



Laboratorios del Grupo de Investigación de Termodinámica y Energías Renovables

El Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) es un grupo universitario del Plan Andaluz de Investigación. Desde su constitución como grupo universitario, el GTER ha venido actuando, siempre en el ámbito de I+D en energía solar, bajo diversas circunstancias administrativas:

- Universidad de Sevilla.
- AICIA (Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía)
- CENTER (Centro de Nuevas Tecnologías Energéticas)
- IAER (Instituto Andaluz de Energías Renovables)
- SODEAN (Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía)
- ADESA (Asociación para el Desarrollo de la Energía Solar en Andalucía)

LÍNEAS DE I+D

Las principales líneas de I+D del GTER son:

- Medida, análisis y estimación de la radiación solar, total y espectral.
- Conversión térmica de la radiación solar, principalmente en alta temperatura. Desde hace algunos años, a raíz del traslado de la Escuela a la Cartuja, el GTER cuenta con una línea de ensayos de equipos solares de baja temperatura.
- Conversión fotovoltaica, sólo a nivel de análisis energético de paneles y de sistemas.
- Análisis energético y exergético de sistemas energéticos en general.



Figura 1. Vista de la estación de medidas radiométricas y meteorológicas del GTER

Coyunturalmente, el GTER ha participado en otras actividades, como son:

- Planificación energética.
- Análisis del comportamiento energético de instalaciones.
- Telemonitorización de instalaciones solares.
- Asesoramiento puntual sobre instalaciones de energías renovables.
- Elaboración de material docente para energías renovables.

Además del laboratorio docente, el GTER cuenta con otras instalaciones de I+D. A continuación se describen las principales.

Estación de medidas radiométricas y meteorológicas

La estación de medidas radiométricas y meteorológicas está situada en la azotea del edificio de laboratorios L-1 de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla desde diciembre del año 1998, siendo sus coordenadas geográficas 37.40° de latitud Norte y 6.01° de longitud Oeste. Anteriormente, desde el año 1984 hasta mayo de 1998, estuvo situada en el antiguo edificio de la Escuela Superior de Ingenieros, cuyas coordenadas geográficas son $37,37^\circ \text{N}$ y $6,00^\circ \text{W}$.

La estación de medidas está integrada por un sistema automático que mide, trata y registra digitalmente, de forma automática y continuada, los valores de una serie de variables radiométricas y meteorológicas, y por otros equipos que no están integrados en dicho sistema, ya sea porque no proporcionan una salida adecuada para su tratamiento electrónico (caso del heliógrafo de Campbell-Stokes), ya sea porque no están concebidos para la medida continua y rutinaria.

En su configuración actual, el sistema automático de adquisición de datos está integrado por los siguientes elementos:

- *Sensores*. Los sensores son los dispositivos que captan el valor absoluto o la variación de una determinada magnitud física (señal de entrada) y la convierten en una señal de salida apta para su tratamiento electrónico posterior. Los sensores están instalados en la plataforma superior de las instalaciones de la estación de medidas, situada a 16 m sobre el nivel del mar.
- *Panel de conexión*. El panel de conexión, situado en la misma plataforma que los sensores, proporciona una interfaz física entre estos y la unidad de



Figura 2. Vista general del disco parabólico (DISPA-Stirling)

adquisición, facilitando y simplificando la instalación y el mantenimiento del cableado.

- *Unidad de adquisición.* La unidad de adquisición realiza las funciones de amplificación de las señales de los sensores, multiplexión, muestreo y retención y conversión analógico/digital de las señales de los sensores que requieren todos o algunos de estos procesos con anterioridad a su tratamiento digital en la unidad central. Actualmente esta unidad es un escáner HP 34970A de Hewlett-Packard, cuyas características más destacables son:

- Capacidad para hasta 120 canales analógicos, con tres ranuras para inserción de módulos multiplexores.
- Resolución de 6 ½ dígitos (22 bits)
- Velocidad de muestreo de hasta 250 canales/s.
- Un módulo multiplexor HP 34901A, con 20 canales de entrada (pueden mezclarse canales de 2 y 4 hilos) más 2 canales protegidos (intensidad hasta 1 A), velocidad de muestreo de 60 canales/s y hasta 120 conmutaciones/s (canales digitales)
- Unidad central. La unidad central se compone de un ordenador personal, una tarjeta controladora

para la conexión con la unidad de adquisición por medio de una interfaz HP-IB y un conjunto de programas de ordenador (software) para las funciones de control del sistema de adquisición, interfaz de operador y programación y mantenimiento del módulo de adquisición. El programa de la unidad central está desarrollado en lenguaje HP-VEE.

Sensores y equipos de medida

El sistema automático de adquisición de datos consta de los siguientes sensores:

- Un pirheliómetro Eppley NIP para la medida de irradiancia directa normal, montado sobre un seguidor solar en dos ejes controlado por microprocesador;
- Un piranómetro KIPP ZONEN CM21 para la medida de irradiancia global horizontal;
- Un piranómetro EPPLEY 8-48 B/N para la medida de la irradiancia global sobre superficie inclinada (37° Sur);
- Un piranómetro Middleton SK01-D para la medida de la irradiancia difusa sobre superficie horizontal, con banda de sombra de 7.40 cm de anchura y 30.4 cm de radio;



- Un conjunto anemómetro-veleta Young modelo Wind Monitor-MA 05106 para la medida de velocidad y dirección de viento;
- Una sonda barométrica Young modelo 61201 con puerto de presión Young modelo 61002 para la medida de presión atmosférica;
- Una sonda Young modelo 41372VC/VF, compuesta por RTD de Platino de 1000 W y sensor capacitivo de humedad instalados en un protector de radiación solar, para la medida de temperatura ambiente y humedad relativa.

Además de estos sensores conectados al sistema automático de adquisición de datos, la estación cuenta con otros equipos de medida, que se relacionan a continuación:

- Un heliógrafo de Campbell-Stokes, marca Lambrecht, en operación desde 1990;
- Un pirheliómetro de cavidad Eppley HF. Este equipo se usa para realizar comprobaciones periódicas de los pirheliómetros Eppley NIP.
- Un espectro-radiómetro portátil LICOR LI-1800, con rango de medida 300-1100 nm.
- Un espectro-radiómetro MONOLIGHT Optical Spectrum Analyser mod. 6601 con un rango de medida espectral 300-2500 nm.

- Un sistema de termografía infrarroja (3-12 mm) Inframetrics modelo 760.

Disco parabólico (proyecto DISPA-Stirling)

En marzo de 2004 se finalizó la instalación de un disco parabólico con motor Stirling en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Este sistema está integrado en un proyecto, llamado EnviroDish, en el que se prevé instalar varias unidades en distintos países con el fin de recabar datos fiables sobre el funcionamiento de estos sistemas y los costes reales de instalación y O&M. El sistema que se describe presenta la particularidad de estar conectado a la red de distribución, acogido al Real Decreto de Régimen Especial.

El sistema EnviroDish es un sistema que convierte la radiación solar en energía eléctrica. Para ello, cada unidad consta de:

- Anillo de cimentación.
- Estructura soporte.
- Concentrador solar.
- Sistema de control y seguimiento.
- Receptor e intercambiador de calor.
- Motor Stirling y alternador.

A continuación se relacionan las características técnicas más destacadas de cada uno de estos componentes.

Características técnicas

- **Anillo de Cimentación.** El anillo de cimentación es el apoyo del conjunto principal y proporciona a la vez la superficie sobre la que éste se desplaza. Tiene forma hexagonal y está fabricado en hormigón armado (aprox. 10.5 m³ de cemento y 540 kg de acero). Sus dimensiones son:
 - Radio máximo hexágono exterior: 4130 mm.
 - Profundidad: 300 mm.
 - Radio hexágono interior: 1000 mm.
 - Ancho: 850 mm.

La superficie superior del hexágono exterior constituye el camino de rodadura para el conjunto principal, por lo que las tolerancias en altura son muy exigentes (± 5 mm para cualquier punto de la superficie)

- **Estructura.** La estructura móvil soporta el motor y el concentrador y permite el seguimiento de la trayectoria del sol. Está constituida por una celosía, compuesta por rótulas y barras que transmiten la carga sobre las rótulas, evitando así los momentos de flexión y torsión y proporcionando ligereza a la estructura.
- **Concentrador solar.** El concentrador cuya función es captar y concentrar la radiación solar. Está formado por ocho segmentos reflectivos a base de espejos de vidrio fino (0,8 mm de espesor) adheridos a un soporte de fibra de vidrio. Los segmentos se unen

SODETEK, S.A.

**INSTRUMENTOS DE MEDIDA
TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS
Y TRATAMIENTO DE SEÑAL
ORDENADORES INDUSTRIALES
TRANSMISIÓN DE DATOS**

Distribuidor oficial de

FLUKE

Tektronix



**NATIONAL
INSTRUMENTS™**
The Software is the Instrument™

MITAC

Luis Belmonte, nº 2 Acc. 5
41018 SEVILLA

Teléfono: 95 453 99 25 - Fax: 95 453 98 40

Email: sodetek@arrakis.es



entre sí por medio de otras tantas costillas, también de fibra de vidrio, para obtener la geometría fina de un paraboloide de revolución. El concentrador se monta sobre un anillo de sujeción a base de celosías similares a las que componen la estructura soporte. Las características principales del concentrador son:

- Diámetro de la apertura: 8,5 m.
 - Área de captación: 56,7 m².
 - Factor de concentración: 2500.
 - Reflectividad: 94%.
- *Sistema de control y seguimiento.* El sistema de control y seguimiento permite al sistema mantener la orientación correcta en todo momento. La mayor parte de los elementos del sistema de control se encuentran en un armario contiguo al anillo de cimentación en su lado norte.

Las características más destacadas del sistema de seguimiento son:

- Suspensión: Azimutal.
- Máxima velocidad del viento permitida durante operación: 65 km/h.
- Máxima velocidad viento permitida en la posición de reposo: 160km/h.
- Seguimiento solar: Mediante motores eléctricos tipo servo de 230V.
- Velocidad máxima: 60°/min.
- Motor de emergencia: Motor eléctrico de 24V de corriente continua.

El sistema de control del EnviroDish consta de los siguientes componentes principales:

- Ordenador central ubicado en la habitación del operador con receptor de GPS y comunicación a través de interBus-S.
- Armario situado en campo, donde se alojan los distintos controladores y las regletas de conexión.
- Controlador de la unidad de conversión de potencia.

El sistema de control requiere los valores de radiación solar y velocidad del viento. Si estos valores se encuentran dentro de los límites predefinidos, el sistema funciona normalmente, transfiriéndose los cálculos de posiciones y velocidades al Controlador de



Figura 3. Conjunto receptor-motor del disco parabólico

Movimiento, ubicado en el armario, por vía InterBus-S, un bus de campo industrial. Al mismo tiempo, el programa de control Stirling se ejecuta en el PC. El controlador Stirling, comienza localizando la Unidad de Conversión de Potencia (UCP), comunicada con el PC también vía InterBus. Con los datos medidos (presiones y temperaturas) adquiridos para controlar el sistema Stirling, el programa de control Stirling inicia y para el motor y calcula la presión del motor deseada. Los datos se transmiten al controlador de campo, situado en la UCP, que ejecuta los comandos y controla la presión del motor mediante la activación de las válvulas.

- *Unidad de Conversión de Potencia.* La Unidad de Conversión de Potencia integra los siguientes elementos:

- *Receptor solar.* El receptor es el elemento de interfaz entre el concentrador y el motor Stirling. Su función es absorber la radiación solar y transferirla, en forma de energía térmica, al motor Stirling de la forma más eficiente posible. El receptor del sistema EnviroDish es de tipo tubular, y se conecta directamente a las cabezas de los cilindros del motor. Está compuesto de tubos muy finos (aprox. 3 mm de diámetro) resistentes a las altas temperaturas de operación (hasta 800°C, con el gas de trabajo llegando a 650°C).

Los sistemas de disco parabólico con motor

Tabla I. Principales características de la Unidad de Conversión de Potencia Stirling

Tipo	Dos cilindros en V a 90°
Cilindrada	160 cm ³
Peso	430kg
Gas de trabajo	Hidrógeno
Presión de trabajo	20-150 bar
Potencia eléctrica bruta máxima	9,8 kW
Potencia neta	9,2 kW
Velocidad nominal	1500 rpm
Conexión eléctrica	400 V, 50 Hz, 3 fases



Stirling son también adecuados para la operación híbrida, en la que la radiación solar se complementa con un combustible fósil o biogás. En este caso, el receptor solar debe estar diseñado para permitir dicha operación.

- *Motor Stirling.* El ciclo Stirling es un ciclo termodinámico regenerativo de alto rendimiento con aporte de calor externo, lo que permite su operación con cualquier tipo de combustible o fuente energética, siendo, por sus características, especialmente adecuado para la conversión termoeléctrica de la energía solar.

El motor Stirling SOLO 161 tiene dos cilindros en V a 90°, con un pistón de expansión y otro de compresión. El receptor solar, el regenerador y el enfriador de gas se sitúan entre los pistones.

El motor opera según un ciclo cerrado en el que el gas de trabajo (H_2) se somete a procesos de calentamientos y enfriamientos alternativos. Cuando se calienta, el gas se expande y transmite trabajo mecánico al cigüeñal a través de los pistones.

La energía concentrada por el paraboloide de revolución se transfiere al gas de trabajo a través del receptor. En este sistema cerrado, el pistón de compresión -o pistón de desplazamiento- hace que el gas pase de un cilindro a otro, mientras que el pistón de expansión -o de trabajo- realiza el trabajo útil. El regenerador, que actúa como un sistema de almacenamiento intermedio, retiene la mayor parte del calor cedido por el gas en su paso de la zona caliente a la fría. El enfriador reduce aún más la temperatura del gas en la zona fría. Cuando el gas vuelve a la zona caliente, pasa a través del enfriador y del regenerador, recuperando la mayor parte del calor cedido en el proceso anterior.

- *Sistema de control.* La operación del motor se controla por medio de un sistema electrónico, que básicamente controla la presión del gas de trabajo en función de la radiación solar, de forma que la temperatura del receptor se mantenga constante.

Banco de ensayos de equipos solares térmicos domésticos del Instituto Andaluz de Energías Renovables

Los bancos de ensayos del IAER han sido diseñados y realizados con la finalidad de aplicar la Norma Europea al ensayo de equipos solares domésticos (compactos). Se encuentran en la azotea del edificio de Talleres y Laboratorios de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, ubicada en la Isla de la Cartuja, y se describen someramente a continuación:

1. Cuatro módulos de ensayo de componentes y sistemas solares térmicos. Cada módulo de ensayo está constituido por un circuito de preparación y su-

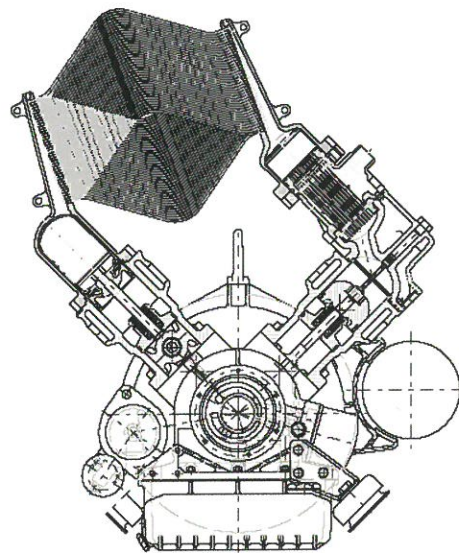


Figura 4. Esquema del motor SOLO 161 con el receptor solar

ministro cuya función principal es disponer agua a una temperatura prefijada y abastecer con un caudal determinado al sistema a ensayar. También disponen de un intercambiador exterior de placas que permite realizar el acondicionamiento del acumulador de cada módulo a la temperatura necesaria.

2. Un sistema centralizado de acondicionamiento del fluido de trabajo constituido por una planta enfriadora de 13 kW con capacidad de actuar como bomba de calor, de un acumulador de 1000 litros de capacidad y de los elementos hidráulicos necesarios para realizar el acondicionamiento: bomba de circulación, válvulas de acción todo-nada controladas mediante software o manualmente, sondas de temperatura e intercambiadores de calor de placas.
3. Sensores de medida:
 - a) Meteorológicos:
 - Dos piranómetros termoeléctricos Eppley y Kipp-Zonnen para medida de la radiación global.
 - Termorresistencia de platino (PT-100) para medir la temperatura ambiente.
 - Anemómetro, para medir la velocidad y dirección del viento.
 - b) Instalados en cada módulo:
 - Termorresistencias de platino de inmersión de 4 hilos apantallados, modelo DIN 1/10 que tienen una precisión de 0.08°C en el rango de temperaturas de 0 a 100°C.
 - Caudalímetros con precisión mejor del 1% dentro del rango de trabajo.
4. Sistema de adquisición de datos con capacidad para monitorizar temperaturas, caudales, radiación solar, presiones, velocidad y dirección de viento así como para enviar las señales de control necesarias para realizar actuaciones sobre los componentes sometidos a ensayo.



Los ensayos que se realizan son: ensayo de eficiencia global, determinación de la ecuación característica y el coeficiente de pérdidas térmicas nocturnas, rendimiento medio del equipo y cálculo de prestaciones energéticas anuales. A partir de los valores obtenidos en los ensayos, y utilizando los valores climáticos del programa PROSOL obtenidos a partir de las medidas de la estación de medidas radiométricas del GTER en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, se obtienen las prestaciones energéticas anuales del equipo.

Instalación para ensayos energéticos de sistemas fotovoltaicos

Esta instalación permite determinar el comportamiento energético de cualquier tipo de instalación fotovoltaica, realizándose desde el balance de potencia hasta el balance energético. Además existe la posibilidad de realizar análisis energético a los diferentes componentes de forma individual. Para ello se dispone de distintos equipos de medidas y sistemas de adquisición de datos configurables según los objetivos del ensayo, además de las instalaciones y equipos mencionados con anterioridad.

En colaboración con el CENTER, se dispone de un banco de ensayos de grupos motobombas en aplicaciones fotovoltaicas, que permite hacer funcionar el grupo moto-bomba a ensayar con módulos fotovoltaicos en condiciones reales o con una fuente de alimentación en corriente continua. Este banco de ensayos se compone de los siguientes elementos:

Circuito de impulsión

Este subsistema comienza en la bomba sumergible objeto de ensayo y termina en el propio depósito en el que se encuentra ubicada. Los elementos que lo componen son:

- Depósito de poliéster de 1000 litros de capacidad.
- Bomba sumergible.
- Válvula antirretorno.
- Válvula de seguridad (tarada a 20 bares)
- Sensor de presión (medida de presión en la impulsión)
- 2 caudalímetros (uno para cada rango de caudales)
- Calderín. Depósito hidroneumático de 500 litros y con una presión máxima de servicio de 20 kg/cm²
- Sonda de nivel capacitiva.
- Válvulas de regulación (una para cada rango de caudales)
- Controlador PID. Recibe en cada instante la señal del sensor de nivel y comanda las válvulas de regulación mediante una señal 4-20 mA.

Circuito de control de presión

Éste es un circuito de aire comprimido mediante el que se modifica y se fija la presión en el punto de funcionamiento deseado para el sistema de bombeo. Los elementos que lo componen son:



Figura 5. Banco de ensayos de equipos solares térmicos domésticos

- Sensor de presión.
- Válvula de bola de escape.
- Electroválvula de inyección de aire.
- Compresor.
- Controlador PID. Recibe en cada instante la señal del sensor de presión del calderín y regula la presión en su interior a través de las electroválvulas.

**Valeriano Ruiz Hernández,
Manuel Silva Pérez e Isidoro Lillo Bravo
Grupo de Termodinámica y Energías Renovables**