización

La planta piloto de ozonización está equipada con un generador de oxígeno (Anseros SEP100), un generador de ozono (corona-discharge, Anseros COM-AD02), dos analizadores no-dispersivos de UV (BMT 964) para medir la entrada y salida de concentración de ozono en fase gaseosa, un caudalímetro para regular la entrada de aire, sistema dosificador de reactivos y control automático de pH. Además, la planta piloto también tiene un sensor de pH insertado en la línea de recirculación. En 2016 se añadió nueva instrumentación: (i) equipo para la eliminación de humedad en la salida de gas de ozono, (ii) destructor de ozono residual termocatalítico, y (iii) sensor de ozono disuelto.

En 2020 se mejoró la planta piloto de ozonización con el objetivo principal de incrementar la transferencia de masa en la fase gaseosa-líquida del sistema. El reactor tipo columna de contacto incrementó su volumen de 20 a 580 L (Figure 47.a) y se ha instalado un sistema de inyección de ozono presurizado con un volumen total de 110 L que permite operar el sistema (Figure 47.b) mediante inyección de ozono en micro-nano-burbujas (bomba venturi, Figure 47.c). Este sistema de ozonización funciona por lotes permitiendo la combinación con otras tecnologías tales como CPC, fotorreactores, fotocatalisis y la planta piloto UV.

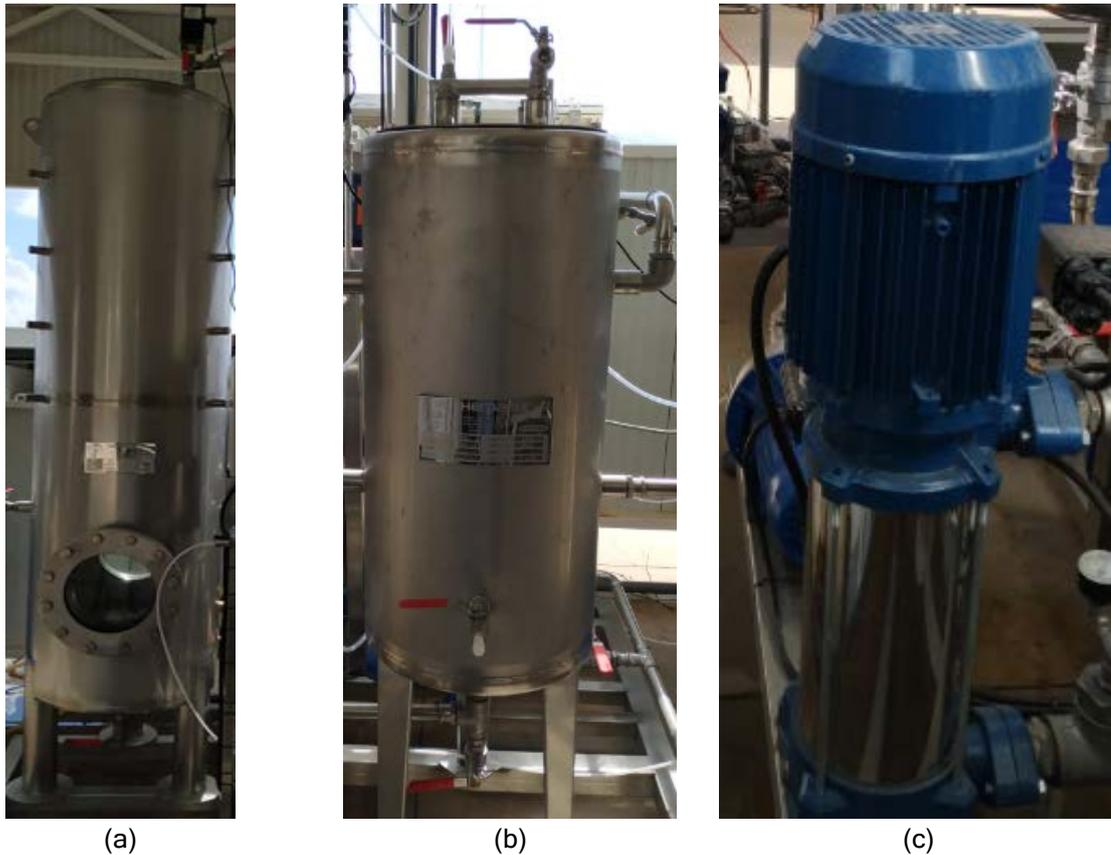


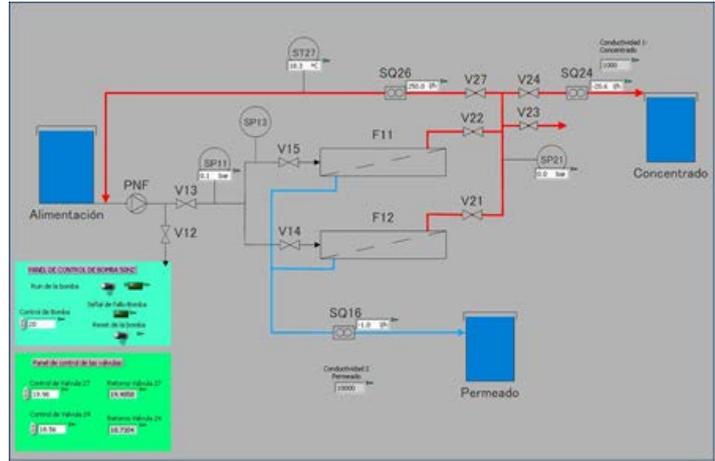
Figure 47. Fotografías de las mejoras en la planta piloto de ozonización: a) Reactor de tipo columna de contacto nuevo de 5800 L; b) Tanque presurizado; c) Bomba Venturi para generación de micro-nano-burbujas.

### Planta piloto de nanofiltración

El sistema de nanofiltración (NF) tiene dos modos de trabajo, en serie y en paralelo. El sistema básico constaba de dos membranas FILMTEC NF90-2540, conectadas en paralelo, con una superficie total de 5,2 m<sup>2</sup>. Estas membranas compuestas por una película fina de poliamida funcionan a una temperatura máxima de 45°C, una presión máxima de 41 bar y una velocidad máxima de caudal de 1,4 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>, mientras que el rango de pH de operación es de 2-11. El control del pH permite la limpieza y evaluar la separación de diferentes compuestos en las membranas dependiendo del valor del pH. También se incluye una bomba dosificadora para estudiar el efecto de la adición de biocidas. Tiene un tanque de alimentación de 400 L (Figura 48.a). En 2016, el sistema de nanofiltración se ha automatizado mediante la inclusión de electroválvulas y la adquisición automática de las señales de los diferentes instrumentos (caudal, presión, temperatura, etc.) con el objetivo final de controlar mediante ordenador (se utilizó el software Labview, Figura 48.b) la generación de permeado y velocidad de caudal de concentrado.



(a)



(b)

Figura 48. a) Planta piloto de nanofiltración; b) Nueva interfaz de Labview para el control y la automatización de la planta piloto.

### Planta piloto de radiación UVC

La planta piloto de radiación ultravioleta (UV) fue diseñada para tratar y desinfectar el agua con fines de investigación y comparación con las tecnologías solares. Esta planta consta de tres lámparas UV-C (velocidad caudal máxima de  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , longitud de onda máxima de  $254 \text{ nm}$ , potencia máxima de  $400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ) conectadas en serie, con configuraciones flexibles para una sola lámpara, dos o tres lámparas en modo de recirculación o modo caudal continuo. La velocidad de caudal se pueden regular de acuerdo con las necesidades del estudio experimental. Además, la planta está equipada con un sistema de dosificación de reactivos (ácido, base y peróxido de hidrógeno). El volumen total de recirculado de esta planta es de 200-250 L, con un volumen iluminado y área de  $6,21 \text{ L}$  y  $0,338 \text{ m}^2$  por módulo de lámpara, respectivamente. El sistema está equipado con sensores de pH y de oxígeno disuelto en línea y conectado a un controlador PROMINENT para la adquisición automática de datos de ambos parámetros (Figura 49).



Figura 49. Planta piloto de radiación UVC instalada en la PSA.

### Planta piloto de oxidación de aire húmedo

La planta piloto fue diseñada e instalada en 2016 como un pretratamiento duro para reducir la complejidad de los efluentes industriales y el tiempo de reacción de un posterior proceso de oxidación solar avanzada (AOPs) (Figura 50). Esta planta piloto permite diferentes combinaciones de temperatura y presión, diversas proporciones de oxígeno y nitrógeno, adición de agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno y peroximonosulfato antes de calentar y/o presurizar el sistema, y el uso de diferentes sales metálicas como catalizadores. La planta piloto de oxidación de aire húmedo consta de un reactor de acero inoxidable con un volumen total de 1 L, un agitador magnético, un disco de ruptura, un inyector de reactivos líquidos preparado para operar a menos de 200 bares y una temperatura máxima de 300°C, sonda térmica, sensor de presión (hasta 250 bar) y una camisa de refrigeración-calefacción, todo de acero inoxidable. Esta planta incluye además un sistema automático de control y adquisición de datos de diversos parámetros como presión, temperatura, dosis de reactivos y velocidad de agitación.



Figura 50. Planta piloto de oxidación por aire húmedo

### Planta piloto de electro-oxidación

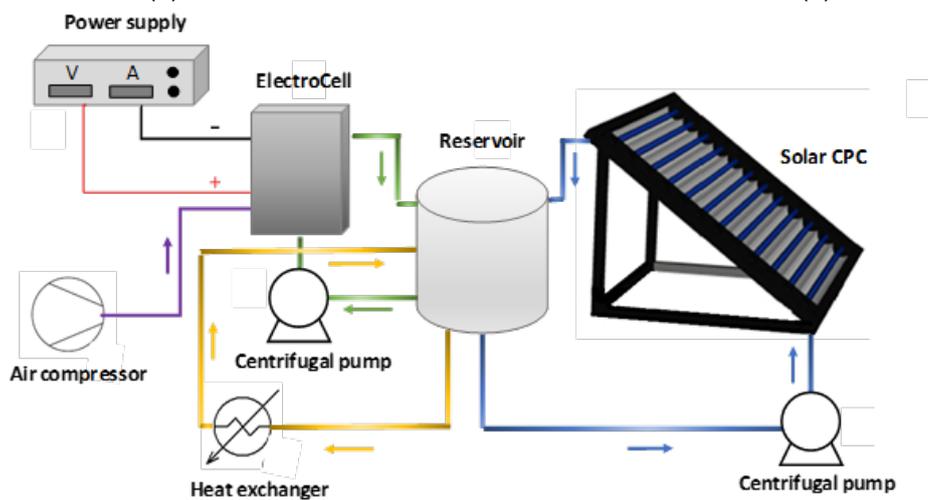
La planta piloto de electro-oxidación está formada por cuatro células electroquímicas comerciales indivisibles (Electro MP Cell from ElectroCell). Cada una consta de un ánodo (red de niobio recubierto de una película de diamante dopado con boro (Nb-BDD)) y un cátodo (electrodo de gas difuso de carbono-politetrafluoroetileno (PTFE)), ambos con 0,010 m<sup>2</sup> de área efectiva. Los electrodos están conectados a una fuente de alimentación Delta Electronika y el agua a tratar recircula a través del sistema desde un depósito impulsada por una bomba centrífuga (Figura 51).



(a)



(b)



(c)

Figura 51. a) Planta piloto de electro-oxidación; b) Célula electroquímica de la planta solar de electro-oxidación; y c) Diagrama de la planta solar de electro-oxidación.

### Equipamiento para monitorización de radiación solar

El sistema de monitorización y almacenamiento de datos de radiación solar UV-A y global está compuesto por diferentes piranómetros (Figura 52), con diferentes rangos de medida. Se incluyen piranómetros de medida de la radiación solar global en el rango de 310-2.800 nm (Kipp & Zonen CMP-6 con sensibilidad  $5-20 \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , valor máximo:  $2.000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), y la radiación UVA global en el rango de 300-400 nm (Kipp & Zonen CUV-5 con sensibilidad  $1 \text{ mV}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , valor máximo:  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Además de esto, se cuenta con un fotómetro espectral con doble canal para monitorizar la irradiancia espectral solar en el lugar de los ensayos solares. Este equipo (AVANTES) tiene sensores y filtros UVA para medir en todo el rango espectral de 200-1.100 nm.



(a)

(b)

(c)

Figura 52. Piranómetro CUV-5 (a). Vista de todos los piranómetros (configuración horizontal (b) e inclinado (c))

### Planta piloto biológica

Una planta piloto biológica con un sistema de depuración doble (Figura 53) que consta de un tanque de alimentación de 60L; tres reactores de biomasa inmovilizada (IBR, Immobilized Biomass Reactor) de 20 L cada uno; y dos 'SBR, Sequencing Batch Reactor' de 20 L cada uno, que operan en modo discontinuo. Estos módulos utilizan el mismo tanque de recepción (200 L), así como los sistemas de control de pH y oxígeno disuelto y equipos electrónicos. Además, esta planta puede funcionar en modo continuo o por lotes. Para la operación por lotes, se utilizan dos tanques de decantación cónicos (40 L). La adquisición de datos de tres MULTIMETROS (M44 CRISON) se realiza mediante relés programables y los parámetros principales son monitorizados por un sistema SCADA.

### Planta piloto de Destilación por Membranas (MD)/Cristalización

Esta planta piloto está compuesta por un módulo MD integrado en un sistema que consta de dos circuitos hidráulicamente separados, uno para la solución caliente y otro para la solución refrigerante. Dispone de un depósito de alimentación de 150 L PP provisto de un sistema de calefacción con resistencia eléctrica de 3 kW<sub>th</sub> con una bomba de alimentación ( $Q_{max} = 1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T = 80^\circ\text{C}$ ). El depósito tiene incorporado una bobina interna termoregulada por un refrigerador ( $Q_{max} = 15.5 \text{ L}/\text{min}$ , 2.750 W, rango =  $-10 - 40^\circ\text{C}$ ). La refrigeración es controlada mediante un sensor de temperatura externo y una bomba centrífuga ayuda a garantizar la homogeneidad térmica mediante la recirculación de fluido (agua refrigerada) dentro del depósito. Hay dos sensores de nivel de ultrasonidos instalados para medir el volumen de permeado producido ( $T = -20 - 60^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.7-3 \text{ bar}$ ). La instalación tiene una PLC que registra las variables y permite trabajar durante 48h. Además, el sistema está preparado para trabajar con ácidos y bases, y tiene un sistema de regulación de pH que consiste en un depósito (HDPE 50 L), una bomba ( $Q_{max} = 20 \text{ L}/\text{h}$ ,  $P_{max} = 3 \text{ bar}$ , PP), un controlador de pH y un sensor de pH (Rango: 0 - 14,  $P_{max} = 3 \text{ bar}$ ,  $T = -5 - 70^\circ\text{C}$ ). Finalmente, el sistema tiene un cristizador de borosilicato encamisado con un agitador en su interior (rango: 0/30 - 1,000 rpm, P: 60 W, material: PTFE) con una bomba (rango de caudalímetro: 90 - 900 L/h). El control de temperatura se realiza con un sistema de control formado por un refrigerador ( $Q_{max} = 15.5 \text{ L}/\text{min}$ , 2.750 W, range =  $-10 - 40^\circ\text{C}$ ) y un sensor de temperatura externo Pt100 (Figura 54).



Figura 53. Planta piloto biológica instalada en la PSA.



Figura 54. Planta piloto MD + cristizador desarrollada por Apria Systems S.L.

### Cámara de cultivo

La cámara de cultivo de 30 m<sup>2</sup> se utiliza para experimentos de reutilización de aguas residuales tratadas desde 2014 (Figura 55). Esta cámara está fabricada en policarbonato de 10 mm de espesor

para evitar la radiación solar ultravioleta incidente y se soporta en acero laminado blanco (Sendzimir). La altura del soporte es de 2,5 m con una inclinación del techo del 40%. La cámara consta de cuatro áreas individuales de 3x2,5 m<sup>2</sup>. Cada área está equipada con sensores de temperatura y humedad, y sistemas de refrigeración y calefacción. La cámara de cultivo está equipada con un radiómetro solar global para medir la radiación solar incidente. Así, a través de esta sonda, una cubierta de plástico opaco ubicada en la parte superior de la cámara se puede plegar y replegar automáticamente para reducir la incidencia de irradiancia dentro de la cámara de cultivo. Finalmente, la inclinación del techo de cada área actúa como ventanas que se pueden abrir y cerrar automáticamente para favorecer el caudal de aire dentro de cada área y mejorar la eficiencia del control de temperatura. El registro de los sensores (temperatura, humedad y radiación solar) y el control de la temperatura de cada área individualmente (mediante el sistema de refrigeración y calefacción, ventanas y cubierta plástica superior) se realiza utilizando el software Ambitol® que permite mantener una temperatura óptima para los cultivos aproximadamente a 25°C durante las diferentes estaciones.



Figura 55. Cámara de cultivo para la reutilización de aguas de riego residuales en cultivos en la PSA

## 2.8.2 HYWATOX

### Planta piloto de generación fotocatalítica de hidrógeno

La planta piloto de generación fotocatalítica de hidrógeno está compuesta por un depósito cerrado de acero inoxidable de 20 L conectado a un fotorreactor de CPC para la eliminación simultánea de contaminantes orgánicos contenidos en soluciones acuosas y generación de hidrógeno (Figura 56). El depósito está equipado con entrada y salida de gas y líquido y un puerto de muestreo. Se usan dos controladores de caudal másico paralelos para controlar el caudal de gas N<sub>2</sub> requerido en el espacio vacío del reactor durante la retirada de O<sub>2</sub> para conseguir las condiciones de reducción, así como para arrastrar el hidrogeno producido. Se utiliza una bomba de centrifugado (PanWorld NH-100PX) con un caudal de 20 L·min<sup>-1</sup> para recircular el lodo acuoso desde el depósito hasta los tubos de la planta piloto CPC acoplada. El reactor CPC está compuesto por 16 tubos de cristal Pyrex (diámetro interno 28,5 mm, diámetro externo 32 mm, distancia irradiada 1.401 mm) colocado en una

plataforma fija con 37° de inclinación (latitud local). El área y volumen total irradiado son 2,10 m<sup>2</sup> y 14,25 L, respectivamente.

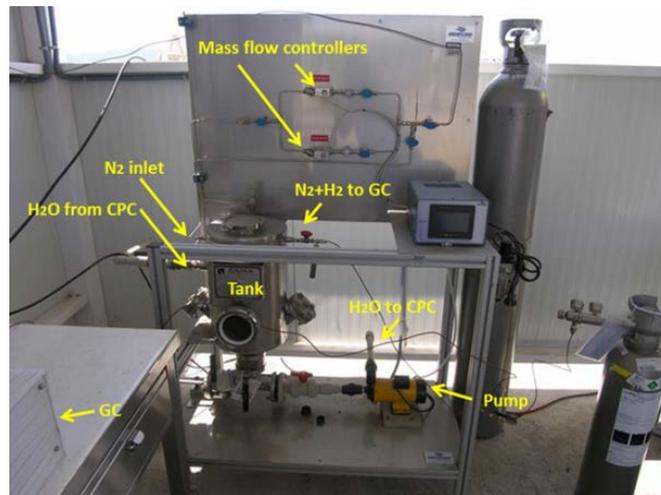


Figura 56. Planta piloto solar de generación fotocatalítica de hidrógeno.

## 2.9 Instalaciones para la caracterización óptica y análisis de durabilidad de reflectores solares - OPAC

La instalación de la PSA de caracterización óptica y análisis de durabilidad reflectores solares, que es el resultado de un proyecto conjunto de colaboración entre CIEMAT y DLR, cuenta con el equipamiento necesario para caracterizar de forma completa los materiales utilizados como reflectores en los sistemas termosolares de concentración. Este laboratorio permite determinar los parámetros ópticos característicos de los reflectores solares y su posible deterioro. El equipamiento disponible en el laboratorio de caracterización óptica de reflectores solares es el siguiente (ver Figura 57.a):

- Tres reflectómetros especulares portátiles, Devices and Services modelo 15R-USB, para medir la reflectancia especular a un ángulo de incidencia de 15°, con una longitud de onda de 660 nm y diferentes ángulos de aceptación (3.5, 7.5, 12.5 y 23 mrad).
- Un reflectómetro especular portátil, modelo de dispositivos y servicios MWR, para medir la reflectancia especular a un ángulo de incidencia de 15°, con longitudes de onda de 460, 550, 650 y 720 nm y en diferentes ángulos de aceptación (2.3, 3.5, 7.5, 12.5 y 23 mrad).
- Un reflectómetro portátil, PSE modelo pFlex 2.1, para medir la reflectancia especular a un ángulo de incidencia de 8°, con longitudes de onda de 470, 525 y 625 nm y un ángulo de aceptación de 67 mrad.
- Un reflectómetro portátil, Aragon Photonics modelo Condor, para medir la reflectancia especular a un ángulo de incidencia de 12°, con longitudes de onda de 435, 525, 650, 780, 940 y 1.050 nm y un ángulo de aceptación de 145 mrad.
- Un reflectómetro portátil, Konica Minolta modelo CM-700d, para medir la reflectancia hemisférica y difusa a un ángulo de incidencia de 8° y con longitudes de onda de 400-700 nm.

- Un prototipo de reflectómetro para medir la reflectancia especular en un diámetro de 5 cm con resolución espacial de 10 píxeles/mm, que mide en varias longitudes de onda y ángulos de aceptación (modelo SR<sup>2</sup>, diseñado y patentado por DLR).
- Un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Lambda 1050, con esfera integradora de 150 mm y accesorio de reflectancia especular con ángulos de incidencia de 0 a 68° (URA).
- Un reflectómetro especular espectral (accesorio para espectrofotómetro) para medir la reflectancia especular espectral en un rango de longitud de onda de 280-2500 nm a ángulos de incidencia variables entre 8-70° y ángulos de aceptación discretos de 7,4, 12,3, 14.,8, 20,2, 35,9 o 107,4 mrad (modelo S2R, diseñado y patentado por DLR).
- Una cámara Nikon D3 y kit Cubalite de 90 cm para fotos de superficies especulares sin reflejos parásitos.
- Un microscopio Zeiss Axio modelo CSM 700, con aumentos de 5, 10, 20, 50 y 100, para obtener los perfiles y la rugosidad de superficies altamente reflectantes.
- Un microscopio electrónico de barrido (SEM) Hitachi, modelo S3400, con análisis EDX.
- Un sistema de impedancia, Parstat 4000, para analizar la corrosión de los materiales reflectores.
- Un banco óptico de uso general como accesorio para el espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 1050 con características avanzadas para el montaje de dispositivos ópticos para el desarrollo de nuevos instrumentos de medición.
- Un tensiómetro, Attension Theta 200 Basic, para la evaluación del ángulo de contacto estático y dinámico, un parámetro clave para estudiar el rendimiento de los recubrimientos anti-suciedad aplicados a los reflectores solares y a los tubos receptores.

El laboratorio de análisis de durabilidad de reflectores solares está diseñado para ensayos de envejecimiento acelerado de estos materiales con el propósito de predecir en poco tiempo el comportamiento de estos materiales durante su vida útil (ver Figura 57.b). Para ello, las variables medioambientales que producen degradación de los reflectores solares cuando se exponen a condiciones exteriores se aplican de manera controlada, tanto por separadas como combinadas. El siguiente equipo está disponible para estas pruebas de envejecimiento acelerado:

- Una cámara climática ATLAS, modelo SC340MH, para aplicación de temperatura (de -40 a +120°C), humedad (del 10 al 90%), radiación solar (de 280 a 3.000 nm) y precipitación de 340L.
- Una cámara climática de niebla salina Vötsch, modelo VSC450, con temperaturas de 10 a 50°C (450 L).
- Una cámara climática de niebla salina Erichsen, modelo 608, con temperaturas de 10 a 50°C (1000 L).
- Dos cámaras climáticas de radiación ATLAS, modelo UV-Test, donde se puede aplicar radiación UV (con un pico a 340°nm), condensación y temperatura. Una de las cámaras también incluye simulación de lluvia.
- Una cámara climática de radiación ultravioleta Hönle, modelo UVA Cube.
- Una cámara climática de lluvia ácida KÖHLER, modelo HK300M, con temperaturas de hasta 70°C y humedad de hasta 100%, para aplicar el test de Kesternich (300 L).
- Un baño de agua SC100, para realizar el test de Machu, de acuerdo con la guía Qualitest.
- Una cámara climática Vöstch modelo VCC3 0034, para ensayar la resistencia del material frente a gases corrosivos (335 L).
- Una cámara climática Ineltec, modelo CKEST 300, para ensayos de humedad y condensación con temperaturas de hasta 70°C (300L).

- Una cámara climática, Memmert, modelo HCP108, para aplicar humedad (20-95%) y temperatura (20-90°C con humedad y 20-160°C sin humedad).
- Dos hornos de mufla Nabertherm, modelos LT 24/12 y LT 40/12.
- Una cámara de tormenta de arena Control Técnica/ITS GmbH con velocidades del viento de hasta 30 m/s y concentraciones de polvo de hasta 2,5 g/m<sup>3</sup>.
- Un dispositivo de limpieza por abrasión Erichsen, modelo 494, para ensayar la degradación debida a los cepillos de limpieza, con varios accesorios de limpieza.
- Un abrasímetro lineal Taber, modelo 5750, para verificar la resistencia de los materiales contra la abrasión.
- Una herramienta de corte cruzado (cross-cut) Lumakin, modelo A-29, para analizar el posible desprendimiento de las capas de pintura posteriores.
- Varios dispositivos para ciclos térmicos especialmente diseñados en la PSA.
- Un tubo de impacto para experimentos simples de erosión de arena, según norma DIN 52348, en el que el material erosivo golpea la muestra después de una caída libre de unos 160 cm bajo ángulos de impacto ajustables (diseñado por DLR).
- Un túnel de viento de circuito abierto con inyección de partículas, Acetube, para la simulación avanzada de los efectos de la erosión por arena y polvo. Puede establecerse una velocidad de viento de entre 1 and 20 m/s y también puede usarse polvo fino como material erosivo (diseñado por DLR).
- Una cámara de suciedad artificial, equipada con un generador de aerosol TOPAS GmbH, SAG410/L, y un nebulizador ultrasónico para alcanzar una imagen realista de suciedad en las muestras de reflectores (diseñado por DLR).



(a)



(b)

Figura 57. Laboratorio de caracterización óptica de reflectores solares OPAC (a) y laboratorio de análisis de durabilidad (b) de la instalación OPAC

Además de estos laboratorios, la instalación OPAC dispone de una serie de bancos de ensayo a la intemperie para exponer los materiales a las condiciones climáticas ambientales con el objetivo de comparar su degradación con la que se obtiene en los ensayos de envejecimiento acelerado, estudiar la efectividad de los recubrimientos especiales, optimizar las estrategias de limpieza y analizar el ensuciamiento de los reflectores. Además, recientemente se han instalado dos bancos de ensayo en heliostatos, uno para ensayar la influencia de los bloqueos (producidos en los campos de heliostatos)

en la vida útil de los recubrimientos de los reflectores, y otro para acelerar la degradación de los reflectores debido a la radiación UV en condiciones climáticas exteriores. Finalmente, la instalación OPAC está equipada con los accesorios necesarios para su uso adecuado, como básculas de precisión, agitador termo magnético, secador, bañera ultrasónica para la limpieza de muestras, herramientas para la preparación de muestras reflectoras (corte y pulido), cabinas de seguridad, instrumentos para medir el pH, conductividad, oxígeno, etc.

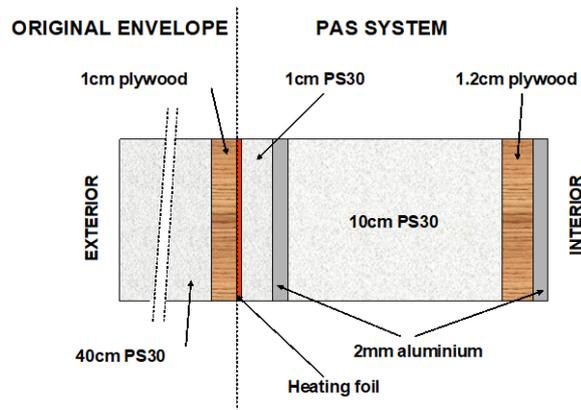
## 2.10 Instalaciones Experimentales para la Evaluación de Eficiencia Energética en Edificios

El Laboratorio de Ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE), es una de las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA). Su personal forma parte de la Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) en la División de Energías Renovables del Departamento de Energía del CIEMAT. La UiE3 realiza I+D sobre análisis energético integral de edificios, integrando sistemas solares térmicos pasivos y activos para reducir la demanda de calefacción y refrigeración. Esta unidad está organizada en dos líneas de investigación centradas en el Análisis Energético en Entornos Urbanos y en el Análisis Energético Experimental de Edificios y Componentes Constructivos. Las instalaciones integran varios dispositivos con diferentes capacidades como se resume a continuación:

- 1) Recintos de ensayo: El LECE tiene cinco recintos de ensayo, cada uno de ellos compuesto por una habitación de ensayo de alto aislamiento térmico y una sala auxiliar. El muro sur original de la habitación de ensayo se puede sustituir por el cerramiento que se requiera ensayar. Esto hace posible la caracterización experimental de cualquier cerramiento exterior convencional o innovador.
- 2) Recinto de ensayo PASLINK: el recinto de ensayo tipo PASLINK español incorpora el concepto de envolvente pseudoadiabática (PAS). Este sistema detecta el flujo de calor a través del cerramiento del recinto de ensayo mediante un sistema de termopila y lo compensa con un dispositivo de lámina calefactora. La superficie interna del recinto de ensayo consiste en una lámina de aluminio que hace uniforme esta superficie evitando puentes térmicos. También tiene un techo intercambiable, lo cual que permite ensayar componentes horizontales. El recinto está colocado sobre un dispositivo giratorio que permite realizar ensayos en diferentes orientaciones.
- 3) Recinto de ensayo CETeB: este es un nuevo recinto de ensayo para techos. El diseño de este recinto de ensayo resuelve algunos problemas prácticos relacionados con los ensayos de techos, tales como la accesibilidad y la resistencia estructural. Para ello se utiliza una habitación de ensayo subterránea que permite un fácil acceso al componente a ensayar.
- 4) Chimenea solar: fue construida para realizar ensayos dando soporte experimental a trabajos de modelado empírico y validación de modelos teóricos. Su pared absorbidora tiene 4,5 m de alto, 1,0 m de ancho y 0,15 m de grosor, con un canal de aire de 0,3 m de profundidad y una cubierta de vidrio de 0,004 m de espesor. Un panel de tipo celosía a la salida de aire de la chimenea lo protege de roedores y pájaros. La entrada de aire está protegida por una caja de madera contrachapada para evitar grandes turbulencias por el viento. El caudal de aire a la entrada está colimado por una matriz laminada, de modo que sólo existe el componente de velocidad de aire en la dirección x.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 58. (a) Recinto de ensayo PASLINK de CIEMAT realizando un ensayo térmico de un módulo fotovoltaico, (b) Esquema del sistema PAS, (c) Detalle del mecanismo giratorio, (d) Exterior del recinto de ensayo CETeB.

- 5) Edificio monozona: es un pequeño edificio de una sola zona de 31,83 m<sup>2</sup> por 3,65 m de altura, construido en un área libre de otros edificios u obstáculos a su alrededor que podrían sombreadarlo, excepto un edificio gemelo ubicado a 2 m de su muro este. Su simplicidad facilita la monitorización detallada y exhaustiva y la configuración de secuencias específicas de frío y calor que simplifican su análisis en profundidad y, facilitan el desarrollo y mejora de metodologías de evaluación energética experimental de edificios.
- 6) Los C-Ddl PSE ARFRISOL son Edificios de Oficinas de Prototipos Demostradores para la Investigación Energética, totalmente instrumentados, en uso, y están siendo monitorizados continuamente por un sistema de adquisición de datos. El CIEMAT posee 3 de estos 5 "Contenedores Demostradores de Investigación, C-Ddls", construidos en el marco del Proyecto ARFRISOL. Cada uno de ellos es un edificio de oficinas con aproximadamente 1.000 m<sup>2</sup> de área construida. Uno de ellos está en el PSA y los otros en diferentes lugares representativos de la climatología española. Estos C-Ddl están diseñados para minimizar el consumo de energía empleado en acondicionamiento térmico manteniendo niveles óptimos de confort. Por lo tanto, incluyen estrategias pasivas de ahorro de energía basadas en el diseño arquitectónico y la construcción, tienen sistemas solares activos que abastecen la mayor parte de la demanda de energía (ya baja) y, por último, sistemas auxiliares convencionales para abastecer la muy baja demanda que no se puede suministrar con

energía solar, utilizando otros recursos de energía renovable, como la biomasa en la medida de lo posible.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 59. (a) Edificio monozona, (b) Prototipo de edificio ARFRISOL en uso, (c) Chimenea Solar. Configuración que incluye losas de Material de Cambio de Fase. (d) Ensayo de fachada ventilada en recinto de ensayo. Configuraciones diferentes con cara externa clara y oscura.

Estos prototipos fueron construidos con el objetivo de obtener medidas de alta calidad mediante la monitorización, como soporte fundamental de actividades de investigación sobre confort térmico, evaluación energética de edificios y sistemas energéticos activos y pasivos integrados en los edificios.

## 3 Laboratorios

---

### 3.1 Laboratorio para la caracterización geométrica de captadores solares - GeoLab

Los captadores utilizados en los sistemas termosolares (heliostatos, captadores cilindroparabólicos, platos parabólicos, lentes Fresnel, etc.) requieren una concentración de la radiación solar de alta precisión para que sea adecuada y la mayoría incida en el componente receptor (tubos receptores en captadores cilindroparabólicos, receptores en sistemas de torre, discos parabólicos, lentes Fresnel, etc.). Este laboratorio tiene una línea de actividad específica para la caracterización geométrica de estos captadores. La fotogrametría se utiliza para cuantificar la calidad óptica de:

- Facetas de captadores cilindroparabólicos
- Módulos de captadores cilindroparabólicos
- Facetas de helióstatos
- Helióstatos
- Lentes Fresnel y reflectores
- Discos parabólicos
- Marcos estructurales
- ...

La fotogrametría consiste en el modelado tridimensional de cualquier objeto a partir de fotografías que lo capturan desde diferentes ángulos. En base a estas fotografías, las coordenadas tridimensionales (x, y, z) se pueden calcular para los puntos de interés en el objeto que se está modelando. El modelado de fotogrametría es preciso hasta 1:50000 (precisiones del orden de 0,1 mm para las facetas del captador cilindroparabólico y 0,6-0,7 mm para los módulos de cilindroparabólico de 12 m de longitud).

El equipo asignado a esta actividad en la PSA está formado por:

- Cámara CANON EOS5D MarkII 22-Mpixel.
- Lentes CANON EF 20mm f/2.8 USM y CANON EF 24mm f/2.8 USM.
- Software de fotogrametría Photomodeler Scanner 2017.
- Escaner laser LEYCA P20.

Además, se ha desarrollado un paquete de software para el análisis de modelos y el cálculo de parámetros relevantes para geometrías 2D y 3D en el entorno MatLab.

Entre los parámetros que se pueden calcular a partir del modelo construido por fotogrametría están:

- Desviaciones de la superficie real a la teórica en las coordenadas x, y, z.
- Deformación por gravedad entre diferentes orientaciones del concentrador.
- Desviación angular del vector normal a la superficie en comparación con el vector normal teórico.
- Desviación de los rayos reflejados en la superficie reflectante del módulo en comparación con el foco teórico del captador.
- Factor de intercepción.

- (Cálculo de otros parámetros relevantes bajo solicitud).

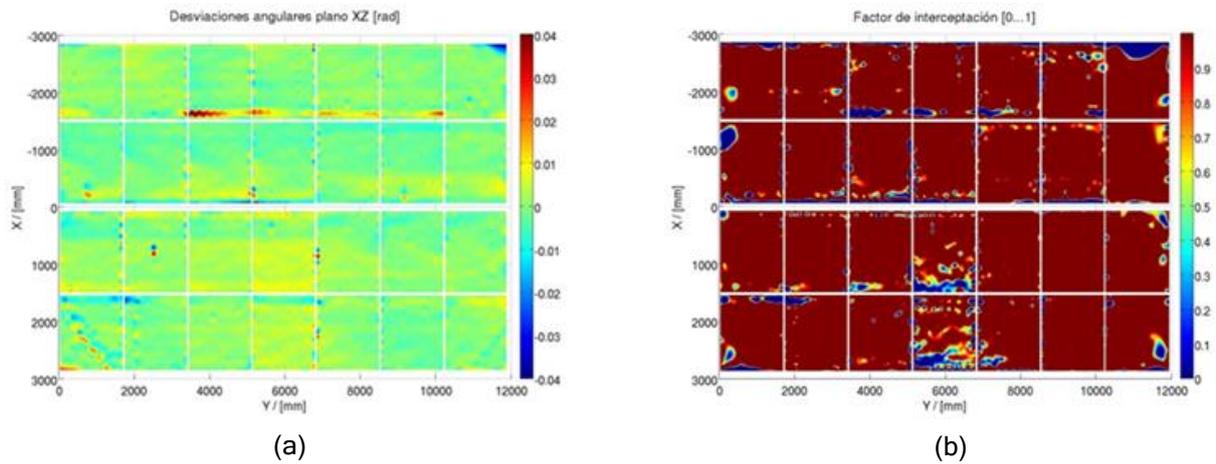


Figura 60. Desviaciones angulares (a) y factor de interceptación (b) de un módulo de captador cilindroparabólico analizado por fotogrametría.

### 3.2 Laboratorio de Radiometría - RadLab

La línea de actividad dedicada a la Radiometría surgió de la necesidad de verificar la medición de magnitudes radiométricas altamente importantes asociadas con la concentración solar. Estas magnitudes son la irradiancia solar ("flujo" en la jerga de la concentración solar) y la temperatura de la superficie de los materiales (detección por IR). En el PSA se utilizan diferentes sistemas para medir las altas radiaciones solares en grandes superficies. El elemento básico en estos sistemas es el radiómetro, cuya medición de la potencia de la radiación solar incidente en la apertura del receptor solar depende de su uso adecuado. La medición de esta magnitud es fundamental para determinar la eficiencia de los prototipos de receptores evaluados en el PSA y para definir el diseño de futuras plantas solares de receptor central. La calibración de radiómetros se realiza en hornos específicos para este propósito.



Figura 61. Vista del equipo de radiometría de PSA.

La calibración del radiómetro de referencia es una calibración radiativa respecto a simuladores de cuerpo negro como patrones estándar. La calibración del radiómetro de referencia se transfiere a los sensores comerciales por comparación en un horno de calibración que utiliza una placa de grafito que irradia de manera homogénea y simétrica cuando una corriente eléctrica lo atraviesa. La constante de calibración obtenida con este método traduce el voltaje a irradiancia en la cara frontal del sensor. La exactitud de los medidores calibrados de esta manera está dentro de  $\pm 3\%$  con una repetibilidad de  $\pm 1\%$ . Se puede utilizar un cuerpo negro como fuente de radiación térmica para usar como referencia y calibrar dispositivos IR (cámaras infrarrojas y pirómetros) que usan radiación térmica como medio para determinar la temperatura de una superficie determinada.

El equipo asociado a esta actividad también incluye tres cuerpos negros utilizados como referencias para calibrar sensores IR dedicados a la medición de temperatura con trazabilidad garantizada entre 0 y 1.700°C:

- El cuerpo negro MIKRON 330 es una cavidad cilíndrica que puede proporcionar cualquier temperatura entre 300 y 1.700°C con una exactitud de  $\pm 0,25\%$  y una resolución de 1°C. Su emisividad es de 0,99 en una apertura de 25 mm de diámetro.
- El cuerpo negro MIKRON M305 es una cavidad esférica que puede suministrar cualquier temperatura entre 100 y 1.000°C con una exactitud de  $\pm 0,25\%$  y con una resolución de 1°C. Su emisividad es 0,995 en un diámetro de 25 mm apertura.
- El cuerpo negro MIKRON M340 es una cavidad plana y puede proporcionar cualquier temperatura entre 0 y 150°C con una exactitud de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  y una resolución de 0,1°C. Su emisividad es de 0,99 en una apertura de 51 mm.

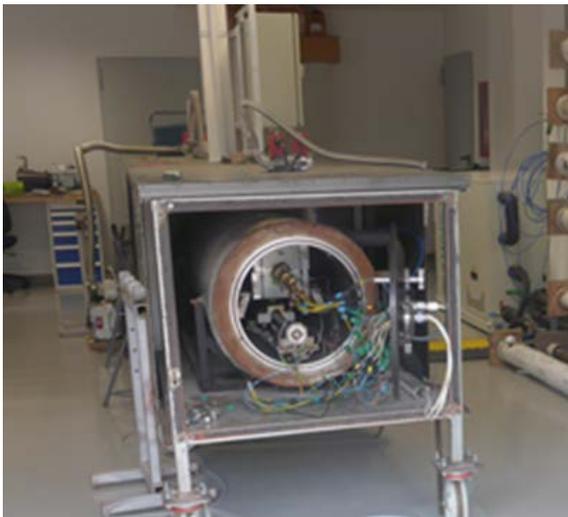
Estos cuerpos negros tienen un sistema de control PID incorporado y la temperatura se verifica mediante un termopar de platino de alta precisión.



Figura 62. Sensor de calibración IR utilizando un cuerpo negro.

### 3.3 Ensayos y caracterización de receptores para sistemas termosolares de concentración - SRTLab

Esta línea de actividad comprende tanto receptores lineales tipo tubo como receptores volumétricos de aire. El equipo asociado a los receptores lineales está ubicado en el PSA y los dos dispositivos de prueba principales son: a) un banco de ensayos llamado HEATREC (ver Figura 63.a), para medir la pérdida de calor de los tubos receptores individuales en condiciones de laboratorio en interior, y b) un banco de ensayos al aire libre llamado RESOL (ver Figura 63.b), para medir la eficiencia óptica de tubos receptores individuales bajo radiación solar natural. Las mediciones de pérdida de calor se pueden realizar en condiciones de vacío para evitar la convección fuera del tubo de vidrio, obteniendo así una temperatura más uniforme a lo largo de la sección del receptor y midiendo la pérdida de calor por radiación. Además, es posible determinar la pérdida de calor a diferentes niveles de vacío en el espacio entre el tubo absorbente metálico y la envoltura de vidrio.



(a)



(b)

Figura 63. Vista de la cámara de ensayo HEATREC para medir las pérdidas de calor en tubos receptores (a) y banco de ensayos RESOL para medir la eficiencia óptica de los receptores (b).

La emisividad del recubrimiento selectivo puede deducirse de estas medidas. La prueba de eficiencia óptica se realiza evaluando el incremento de la temperatura de un fluido (agua) que circula dentro del tubo receptor frente al tiempo, durante un intervalo estable de radiación solar, cuando las pérdidas de calor son nulas. La eficiencia óptica se calcula a partir de un balance energético del sistema. La prueba proporciona en una medición la eficiencia óptica del receptor, es decir, el valor combinado de la absorptancia y la transmitancia del tubo receptor.

El dispositivo HEATREC permite caracterizar las pérdidas de calor de los tubos receptores con un diámetro interno mayor a 62 mm y una longitud de tubo menor de 4,5 m. Se pueden realizar mediciones para la temperatura del absorbente que varía entre 100°C y 500°C. El vacío en la cámara de ensayos se puede configurar hasta alrededor de  $10^{-2}$  mbar. RESOL está configurado actualmente para medir tubos receptores estándar para canales parabólicos, es decir, tubos de 4.060 mm de largo y con un diámetro de tubo absorbente de 70 mm.

Además de HEATREC y RESOL, la línea de actividad dedicada a receptores lineales está equipada con herramientas y dispositivos para la manipulación y monitorización adecuados de los tubos receptores.

### **3.4 Laboratorio para la evaluación de la durabilidad y caracterización de materiales bajo radiación solar concentrada - MaterLab**

Esta línea de actividad se centra en el estudio y la evaluación de cómo la radiación solar concentrada afecta el rendimiento y la durabilidad de los materiales. Esto es de especial interés en materiales utilizados para los receptores centrales, que requieren del envejecimiento acelerado para estudiar la durabilidad de los componentes más críticos de las plantas termosolares, no solo de los materiales absorbedores, sino también de los tratamientos superficiales y los recubrimientos que pueden aumentar su absorción. Por lo tanto, es necesario analizar y estudiar los mecanismos de degradación física y rotura de estos materiales a altas temperaturas bajo radiación solar concentrada.

El equipamiento asociado a esta actividad está compuesto por dispositivos ubicados en el interior del laboratorio, además de varios discos concentradores solares ubicados cerca de los hornos solares de la PSA. Los dispositivos de interior están dedicados a la preparación metalográfica y al análisis de piezas de ensayo tratadas con radiación solar concentrada y eventualmente, al ciclado térmico para el envejecimiento acelerado, y la caracterización del ensayo solar mediante análisis termogravimétrico. Este equipamiento se encuentra dentro del edificio de control de los hornos solares, distribuido en cuatro salas, cada una de ellas dedicada a diferentes tipos de análisis:

- Sala de metalografía
- Sala de microscopía
- Sala de termogravimetría
- Sala de ciclado térmico
- Sala de microscopio electrónico de barrido

Los equipos de laboratorio instalados en estas salas se detallan a continuación:

#### **3.4.1 Sala de metalografía**

Esta sala está equipada para la preparación metalográfica de muestras y la determinación del tamaño de partícula. Está equipada con:

- Cortadora automática de precisión: Struers Secotom
- Cortadora manual: Remet TR60
- Empastilladora: Struers Labopres-3
- Unidad de impregnación al vacío: Struers Epovac
- Pulidora automática: Tegrapol-15 automática con sistema de dosificación Tegradoser-5
- Pulidora metalográfica de 2 platos: LS1/LS2 (Remet)
- Desbastadora: Remet SM1000
- Baño ultrasónico: Selecta Ultrasons-H 75°C con calefactor
- Campana extractora: Flores Valles VA 120960 M-010-02
- Fuente de energía programable: Iso-Tech IPS 405 para ataque electroquímico
- Tamizadora analítica: Retsch AS 200 Control (tamices: 20, 10, 5, 2,5 y 1,25 mm y 710, 630, 425, 315, 250, 160, 150, 90, 53 y 32 µm)
- Cámara digital con mesa de reproducción



Figura 64. Vista de la sala de metalografía en el edificio de hornos solares

### 3.4.2 Sala de Microscopía

### 3.4.3 Sala de Microscopía

En esta sala dispone de equipamiento para el análisis microscópico, de dureza y de reflectancia en el espectro solar de materiales, esto es, para su caracterización óptica y superficial. Su equipamiento consiste en:

- Sistema de metrología de superficies ópticas en 3D Leica DCM 3D
- Microscopio óptico Leica DMI 5000 con sistema de adquisición de imágenes Leica-IM50 y mesa motorizada.
- Microscopio óptico Olympus Union MC 85647.
- Reflectómetro portátil: 410 Solar
- Microdurómetro Struers Duramin HMV-2, con sistema de visualización y software HMV-AD.
- Durómetro manual
- Rugosímetro ZEISS Surfcom 480 con procesador de datos
- Balanza Mettler E2001 / MC max 60 kg
- Balanza Mettler Toledo classic max 320g/min 10 mg



(a)



(b)

Figura 65. Vista de a) sala de microscopía, b) Balanza termogravimétrica dentro de su sala.

#### **3.4.4 Sala de Termogravimetría**

La balanza termogravimétrica SETSYS Evolution18 (TGA, DTA, DSC), con un rango de trabajo desde temperatura ambiente a 1.750°C y una línea termostatzada hasta 200°C, cuenta con un sistema de seguridad para ensayos con H<sub>2</sub>, y está adaptada para la conexión simultánea de un sistema generador de vapor y cromatógrafo de gases. Su diseño permite diferentes posibilidades de ensayos, en diferentes atmosferas, incluyendo:

- Ensayos en atmósfera de hidrógeno puro
- Ensayos en atmósfera de oxígeno puro
- Ensayos en vapor H<sub>2</sub>O con otros gases simultáneamente
- Ensayos en atmósfera corrosiva hasta 1.000°C

Esta sala también está equipada con:

- Sistema CEM (controlled evaporator mixer) para suministro de vapor.
- Sistema fijo de detección de hidrógeno Dräger Polytron SE Ex con sistema de control Regard 1.

#### **3.4.5 Sala de Ciclo Térmico**

Incluye la instrumentación necesaria para ciclado térmico:

- Dos hornos de mufla
- Un horno de alta temperatura
- Una cámara climática
- Un lazo de ensayos del receptor volumétrico refrigerado por aire y la instrumentación asociada

#### **3.4.6 Sala de Microscopía Electrónica de Barrido**

Los dispositivos descritos están complementados con un microscopio electrónico instalado en su propia sala, que es compartida entre la Unidad de Tratamientos Solares el Agua y la Unidad de Materiales para Tecnologías Termosolares de Concentración. Para más detalles ver sección 3.5.4.

### **3.5 Laboratorio de Tecnologías del Agua - WATLAB**

Dentro del marco del Proyecto SolarNova financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Fondo Especial del Estado para la Dinamización de la Economía y el Empleo (Plan E), se construyó un nuevo laboratorio en 2009. Desde entonces, se han realizado adquisiciones de nueva instrumentación dentro del Proyecto SolarNova. El laboratorio de tecnologías de agua de la PSA consta de 200 m<sup>2</sup> distribuidos en seis salas: (i) una sala de 30 m<sup>2</sup> para el almacenamiento de productos químicos y otros consumibles. Está organizado en estanterías de acero inoxidable numeradas y etiquetadas con refrigeradores y congeladores para el mantenimiento de muestras y estándares; ii) una oficina de 17 m<sup>2</sup> con tres puestos de trabajo donde los investigadores visitantes pueden analizar los datos de los experimentos realizados en PSA. Además, (iii) 4 salas técnicas también forman parte del laboratorio y se enumeran y describen a continuación:

- Laboratorio general

- Laboratorio de cromatografía.
- Laboratorio de microbiología
- Laboratorio de microscopía.

### 3.5.1 Laboratorio general

El laboratorio principal tiene 94 m<sup>2</sup> (Figura 66). Está equipado con cuatro grandes bancos de trabajo, dos campanas de extracción de gas, un calentador, un horno, una bañera ultrasónica, cuatro centrifugas, dos espectrofotómetros UV/visibles, un fluorímetro, un sistema de destilación al vacío, un sistema de agua ultrapura, un medidor de pH, un medidor de conductividad, un medidor de turbidez, y una mesa de precisión-escala. Además, tiene un sistema centralizado de distribución de gas, UPS, conexión de enchufes de tres clavijas y sistemas de seguridad (extintores, ducha, lavaojos, etc.). El laboratorio también está equipado con respirometría suspendida y soportada con lodo activado (BMT), dispositivos de medición y equipamiento necesario para el análisis de demanda biológica de oxígeno (BOD), ensayos de toxicidad y fitotoxicidad (agudo y crónico) y demanda química de oxígeno (COD). Además, también hay un sistema Jar-Test para la optimización de estudios de separación fisicoquímica.



Figura 66. Vista general del nuevo laboratorio de tecnologías de agua de PSA

### 3.5.2 Laboratorio de cromatografía

Este laboratorio (Figura 67.b) está equipado con tres cromatógrafos de líquidos de alto rendimiento con detector de matriz de diodos (HPLC-DAD y dos UPLC-DAD) con bomba cuaternaria e inyección automática; una Extracción Automática en Fase Sólida (ASPEC) que permite trabajar con baja concentración de contaminantes (Figura 67.c) y dos cromatógrafos iónicos (Figura 67.a): uno configurado para el análisis isocrático de aminas y cationes (Metrohm 850 Professional IC), y otro para el análisis de gradiente de aniones y ácidos carboxílicos (Metrohm 872 Extension Module 1 y 2)

con detectores de conductividad (detector Methrom 850 Professional IC). También se incluyen dos analizadores de carbono orgánico total (TOC) por combustión catalítica a 670°C y un analizador de nitrógeno total (TN) con cargador de muestras. Además, se adquirió un AB SCIEX TripleTOF 5600+ para detectar e identificar contaminantes no específicos o desconocidos presentes en las aguas residuales o generados (productos de transformación) durante los tratamientos de agua: Triple TOF por DuoSpray Source combinando modos Turbo Ion Spray y APCI (Presión Atmosférica Ionización Química). Además, el sistema incluye un paquete estadístico de metabolómica para analizar múltiples muestras de múltiples experimentos e identificar posibles marcadores químicos y biológicos (Figura 67.d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 67. a) Sistema Metrohm Ion chromatograph. b) Vista general del laboratorio de cromatografía de la PSA. c) Analizador Agilent Ultra-fast UPLC-DAD. d) SCIEX TripleTOF 5600+.

### 3.5.3 Laboratorio de microbiología

El laboratorio de microbiología de 47 m<sup>2</sup> con nivel de bioseguridad 2 (Figura 68) está equipado con cinco cabinas microbiológicas de caudal laminar (clase II), tres autoclaves, tres incubadoras, un baño térmico y un microscopio óptico de combinación de fluorescencia y contraste de fase con una cámara digital incorporada. Además, hay disponible un preparador automático de medios de cultivo y relleno de placa y dos rampas de filtración con seis posiciones disponibles cada una de ellas.

Este laboratorio también está equipado con un equipo de PCR cuantitativa ultrarrápida en tiempo real (Reacción en Cadena de la Polimerasa), y un espectrofotómetro NanoDrop para la cuantificación genética de microvolúmenes. También cuenta con sistemas de preparación de muestras tales como: (i) un 'Fast Prep 24', un homogeneizador de sobremesa de alta velocidad para la lisis de muestras biológicas, necesario para análisis posteriores de muestras de material genético; y (ii) un equipo homogeneizador Stomacher 400 Comecta para trituración y homogenización de alimentos y tejidos vegetales.



Figura 68. Vista general del laboratorio de microbiología de la PSA.

#### 3.5.4 Laboratorio de microscopía

El laboratorio de microscopía es una sala de 11 m<sup>2</sup> (Figura 69.a) donde se encuentra un microscopio electrónico de barrido (SEM). Además, el laboratorio de microscopía también tiene un Detector de Electrón Secundario Medioambiental (ESED). Para la preparación de muestras microbiológicas y catalizadores sean analizados en el SEM, el sistema se completa con una capa de metal y un secador de punto crítico. En esta sala también se ubican dos microscopios ópticos: i) un microscopio óptico de combinación de fluorescencia y contraste de fase y ii) microscopio FISH (Leyca) con módulo de fluorescencia para desarrollar la técnica FISH (Hibridación Fluorescente In Situ) para la visualización de la hibridación de ADN con probetas específicas en células vivas utilizadas para el monitoreo de microorganismos clave dentro de una población heterogénea (Figura 69.b).

Además, el sistema se completa con una estación para documentación fotográfica, que consiste en un iluminador trans-UV para detectar y visualizar ADN, ARN y proteínas. También incluye una estación de documentación con una cámara para tomar imágenes de ADN, ARN y proteínas.



(a)



(b)

Figura 69. a) SEM (Microscopio electrónico de barrido). b) Microscopio óptico para técnica FISH.

### 3.6 Laboratorio para la evaluación de materiales para sistemas de almacenamiento térmico - TESLab

Este laboratorio tiene como objetivo estudiar la viabilidad de materiales como medio de almacenamiento a escala preindustrial. Los siguientes instrumentos enfocados en el comportamiento de Materiales de Cambio de Fase (PCM) para el almacenamiento latente están disponibles:

- HDR: Pequeño horno bajo atmósfera de aire ambiente con control preciso de los rangos de calefacción/refrigeración, monitorización de temperatura de muestras; permite ciclos de fusión/solidificación (PCM) de hasta 500°C y, ciclos encadenados y con períodos de espera. Tamaño de muestra: 10-20 g.
- SUBMA: Pequeño dispositivo cerrado dentro de un horno, para muestras de 30-40 g. Permite pruebas en atmósfera inerte (N<sub>2</sub>, Ar), controlando la temperatura del horno y el caudal de gas, y el monitorizado de la temperatura de muestra. Los ciclos de fusión/solidificación (PCM) de hasta 500°C, se pueden realizar con ciclos encadenados o con períodos de espera entre los ciclos.
- AgH: Horno bajo atmósfera de aire ambiente con un control preciso de calefacción y refrigeración. Los ciclos de fusión/solidificación de hasta 350°C se pueden realizar con ciclos encadenados y con períodos de espera entre ciclos para muestras de 10-20 g.

Además, también hay un dispositivo para medir la conductividad térmica de sólidos.



Figura 70. Usando el dispositivo HDR.

## 3.7 Laboratorio de Desalación de la PSA

### 3.7.1 Planta para estudiar aplicaciones de destilación por membranas en configuraciones de contacto directo, “air-gap” y “permeate-gap”

Esta instalación consiste en un banco de ensayos con una pequeña placa y un marco (Figura 71) que pueden utilizarse para evaluar la destilación por membranas en configuraciones de contacto directo, “air-gap” o “permeate-gap”. El módulo está hecho de polipropileno y diseñado para que la membrana pueda sustituirse fácilmente. El módulo tiene una placa de condensación en el lado frío para operar en configuración “air-gap”, pero se puede cerrar por la parte de abajo para operar en “permeate-gap” manteniendo el permeado dentro del hueco o eliminar para operar en modo contacto directo. La superficie efectiva de la membrana es de 250 cm<sup>2</sup>.

La instalación tiene dos circuitos hidráulicos separados, uno en el lado frío y otro en el lado caliente. En el lado caliente hay un depósito de 80 L equipado con un calentador eléctrico (3 kW) controlado por un termostato (90°C máximo) y la circulación se obtiene desde el lado de almacenamiento y alimentación del módulo por medio de una bomba. En el lado frío hay un refrigerador (800 W a 20°C) controlado por temperatura y el agua circula entre un depósito frío de 80 L y el módulo. El circuito está termo-aislado y monitoriza temperatura, caudal y presión, conectado a un sistema SCADA.



Figura 71. Planta para estudiar aplicaciones de destilación por membranas.

### 3.7.2 Banco d ensayos para evaluar la destilación por membranas con membranas planas

Esta instalación es un laboratorio de alta precisión (Figura 72) diseñado para ensayos fundamentales y de viabilidad sobre destilación por membranas. Está equipado con las siguientes herramientas únicas que son esenciales para obtener resultados representativos y escalables:

- 1) Módulo con un formato que garantiza una distribución de caudal representativa. El tamaño de la celda es suficiente para una distribución del caudal escalable y que se puedan aplicar los resultados en la tecnología MD a gran escala.
- 2) Configuración del canal MD ajustable a todas las variantes de configuración (PGMD, AGMD, DCMD, VMD, VAGMD).
- 3) Precisión de temperatura de 0,05°C.
- 4) Diferencia de temperatura de la fuerza impulsora controlable.
- 5) Sistema de control completamente automatizado y una amplia gama de posibles parámetros mediante pantalla táctil PLC.
- 6) Membrana y láminas de condensación de tamaño A4.



Figura 72. Banco de ensayos para evaluar la destilación por membranas con membranas planas.

### 3.7.3 Banco de ensayos para ósmosis directa y ósmosis de presión retardada con dos efectos

Esta instalación consta de un banco de ensayos con dos celdas pequeñas de placa y marco para ósmosis directa (FO) que pueden conectarse en serie o en paralelo (Figura 73). Hay, por lo tanto, una bomba para la solución extractiva y dos para la solución de alimentación, cada una con un caudal variable y medición de caudal. El circuito hidráulico ha sido modificado para que las celdas puedan operar en modo ósmosis de presión retardada (PRO). Con ese objetivo, se han instalado en el lado de la corriente extractiva tubos de acero y una bomba de alta presión (3 L/min; hasta 17 bar), y se utilizan celdas con presión operacional de hasta 15 bar. Las celdas tienen cada una un área efectiva de membrana total de 100 cm<sup>2</sup>, y canales hidráulicos en zigzag de 4 mm de ancho y 2 mm de profundidad. El sistema utiliza un contenedor para la solución extractiva y dos para las soluciones de alimentación, colocadas en una balanza para poder medir los cambios en el caudal másico de ambas en cada celda. Los contenedores tienen un sistema dosificador automático para mantener una salinidad constante. El sistema tiene dos medidores de conductividad para baja salinidad y uno para alta salinidad, así como un medidor de presión en cada línea y lecturas de temperatura.



Figura 73. Banco de ensayos para FO y PRO.

### 3.8 Laboratorio de Recubrimientos Ópticos Avanzados - OCTLAB

Esta línea de laboratorio se dedica al desarrollo y estudio completo de nuevos recubrimientos selectivos para materiales absorbentes utilizados en sistemas de concentración solar a media y alta temperatura (hasta 700°C), así como de tratamientos antirreflectantes para cubiertas de vidrio utilizadas en algunos diseños de receptores para alta temperatura y en tubos receptores de captadores cilindroparabólicos. El equipamiento dedicado a esta línea de actividad es suficiente para caracterizar y evaluar los desarrollos de recubrimientos, así como para evaluar el comportamiento de otros tratamientos y recubrimientos disponibles en el mercado o desarrollados por otras instituciones públicas o privadas. El equipamiento asociado a esta línea también puede usarse para la caracterización óptica de reflectores solares, complementando así el específicamente dedicado a la línea de actividad de ensayo y caracterización de reflectores solares.

A continuación, se ofrece un resumen del equipamiento disponible para recubrimientos ópticos avanzados:

- Espectrofotómetro UV-VIS-NIR Perkin Elmer modelo LAMBDA 950 (Figura 74.a), equipado con una esfera integradora de 150 mm recubierta con Spectralon.
- Espectrofotómetro FTIR Frontier Perkin-Elmer, equipado con una esfera integradora recubierta de oro fabricada por Pike (Figura 74.b).
- Equipo portátil Optosol para caracterización de absorbentes solares. Este equipo mide la absorptancia solar y la emitancia térmica de absorbentes selectivos a 70°C, tanto en sustratos planos como en tubos absorbentes. El dispositivo para medir la absorptancia solar tiene una esfera integradora con dos detectores. Para medir la emitancia térmica tiene un túnel semicilíndrico que emite radiación infrarroja a 70°C.

- Microscopio óptico LEICA, modelo DM4 M, con sistema de adquisición de imágenes y software para análisis de imágenes (Figura 74.c).
- Cámara climática QUV, Q-PANEL, para ensayos de envejecimiento acelerado (Figura 74.d).
- Viscosímetro BROOKFIELD LVDV-I +.
- Perfilómetro BRUKER, modelo DektakXT stylus, con cámara óptica y software para análisis de superficie (Figura 74.e).
- Goniómetro KSV CAM200 para medir ángulos de contacto (Figura 74.f).
- Abrasímetro lineal TABER, modelo 5750, equipado con diferentes tipos de materiales abrasivos para medir la resistencia a la abrasión de recubrimientos y materiales (Figura 74.g).
- Abrasímetro oscilante TABER, modelo 6160, para medir la resistencia relativa a la abrasión de materiales a la abrasión y/o deterioro de superficies producido por movimiento de arena. Se utilizan diferentes tipos de arena estandarizada (Figura 74.h).

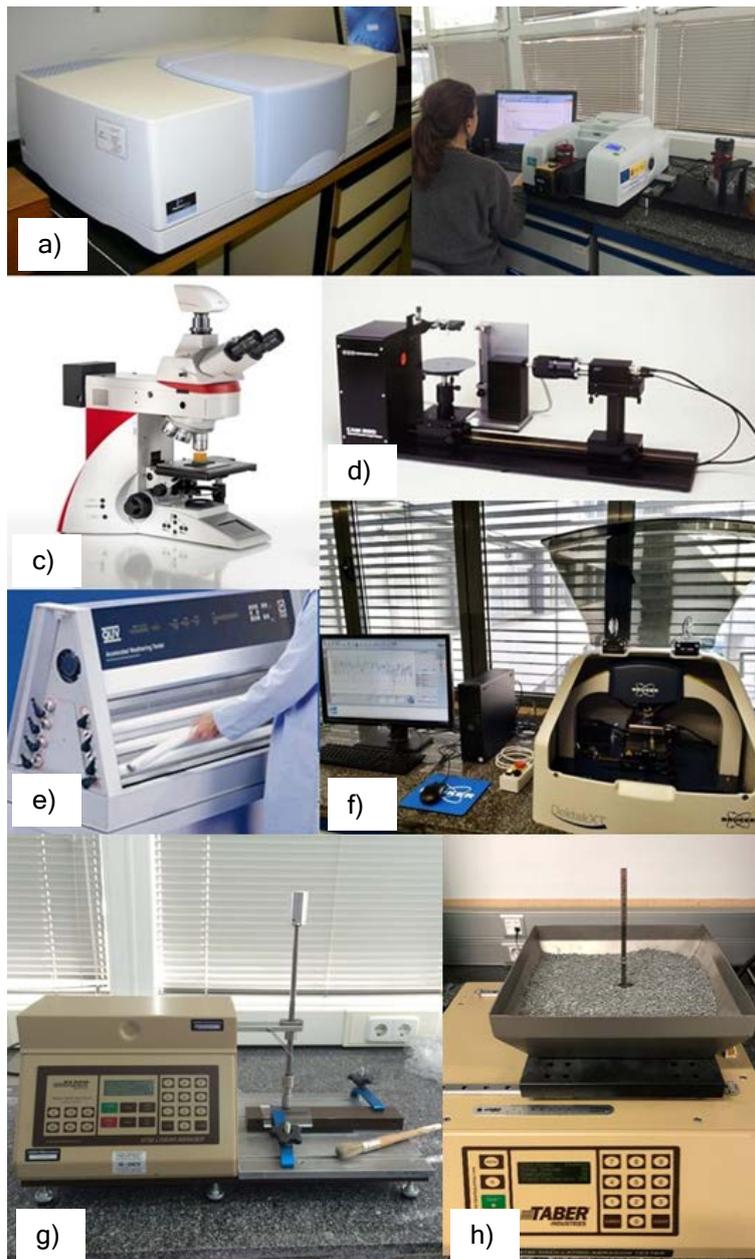


Figura 74. Equipamiento del laboratorio de recubrimientos ópticos avanzados.

- Hornos. Hay tres hornos para tratamiento térmico:
  - Horno de 120x100x300 mm con una temperatura máxima de 1.200°C.
  - Horno de atmósfera controlada con una temperatura máxima de 800°C.
  - Horno de convección forzada de 500x400x600 mm con una temperatura máxima de 550°C.

### 3.9 Laboratorio de medios porosos para sistemas de concentración solar - POMELAB

El laboratorio de medios porosos ubicado en CIEMAT-Moncloa (Madrid) comprende tres instalaciones principales y algunas otras técnicas para la caracterización de materiales porosos utilizados para sistemas de receptores centrales con aire como fluido de transferencia de calor.

#### 1) Caracterización térmica de absorbedores volumétricos.

Su componente principal es un banco de ensayo diseñado para ensayos térmicos de nuevos absorbedores volumétricos y configuraciones y su envejecimiento en condiciones estables y dinámicas. Los componentes principales instalados en este banco de ensayos (Figura 75) son:

- Un simulador solar de 4 kWe compuesto por una lámpara de xenón y un concentrador parabólico que puede alcanzar flujos de hasta 1.500 kW/m<sup>2</sup>;
- Subsistema de receptor: con 24 termopares tipo K, 2 termopares de superficie y una cámara infrarroja;
- Subsistema de intercambiador de calor aire-agua helicoidal: con 4 sensores PT100, una medida de velocidad del caudal de masa de agua, una bomba de agua y 2 termopares de superficie; y
- Sistema de extracción: con 1 termopar tipo k, 1 sensor PT100, una medida de velocidad del caudal de masa de aire y un soplador de aire.

Este banco de pruebas tiene la flexibilidad de estudiar el coeficiente de extinción de diferentes medios, que puede usarse como una herramienta para aproximar el análisis de radiación en medios semitransparentes siguiendo la ley de Bouger.

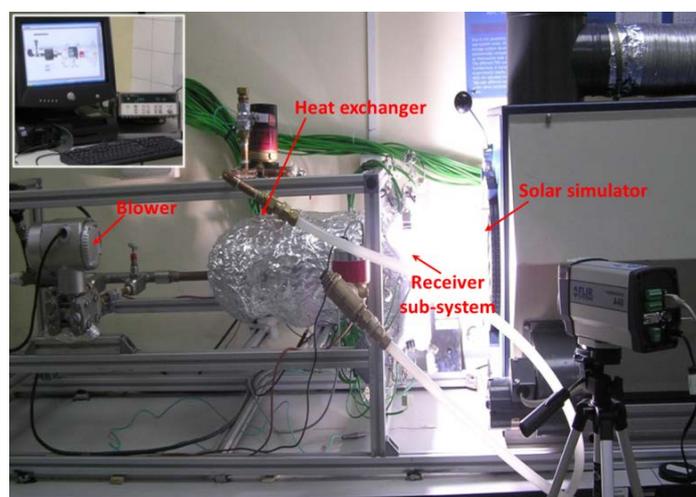


Figura 75. Banco de ensayos para receptores volumétricos

## 2) Medida de caída de presión hasta 300°C

Esta instalación mide la diferencia de presión entre materiales porosos, como absorbentes volumétricos o materiales de relleno, para diferentes velocidades de fluido. Además, es capaz de medir la diferencia de presión a temperatura ambiente y para temperaturas del aire hasta 300°C.

Por tanto, se derivan las principales propiedades descritas por la extensión de Forchheimer a la ley de Darcy: coeficiente de permeabilidad viscosa y coeficiente de permeabilidad inercial. Los componentes principales son:

- Soplador Sodeca con control de velocidad.
- Válvula de bola Hastinik de 1 ½".
- Anemómetro de caudal de aire
- Resistencia de calor Nabertherm
- Medidor de diferencia de presión Honeywell

Además, se han desarrollado diferentes técnicas para la evaluación y medición de varios parámetros geométricos importantes de materiales porosos, como la porosidad y el área de superficie específica.



Figura 76. Banco de ensayos para medir diferencias de presiones configurado hasta 300°C.

## 3.10 Laboratorio de Combustibles Solares - SFUELS

Este laboratorio, ubicado en CIEMAT-Moncloa (Madrid), está equipado con la instrumentación necesaria para caracterizar materiales para ciclos termoquímicos. El lazo de ensayos consiste en un horno de alta temperatura (1.600°C) apto para una variedad de aplicaciones; acoplado a un cromatógrafo de gas (Varian CP4900) equipado con una columna de tamiz molecular y un detector TCD. Finalmente, también hay un horno de mufla para el ciclo de los materiales que alcanza temperaturas de hasta 1.700°C con un control de temperatura preciso.

### 3.11 Red radiométrica de la PSA

La PSA ha tenido una estación meteorológica desde 1988, dedicada principalmente a la medida de la radiación solar integrada (radiación global, directa y difusa), pero también para otras variables meteorológicas genéricas (temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y presión atmosférica, precipitación acumulada, etc.). La estación original fue completamente remodelada en 2005 siguiendo los requisitos más estrictos de calidad y precisión en la medición de la radiación solar de acuerdo con las pautas de la BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Desde el año 2012 esta estación se llama estación METAS (Figure 77).

Los instrumentos de la estación METAS están en el rango más alto de medición de radiación solar. Todos los sensores de radiación tienen calefacción y ventilación y tienen un sensor de medición de temperatura. Estos equipos proporcionan la mejor información sobre radiación solar y variables atmosféricas más generales, y puede usarse para filtrar datos de entrada y validar modelos espectrales. Se usan para:

- Medición del balance de radiación terrestre. La radiación entrante y saliente de onda corta y onda larga se mide a 30 m.
- Caracterización de componentes de radiación solar: (global, directa y difusa).
- Bandas espectrales UV y PAR.
- Perfil de viento vertical: velocidad y dirección del viento a 2, 10 y 30 m.
- Perfil vertical de temperatura y humedad a 2 y 10 m.
- Información diversa del clima: pluviómetro, barómetro y psicrómetro.



Figure 77. Vista general de la estación METAS.

Además, se ha instalado un conjunto de estructuras complementarias para la calibración de radiómetros cerca de esta estación meteorológica siguiendo los procedimientos internacionales estandarizados (ISO-9059 e ISO-9846). Por un lado, se ha instalado un seguidor solar de alto rendimiento con la posibilidad de portar 2 pireheliómetros de referencia (radiómetro de cavidad absoluta PMOD PMO6-CC) y un total de 19 pireheliómetros de campo cerca de METAS. Por otro lado, se han instalado 3 bancos de calibración a 50 metros de METAS, con capacidad para montar 20 piranómetros en cada uno (Figura 78). Estas instalaciones se operan en colaboración con la Unidad de Instrumentación.



Figura 78. Instalaciones para calibración.

Desde principios de 2018, hay siete nuevas estaciones radiométricas completamente operativas distribuidas sobre el área de la PSA. Estas estaciones están equipadas con piranómetros y pirheliómetros de primera clase, seguidores solares de 2 ejes y tienen sistemas de adquisición de datos Campbell CR1000 (METAS tiene un CR3000).



Figura 79. Estaciones radiométricas de la PSA.

## CONTACTOS

---

**Dirección Postal:**

Plataforma Solar de Almería  
Apartado de correos 22  
04200 Tabernas (Almería)  
**Teléfono:** (+34) 950 387 800  
**Email:** [info@psa.es](mailto:info@psa.es)  
**Página web:** [www.psa.es](http://www.psa.es)

**Centro de visitantes:**

Ctra. Senés km 4.5  
04200 Tabernas (Almería)  
**Teléfono:** (+34) 950 387 990  
**Email:** [visitas@psa.es](mailto:visitas@psa.es)  
**Página web:** <https://www.psa.es/es/visitas/>