

### **3 Introducción a los sistemas solares de concentración.**

Los sistemas solares de concentración o sistemas termosolares se basan en redireccionar la radiación solar incidente sobre una superficie (superficie de captación) concentrándola sobre otra superficie (superficie absorbedora). El cociente entre ambas superficies se denomina relación de concentración.

Las tres tecnologías más extendidas son los sistemas de receptor central o de torre, los colectores cilindro parabólicos y los discos parabólicos con motores Stirling.

No se considera relevante para el presente trabajo detallar las dos primeras tecnologías, por lo que nos centraremos en el análisis de los discos parabólicos con motor Stirling.

#### ***3.1 Discos parabólicos Stirling***

Actualmente los sistemas solares de concentrador de disco parabólico se utilizan mayormente para generar energía eléctrica de forma directa, a través de un motor térmico denominado Stirling. Dichos sistemas utilizan uno o varios concentradores en forma de paraboloides de revolución conocidos como concentradores de foco puntual, es decir concentran todos los rayos incidentes sobre su superficie en un solo punto, que es el receptor.

El motor Stirling posee pistones que van moviéndose como cualquier otro motor térmico, como los que se utilizan en los automóviles que queman gasolina. Sin embargo, el Stirling tiene una característica peculiar, y es que se trata de un motor de combustión externa. Quiere decir que la cámara de combustión está fuera de los cilindros, lo que permite cierta versatilidad en la fuente que se utilice como combustible.

De hecho, existe todo un mundo de dispositivos y prototipos de motores Stirling, muchos de ellos disponibles en internet, ya que las características peculiares de estos motores, ha despertado el interés de investigadores y diseñadores de todo el mundo.

En el caso de los sistemas solares de concentración, el “combustible que se quema es el Sol”. Quiere decir que el concentrador que antes hemos explicado, concentra la radiación en el absorbedor, siendo éste el foco caliente del ciclo.

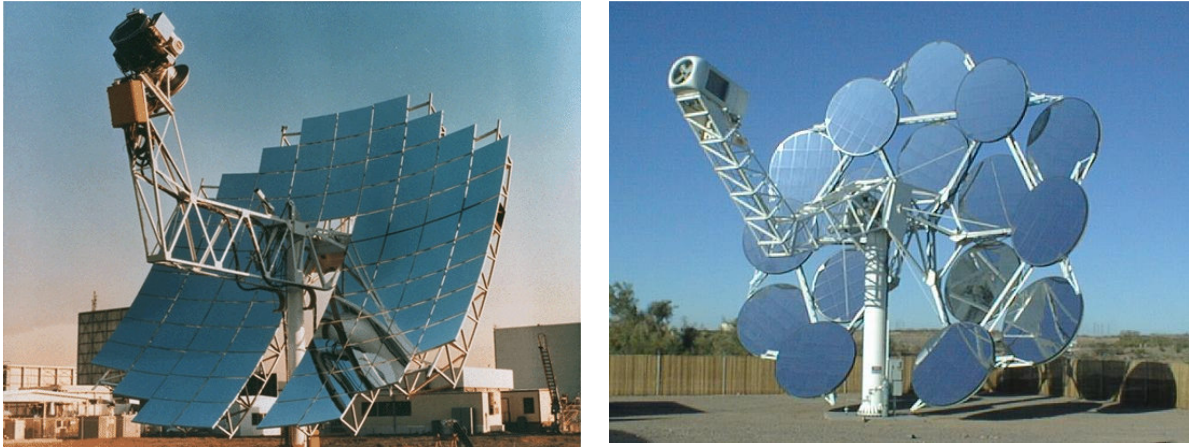


Figura 3-1. Fotografías de dos prototipos de concentradores solares con motor Stirling,

### 3.2 Disco parabólico Stirling de la ETSI

En enero de 2004 se instaló en la Escuela de Ingenieros de Sevilla (ETSI) un disco parabólico con motor Stirling a raíz de un proyecto de investigación donde participaba el Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (en adelante GTER).

#### 3.2.1 Descripción de la instalación

En la Figura 3-2 puede verse un esquema del sistema de disco parabólico con motor Stirling con todos sus componentes señalizados.

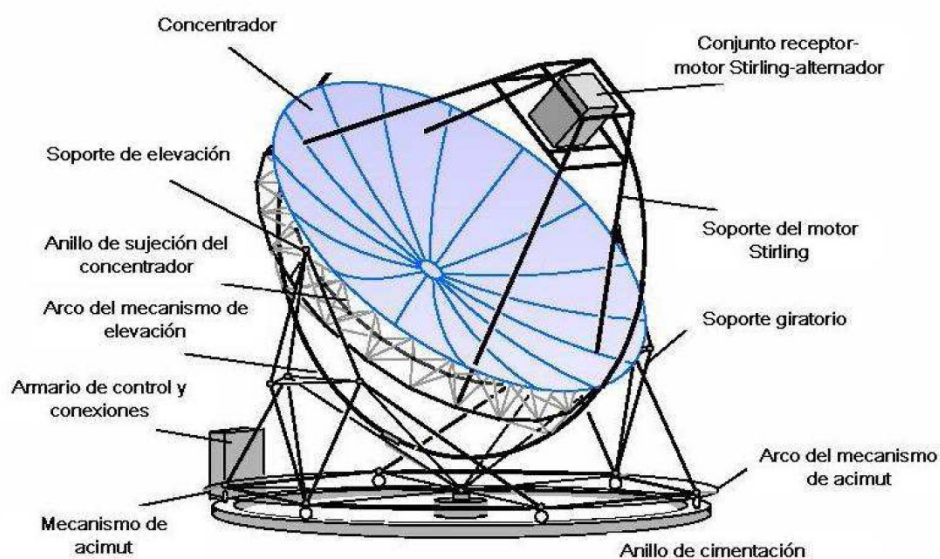


Figura 3-2. Esquema del disco parabólico Stirling de la Escuela de Ingenieros de Sevilla.

La instalación consta de los siguientes elementos:

### El concentrador solar

Está formado por doce segmentos simples, fabricados en resina de fibra de vidrio y que se acoplan entre sí formando una superficie continua. En el borde del concentrador hay un anillo estructural que sostiene la estructura del motor y alternador. Sobre la cara encargada de reflejar la radiación solar, tiene colocadas láminas especulares de 0,8mm de espesor, que están diseñadas para mantener una reflectividad del 94%.



**Figura 3-3. Fotografía de un segmento del concentrador (izquierda) y del concentrador completo (derecha)**

Algunos de los parámetros del concentrador de la ETSI se muestran en la tabla siguiente:

Diámetro	8.5 m
Área	56.7m <sup>2</sup>
Longitud del foco	4.5m
Razón de concentración media	2500
Reflectividad	94%
Múltiplo solar	1.28

**Tabla 3-1. Características del concentrador.**

### Sistema de seguimiento

El sistema de seguimiento es en dos ejes: azimut y elevación, para estar constantemente orientado al Sol, ya que la radiación que es capaz de aprovechar el disco es la radiación directa normal. El movimiento se realiza por medio de dos arcos guía con un servomotor cada uno, caja de velocidades y cadenas de tracción, que se mueven conforme a la posición del Sol que predice el sistema de control.

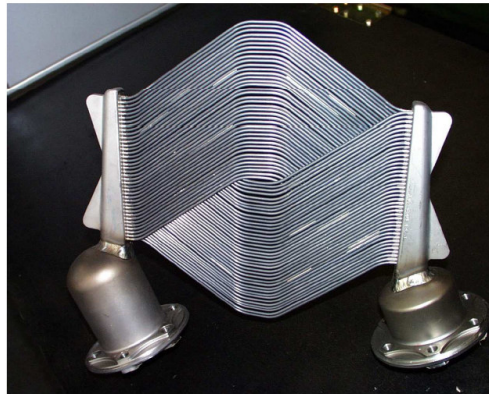


**Figura 3-4. Fotografía de los arcos en movimiento (izquierda) y de un servomotor (derecha).**

Además de los movimientos que se producen en el normal funcionamiento del concentrador, la instalación cuenta con un motor que funciona con unas baterías y que permite orientar hacia el suelo el concentrador en casos de emergencia.

### **Recibidor**

Dentro del motor circula un fluido de trabajo, que en nuestro caso es el hidrógeno. El recibidor está formado por numerosos delgados conductos por los que pasa este fluido de trabajo, de manera que la radiación concentrada calienta a través de las paredes de estos conductos el fluido de trabajo que circula en su interior.



**Figura 3-5. Fotografía del recibidor solar**

### **Conjunto motor Stirling y alternador**

El motor Stirling de la instalación de la ETSI está formado por dos cilindros (de compresión y expansión) conectados en uve, con sendos pistones conectados al eje. Por dentro de los cilindros circula el gas de trabajo, en este caso el hidrógeno.

El esquema de funcionamiento puede verse en la Figura 3-6. El gas de trabajo se calienta debido a la radiación solar concentrada en el recibidor. Cuando se calienta,

el gas se expande y transmite trabajo mecánico al cigüeñal por medio de los pistones. El gas caliente pasa a través del regenerador, que es un dispositivo capaz de conservar el calor que lleva el gas, hacia el cilindro de compresión, que es lado frío. El sistema refrigerante (enfriamiento) reduce aún más la temperatura del gas de trabajo en el área fría. Cuando el gas es devuelto al área caliente, pasa a través del enfriador y el regenerador reabsorbiendo el calor previamente liberado. Este paso por el regenerador es el que permite que el rendimiento del ciclo pueda ser alto. En la figura puede verse los diagramas del ciclo termodinámico Stirling.

La cantidad de hidrógeno que circule por el sistema se regula en función de la radiación solar, es decir, si hay mayor radiación solar, hay más temperatura y se requiere mayor cantidad de fluido de trabajo para evacuar el calor generado. El gas se conserva en una botella conectada al sistema por una válvula que va regulando la cantidad de hidrógeno que pasa hacia el motor en función de la cantidad de radiación solar de ese momento.

El foco frío del ciclo es un intercambiador de calor refrigerado por agua.

La caja del motor Stirling tiene integrado el alternador, de manera que la salida del motor es directamente electricidad que puede ser vertida a la red de distribución.

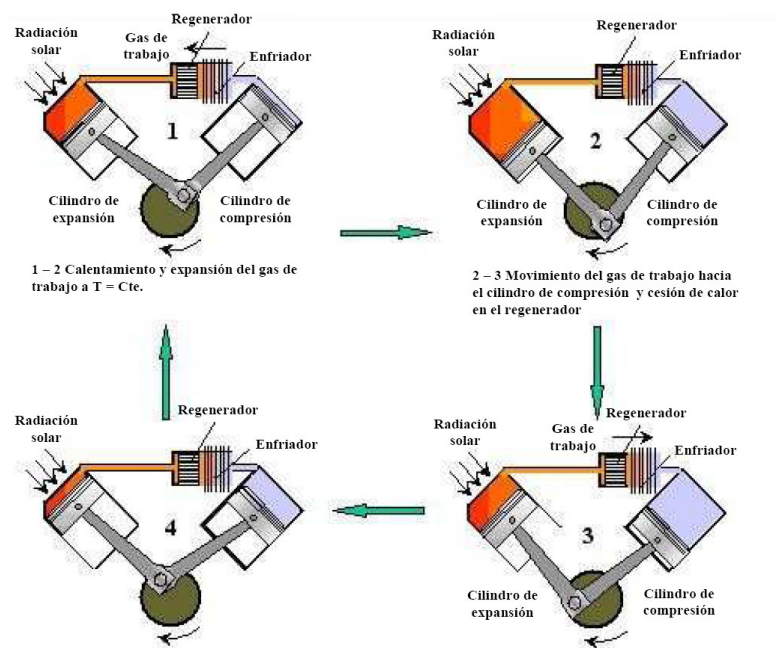


Figura 3-6. Esquema de funcionamiento del motor Stirling.

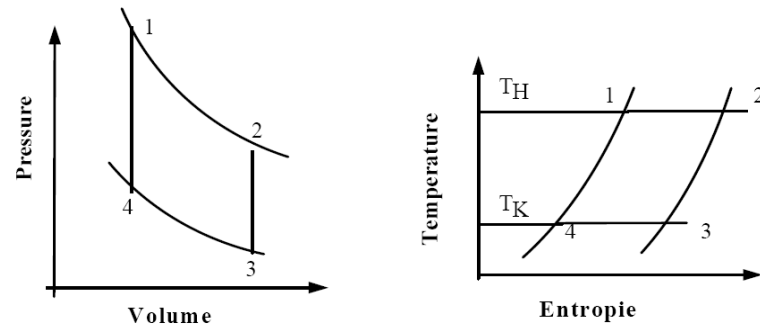


Figura 3-7. Diagrama Presión-Volumen (izquierda) y Temperatura-Entropía (derecha) del ciclo termodinámico Stirling

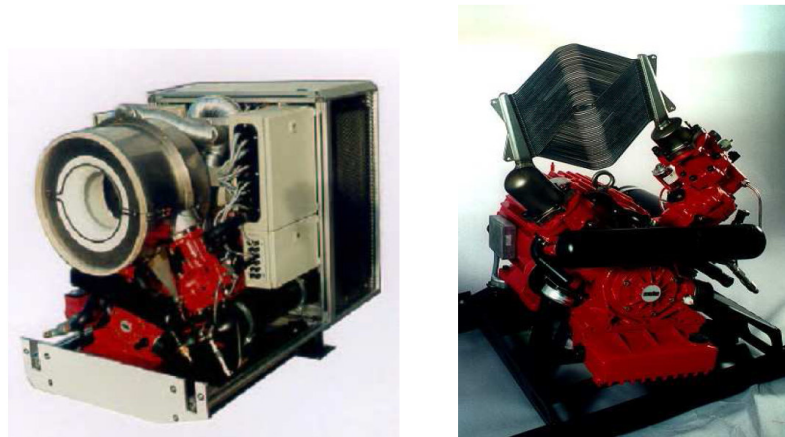


Figura 3-8. Fotografía de la caja del motor Stirling con alternador (izquierda) y de la conexión entre los cilindros y el recibidor (derecha)

Tipo motor	Dos cilindros en V a 90°.
Cilindrada:	160cm <sup>3</sup> .
Peso:	430kg.
Gas de trabajo:	Hidrógeno.
Presión de trabajo:	20-150 bar.
Potencia eléctrica bruta máxima:	9.8 kW
Velocidad nominal:	1500 rpm
Conexión eléctrica:	400 V, 50 Hz, 3 fases

Tabla 3-2. Características del motor Stirling.

### Sistema de control

A estos dispositivos hay que añadir el sistema de control, que consta de los siguientes elementos:

- controlador del motor, incluido en la propia cada de motor
- armario de control junto al disco, donde se registran todas las variables
- cables de comunicaciones, que conectan el armario de control con un ordenador desde el que se puede operar el disco
- cámara de vídeo, instalada por motivos de seguridad, que se visualiza en un monitor junto al ordenador desde el que se opera el disco.

El sistema de control registra las mediciones de numerosas variables y las guarda diariamente en una base de datos Access.

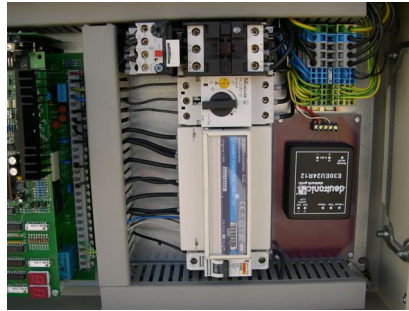


Figura 3-9. Detalle del armario de control de la instalación.

### 3.2.2 Descripción del funcionamiento

Para arrancar, el motor requiere de una radiación mínima, que en el caso de la instalación de la ETSI está fijada en 220 W/m<sup>2</sup>. Este valor se refiere a la componente de la radiación directa normal, que es la que el disco es capaz de aprovechar. En el caso de que no hubiese radiación solar y el motor siguiera funcionando, sería equivalente a quitar el foco caliente del funcionamiento anteriormente descrito. De esta forma, el motor, al seguir moviéndose, estaría enfriándose en lugar de calentándose.

La medida de la radiación mínima requerida para el funcionamiento del disco se realiza desde la estación metereológica con un pirheliómetro dedicado exclusivamente a eso. Sin embargo, cuando el disco ya está en posición de seguimiento solar y el motor arrancado, la radiación solar que determina la carga de hidrógeno que circula por el motor, se mide a través de una célula fotovoltaica situada en la caja del motor. De esta manera, al medir la radiación solar en la ubicación exacta del disco, se controlan apropiadamente las condiciones climáticas, como nubes puntuales, que pudieran afectar a la cantidad de radiación solar que le llega al receptor.

El concentrador refleja la radiación incidente en el receptor, alcanzándose temperaturas de 800°C. si se alcanza demasiada temperatura arranca un ventilador que trata de evacuar calor. Se trata de un funcionamiento necesario por seguridad de

los materiales, pero se puede decir que son directamente pérdidas, ya que se trata de energía recibida que no somos capaces de canalizar en trabajo, y que simplemente la evacuamos a través de un ventilador para evitar que se sobrecaliente el receptor.

El sistema de seguimiento tiene varias posiciones posibles, siendo de ellas las más utilizadas, la de seguimiento solar (orientado hacia la irradiación directa normal), la del disco desorientado (porque temporalmente no hay radiación suficiente y no se orienta durante ese periodo hacia el sol) y la de reposo, en la que el concentrador permanece de cara al suelo (no hay radiación suficiente o se están realizando algunas revisiones de mantenimiento). Además, existe una posición especial para los días de lluvia, en la que el concentrador se orienta al Norte y con una elevación que permite al agua de lluvia limpiar la superficie del mismo.

La instalación está preparada para funcionar de forma autónoma sin necesidad de que una persona esté controlando su funcionamiento diario. Sin embargo determinadas operaciones de mantenimiento, son necesarias:

**Recarga de hidrógeno:** el fluido de trabajo que circula por dentro del motor en el caso del disco de la ETSI es hidrógeno. Se trata de un circuito cerrado pero que en el normal funcionamiento del disco, bien por fugas o bien por dispositivos de seguridad, va perdiendo presión. De esta forma, hay que recargar la cantidad de hidrógeno periódicamente. La duración de una recarga es de una hora, y la periodicidad cada 10 días aproximadamente.

**Limpieza del concentrador:** no existe un dispositivo que limpie de forma automática el concentrador parabólico, pero verdaderamente la suciedad acumulada sobre los espejos influye bastante en el rendimiento del motor. En el caso de la ETSI, el disco se ha limpiado con la lluvia, en una posición especial que tiene preconfigurada el sistema, y también se han realizado algunas limpiezas manuales cuando la suciedad acumulada era demasiada.

**Revisión de los niveles de aceite y de líquido refrigerante.** Esta operación requiere de una periodicidad muy baja y está preparada con visores accesibles que permiten controlar estos niveles fácilmente.

**Seguimiento del sistema de control:** en el laboratorio desde el que se controla el funcionamiento del disco, hay instalado un ordenador que a través de cables de comunicaciones está conectado con el cuadro de control del disco y permite además visualizar las mediciones en tiempo real. Como se ha descrito antes, además del ordenador desde el que se pueden ejecutar órdenes al disco, (como que entre en modo de seguimiento solar o que al día siguiente funcione de forma autónoma), también existe una monitor que permanentemente muestra las imágenes que registra la cámara de vídeo que está instalada, por motivos de seguridad, enfocando al disco.



De esta forma se tiene desde el laboratorio la visión directa de lo que está ocurriendo y las mediciones que se están produciendo. En este sistema de control está preparado para funcionar de forma autónoma, pero tiene diferentes parámetros que pueden ser regulados, como son:

-velocidad del viento máxima: en el caso de la instalación de Sevilla no se consideró necesario esta precaución porque el disco estaba preparado para soportar las máximas cargas de viento que se producen en esta ubicación. Sin embargo, para otros emplazamientos puede ser necesario prever los límites de viento que por seguridad admite el normal funcionamiento el disco.

-la radiación mínima: se puede seleccionar la radiación que hace falta que se detecte en el ambiente para arrancar el motor.

-tiempos de transitorio: el disco está preparado para no parar si el tiempo que está nublado es muy pequeño. Es decir, es el caso por ejemplo de un día claro, donde de pronto pasa una nube pasajera que temporalmente oculta la radiación directa normal. Se puede determinar el tiempo que permitimos que esa nube nos oculte la radiación sin parar el motor, para que no pierda inercia, y en cuanto que la nube pase, el disco ya esté produciendo electricidad. Cabe recordar aquí que si se elimina el foco caliente en el motor, éste al girar tiende a enfriarse cada vez más, por lo que ese tiempo que escojamos de transitorio debe ser pequeño, para que el receptor no llegue a temperaturas que por frías puedan ser peligrosas.

-temperatura máxima en el receptor: el funcionamiento del ventilador, que como ya se ha explicado anteriormente sirve para refrigerar el receptor, puede regularse a través de la temperatura máxima que se permita que alcance el receptor. En el caso de la instalación de la ETSI, el límite superior son 800°C y el límite inferior -50°C.

-constante de carga de hidrógeno: la cantidad de hidrógeno que se introduzca en el motor depende directamente de la radiación directa normal que haya en ese momento. Sin embargo, el sistema de control también tiene un ajuste a través de una constante para regular que dicha cantidad de hidrógeno sea siempre la óptima. Esta constante no requiere ser modificada con frecuencia, pero si se decide hacerlo, su modificación puede favorecer el rendimiento del disco. Esta constante depende del tiempo que haya transcurrido desde la última recarga de hidrógeno, pero sobretodo depende de la limpieza del disco, ya que cuando el disco se encuentre muy limpio, el flujo incidente en el receptor será mayor y requerirá mayor cantidad de hidrógeno dentro del motor.

### 3.2.3 Errores encontrados en el funcionamiento

Aunque se trate de peculiaridades de la instalación del disco Stirling de la ETSI de Sevilla, se ha considerado interesante incluir algunos comentarios a los errores más comunes que se han producido, para que se intenten evitar para nuevos diseños.

**Fallos en el sistema de control:** en numerosas ocasiones se ha detectado un problema en las comunicaciones entre la instalación y el puesto de operación donde está el ordenador desde el que se ejecutan las órdenes sobre el disco. Por motivos de seguridad, si estas comunicaciones fallan el concentrador inmediatamente gira hasta colocarse mirando al suelo, para evitar que el disco pueda estar funcionando sin que se controle apropiadamente. Al encontrarse la instalación bastante alejada del puesto de operación, el recorrido que hacen los cables de comunicaciones es bastante largo y además colindante con laboratorios de otros departamentos donde existen máquinas o dispositivos que pueden generar interferencias en el sistema de control del disco-Stirling. Para nuevos diseños o como posible mejora del disco de la ETSI, habría que idear recorridos más cortos de los cables de comunicaciones o que éstos fueran más aislados de posibles influencias exteriores.

**Placa controlador del motor estropeada:** del mismo modo, en más de una ocasión se han detectado pérdidas de continuidad en la placa del controlador del motor. Estos problemas en la placa, se ha detectado que han podido ser debidos a una falta de estanqueidad en el armario donde se encuentra, por lo que habría que intentar utilizar índices de protección IP más altos.

**Rotura protección cerámica:** toda la superficie que rodea a la cavidad del receptor, está recubierta por una protección cerámica que es capaz de soportar muy altas temperaturas. Sin embargo, esta capa ha sufrido diferentes roturas, siendo finalmente remplazada por una nueva.



**Figura 3-10. Fotografía de la primera rotura producida en la protección cerámica del motor.**

Esto no es más que otra prueba del desbordamiento del flujo incidente que se tiene y que es, en realidad, energía que el motor no es capaz de recibir y transformar.

**Otros fallos:** en el armario de control de la instalación, se encuentra un controlador para cada uno de los servomotores y uno de ellos se estropeó sin aparente justificación y tuvo que ser remplazado. Otro de los fallos ocurridos, es que uno de los espejos presentó un día una pequeña grieta, y aunque se desconoce el motivo, puede ser por la colisión con algún pájaro o por las tensiones térmicas o mecánicas a las que está sometido.