Capítulo 2: Introducción a los STC

En este capítulo se presentan, a modo de introducción, los Sistemas Termosolares de Concentración particularizando para la tecnología de disco parabólico y dentro de ésta, para el sistema ubicado en la ESI – Sevilla. Tan importante como el desarrollo de herramientas informáticas que faciliten su estudio, es entender el propio funcionamiento del sistema, condición imprescindible para el desarrollo de propuestas reales orientadas a su posible mejora.

2.1. Sistemas Termosolares de Concentración (STC)

2.1.1. Introducción

Desde un punto de vista constructivo, se denominan así a todos aquellos sistemas que, empleando distintas tecnologías, tratan de convertir la componente directa de la radiación solar en otro tipo de energía, apta para ser consumida de inmediato o para su almacenamiento, usando para ello dispositivos de concentración.

Existen fundamentalmente tres tipos de STC: los sistemas de colectores cilindro – parabólicos (CCP), los sistemas de receptor central (CRS) y los sistemas de disco – parabólico (DP). El primero de ellos concentra la radiación solar en un eje (dos dimensiones) mientras que los dos últimos lo hacen en un punto (tres dimensiones), alcanzando por ello mayores relaciones de concentración.

Las aplicaciones de los STCS pueden englobarse en 3 grandes apartados:

- Aplicaciones energéticas, fundamentalmente la generación de electricidad, producción de calor para procesos industriales o la combinación de ambas, dando lugar a los sistemas de cogeneración.
- Aplicaciones de química solar, orientadas a la *solarización* de reacciones químicas endotérmicas que permitan la conversión de la energía radiante en energía química (almacenamiento químico). Entre estas reacciones pueden citarse el reformado solar del gas natural o la obtención de hidrógeno solar mediante procesos de electrolisis a alta temperatura, disociación térmica de vapor u otros procedimientos termoquímicos.
- Otras aplicaciones, como la desalación de agua, la destoxificación de efluentes industriales o agrícolas, el tratamiento o la síntesis de materiales, etc.

2.1.2. Concentración de la radiación solar

Los STC se caracterizan por el uso de concentradores. Un concentrador es un dispositivo capaz de captar la radiación solar incidente sobre una superficie (superficie de captación, A_C) y concentrarla sobre otra superficie de menor tamaño (superficie absorbedora o absorbedor, A_{ABS}) . Se denomina razón de concentración geométrica (C_g) al cociente entre las áreas de ambas superficies. Los STC permiten un aprovechamiento más eficiente de la energía solar que los sistemas no concentradores. Debido a ello, son cada vez más frecuentes, especialmente en zonas desérticas en las proximidades de los trópicos donde los niveles de radiación solar media anual son elevados, las denominadas Centrales Energéticas Termosolares (CETS), centrales basadas en STC y destinadas a la producción de energía eléctrica y vapor de procesos. En general, puede

decirse que los STC son los sistemas de mayor potencial de contribución a la satisfacción de la demanda energética en comparación con otros sistemas de aprovechamiento de energías renovables.

Un modelo simple de STC sería el mostrado en la **Figura 1**

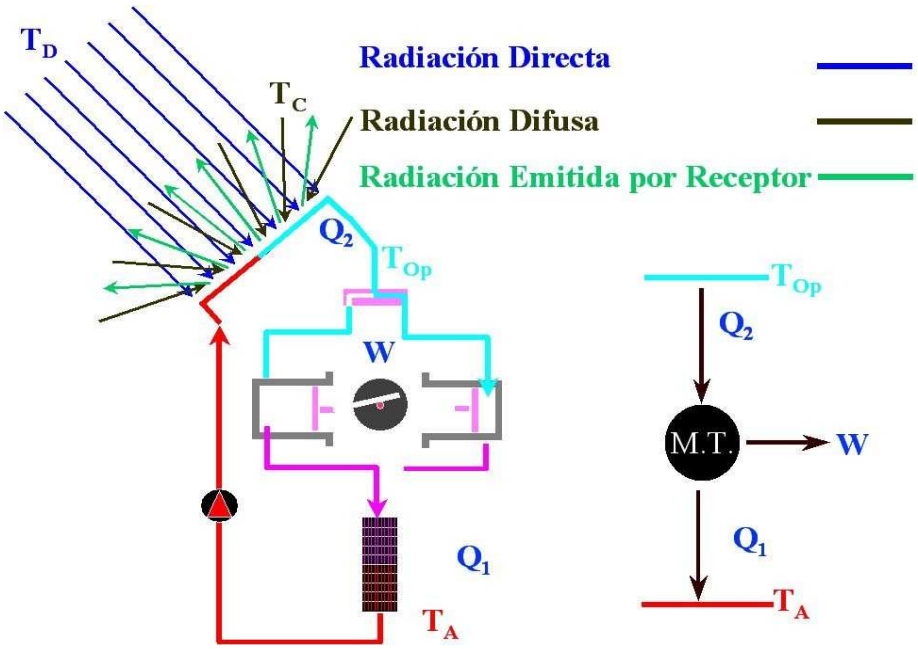

Figura 1: Modelo simplificado de un STC

Por el *Segundo Principio de la Termodinámica* el rendimiento de la máquina térmica asociada al sistema termosolar está directamente relacionado con el valor de la temperatura de operación, en el esquema T_{Op} (temperatura del foco caliente), que a su vez viene determinada por la temperatura del foco receptor o temperatura de captación.

Sin embargo, las perdidas radiantes en el receptor son proporcionales a la cuarta potencia de la diferencia de temperaturas entre éste y sus alrededores por lo que su rendimiento disminuirá con ésta. Estas pérdidas son, además, proporcionales al área de la superficie absorbedora, que puede reducirse si se aumenta la razón de concentración.

Por todo ello, para una misma temperatura de operación, el rendimiento será mayor cuanto mayor sea la razón de concentración. El rendimiento del sistema en su conjunto será el producto de los rendimientos de la máquina térmica y del receptor, por lo que, dada una máquina térmica, para cada razón de concentración existirá un temperatura de operación óptima. A medida que se aumenta la razón de concentración, mayor será la temperatura de operación óptima. Véase **Figura 2.**

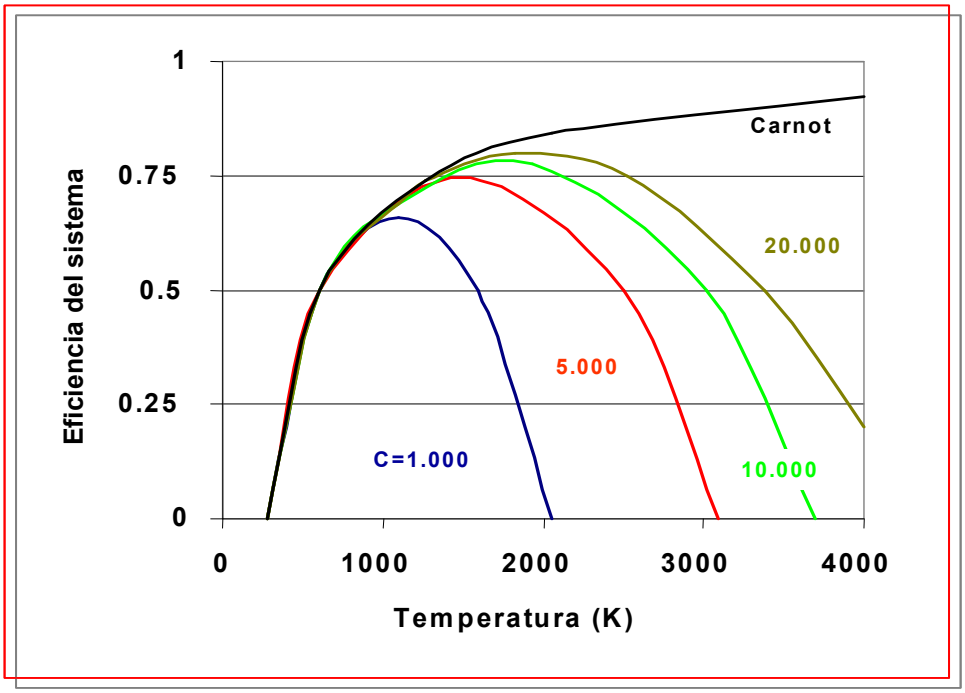

Figura 2: Rendimiento energético de un sistema termosolar en función de la temperatura de operación, tomando como parámetro la razón de concentración

La razón de concentración máxima que puede obtenerse depende de la distribución angular de la radiación. En el caso de un haz de rayos perfectamente paralelos, no existe límite a la razón de concentración teórica, ya que si el eje óptico del concentrador (un paraboloide de revolución) es paralelo a la dirección del haz, todos los rayos reflejados pasarán por su punto focal, con lo que el área del receptor puede

hacerse tan pequeña como se desee. En el otro extremo, no es posible concentrar la radiación isótropa.

La radiación solar es un caso intermedio, ya que el Sol no es una fuente luminosa puntual. Visto desde la superficie de la Tierra, el disco solar subtiende un ángulo sólido de 6.08 sr, lo que corresponde a una semiángulo de apertura, θ_S, de $4{,}653 \cdot 10^{-3}$ rad (16' de arco). Por tanto, la radiación solar directa sobre la superficie terrestre no está formada por rayos perfectamente paralelos entre sí, sino que se distribuyen sobre un cono de direcciones de semiángulo θ_S alrededor de la línea que une el punto de observación con el centro del disco solar. Así, no todos los rayos de ese cono alcanzarán un receptor de tamaño arbitrariamente pequeño (**Figura 3**).

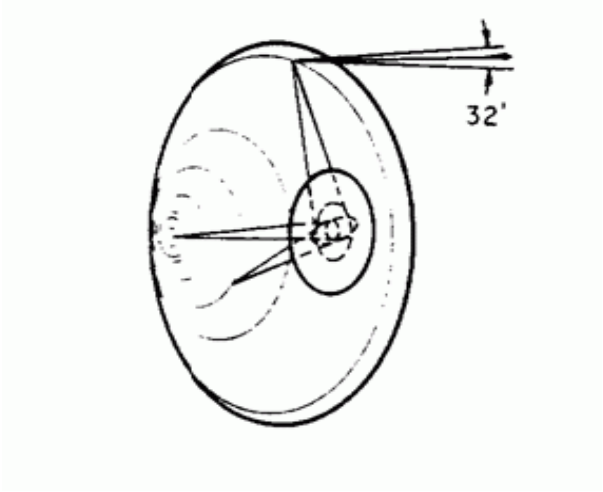

Figura 3: Cono de direcciones procedentes del disco solar y reflejado en el receptor

Existe un valor límite para la razón de concentración de la radiación solar, $C_{máx,3D}$, dado por:

$$C_{\max,3D} = \frac{1}{sen^2(\theta_s)}$$

Para el caso de un sistema concentrador en dos dimensiones (concentradores de foco lineal), este valor límite viene dado por:

$$C_{\max,2D} = \frac{1}{sen(\theta_s)}$$

Por tanto, los valores límite de la razón de concentración para sistemas concentradores en 3 dimensiones (foco puntual) y 2 dimensiones (foco lineal) son, respectivamente:

$C_{máx,3D} = 46189$

$C_{máx,2D} = 215$

2.1.3. Los STC para la generación de energía eléctrica: Centrales Energéticas Termosolares (CETS)

De forma genérica, los Sistemas Termosolares de Concentración (STC) son sistemas de aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura mediante la concentración de la radiación directa. La aplicación más común, hoy por hoy, de los STC es la generación de electricidad a partir de la energía solar. Estos sistemas de generación se denominan Centrales Energéticas Termosolares (CETS).

Conceptualmente, una CETS se compone de un **sistema colector**, un **sistema receptor** y un **sistema de conversión de potencia**, pudiendo además incluir un **sistema de almacenamiento térmico** y un **sistema de combustible fósil** (**Figura 4**).

La función del sistema colector es captar y concentrar la radiación solar sobre el receptor, donde la energía radiante se convierte en energía térmica (normalmente, en forma de aumento de entalpía de un fluido) que, finalmente, se convierte en otra forma de energía apta su utilización (por ejemplo, energía eléctrica) en el sistema de conversión de potencia. La existencia de almacenamiento térmico permite operar la CETS en períodos de ausencia de radiación solar. Entre estos cuatro componentes, los dos primeros (colector y receptor) son específicos de una CETS, constituyendo lo que frecuentemente se denomina campo solar, mientras que los sistemas de conversión de potencia y almacenamiento pueden considerarse convencionales.

La radiación solar en una CETS puede complementarse con el aporte energético de un combustible fósil, dando lugar a las centrales conocidas como *híbridas*. El grado

de hibridación puede ser muy variable: desde plantas que sólo recurren al combustible fósil para eliminar o reducir al mínimo imprescindible el almacenamiento térmico y cuya función principal es absorber los transitorios producidos por variaciones más o menos bruscas de la radiación solar y garantizar la producción de acuerdo con la estrategia de operación establecida, hasta ciclos combinados convencionales apoyados por energía solar, en los que el aporte de esta última fuente energética está entre el 10% y el 20% de la producción.

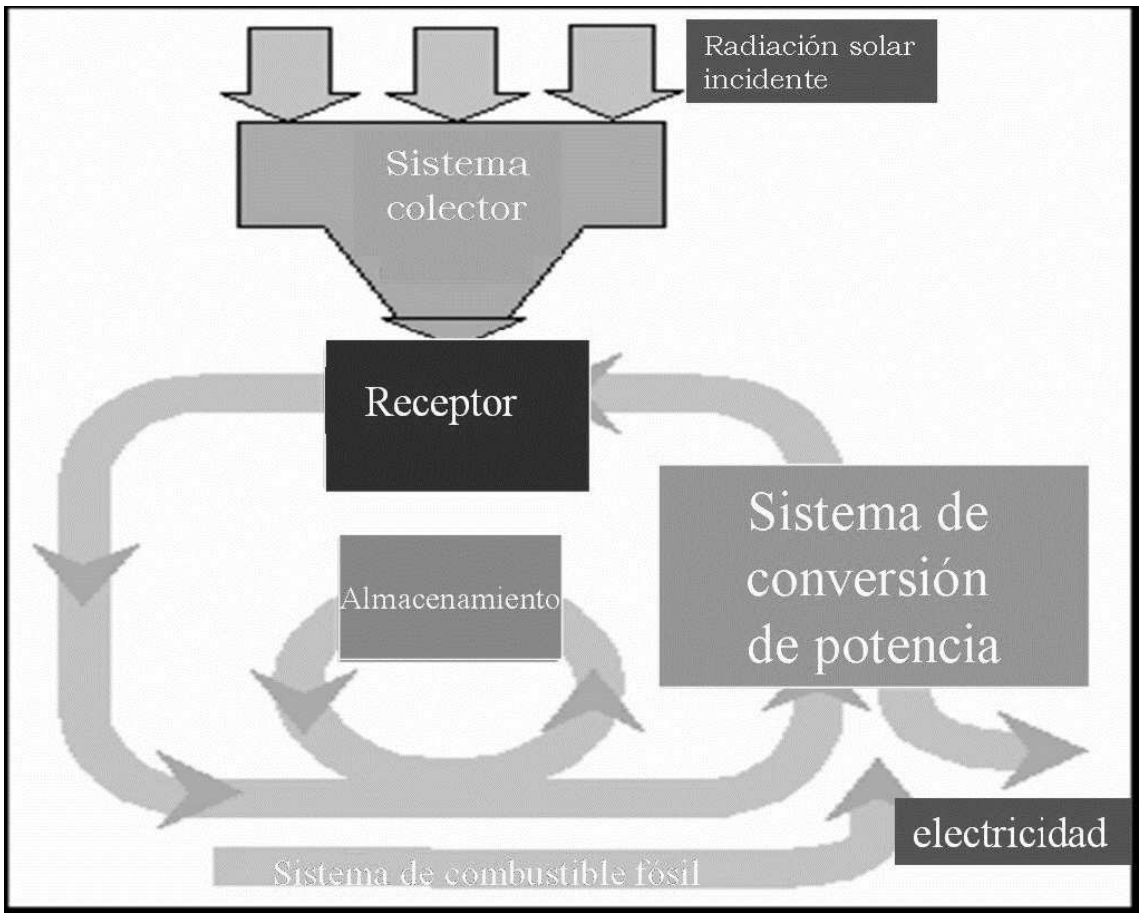

Figura 4: Esquema general de una Central Energética Termosolar (CETS)

Como ya se apuntó al principio de este capítulo, desde el punto de vista tecnológico, y atendiendo a las características de la parte solar, existen diversas opciones de CETS, entre las que las principales son:

- Sistemas de colectores cilindro parabólicos
- Discos parabólicos o, más propiamente, paraboloides de revolución,
- Sistemas de receptor central, a veces impropiamente denominados centrales de torre.

El grado de desarrollo de las distintas opciones de CETS es diverso. Mientras que los sistemas de colectores cilindro parabólicos se encuentran en una etapa cercana a la madurez, gracias principalmente al impulso conseguido con las plantas SEGS en el desierto de Mojave (California, USA), tanto los sistemas de receptor central como los de paraboloides de revolución se encuentran aún lejos de su viabilidad comercial, no habiendo superado claramente la etapa de demostración tecnológica. Sin embargo, estas dos opciones presentan el atractivo de su capacidad para la obtención de altas temperaturas y, por tanto, de su integración con ciclos de alto rendimiento. Además, presentan un gran potencial de reducción de costes.

Las tres tecnologías son adecuadas para la implementación tanto de sistemas "sólo solares" (la radiación solar es la única fuente energética), como de sistemas híbridos (la radiación solar se complementa con, o complementa a, otra fuente energética, como pueden ser combustibles fósiles o biomasa). Esta capacidad de integración proporciona un camino viable de transición desde las plantas actuales que sólo emplean combustibles fósiles hasta plantas futuras cuya única fuente energética sea la radiación solar.

Dado el objeto del presente proyecto, se hará especial hincapié en la tecnología de disco parabólico. Para más información acerca de las sistemas de colectores cilindro parabólicos y los sistemas de receptor central consúltese *Silva Pérez M. A. (2006). Sistemas termosolares de concentración. Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos - Universidad de Sevilla.*

2.2. STC de disco parabólico

Los sistemas de disco parabólico (DP), se componen básicamente de un reflector (o un conjunto de reflectores) con forma de paraboloide de revolución, un receptor situado en el foco de dicho paraboloide y un sistema de generación eléctrica compacto (motor o turbina más alternador), que suele formar un solo bloque con el receptor.

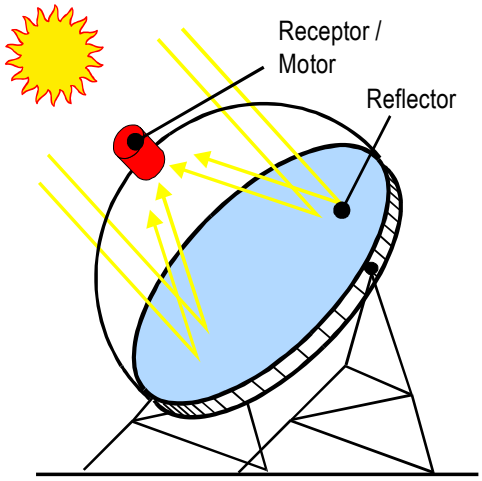

Figura 5: Esquema de un sistema de disco parabólico

La radiación solar concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, donde se convierte en energía térmica que permite generar electricidad –trabajo mecánico- en el sistema generador.

Los DP se caracterizan por un alto rendimiento, modularidad y autonomía. Actualmente se encuentran en fase de desarrollo. Un buen número de prototipos están en operación en diversos lugares del mundo, pero la aún insuficiente fiabilidad y su elevado coste constituyen los dos principales obstáculos para su introducción en el mercado de generación eléctrica.

2.2.1. Componentes principales de un DP

Los componentes de un sistema de discos parabólicos son:

- Concentrador.
- Receptor.
- Sistema de generación.
- Estructura soporte y mecanismos.

Concentrador:

La forma de la superficie reflexiva en un sistema de este tipo es la de un paraboloide de revolución. El tamaño del concentrador dependerá tanto de la potencia nominal como de la energía a generar en un periodo de tiempo para unas determinadas condiciones de radiación solar y rendimientos asociados de los elementos que constituyen el sistema. Los discos parabólicos pueden ser construidos tanto con facetas que aproximan de forma discreta a la geometría del paraboloide o con membrana tensionada de metal aproximando así de manera continua a la geometría buscada. La superficie reflexiva se consigue a base de espejos de vidrio o de películas reflectantes.

En la **Figura 6** se ilustran distintos tipos de concentradores. Nótese que los diámetros de apertura del concentrador oscilan entre los 7 m de los sistemas más antiguos y los 17 m de los desarrollos más recientes, aunque se han construido discos de tamaño mayor. Las relaciones de concentración llegan a alcanzar el valor de 3000.

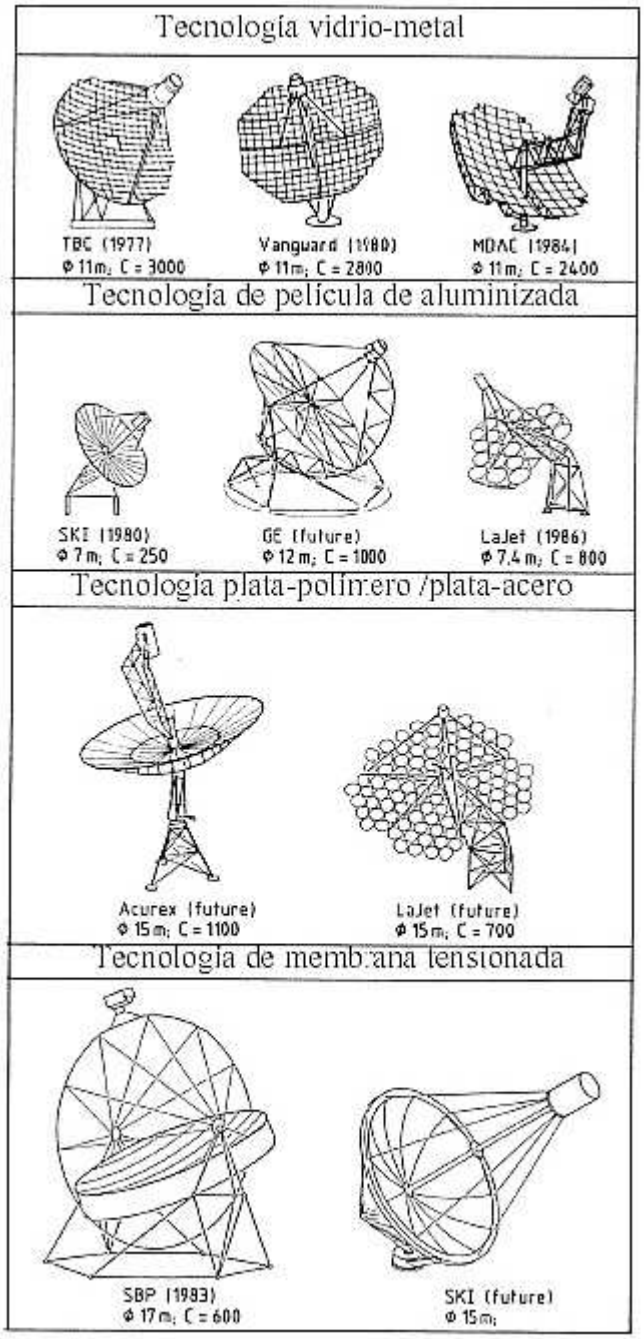

Figura 6: Sistemas de discos parabólicos con concentrador de facetas discretas (izquierda); y concentrador de membrana tensionada (derecha)

a velocidad constante.

Estructura y sistema de seguimiento:

Un sistema de disco parabólico debe disponer también de una estructura soporte y un mecanismo de seguimiento al sol en dos ejes, con objeto de seguir la posición del sol en todo momento.

Los dos tipos de montaje empleados son:

- Seguimiento en acimut - elevación, en el que el movimiento se realiza según dos ejes, vertical y horizontal.
- Seguimiento polar, en el que el movimiento en un eje es muy lento pues sólo debe seguir la variaciones estacionales del sol, y el movimiento en el otro eje es

El primer tipo de montaje es más simple desde el punto de vista constructivo mientras que el montaje polar es más fácil de controlar.

Receptor:

El receptor de un sistema de discos parabólicos tiene dos funciones fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.
- Transferir la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica asociada.

Por tanto, constituyen la interfaz entre el concentrador y la máquina térmica. Los receptores empleados en los DP son receptores de cavidad (aunque el empleo de receptores externos presenta algunas ventajas para sistemas de baja temperatura), en los que la radiación concentrada entra por una apertura (situada en el foco del paraboloide) incidiendo posteriormente sobre el absorbedor. De esta forma se consigue disminuir las pérdidas radiantes y convectivas, así como homogeneizar flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reducir su valor máximo.

Hasta la fecha se han empleado dos tipos de receptores para los sistemas de discos parabólicos:

- Receptores de tubos directamente iluminados (véase **Figura 7**), que permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling convencionales. En estos receptores el absorbedor está formado por un haz de tubos por donde circula el fluido de trabajo del motor. La radiación incide directamente sobre estos tubos y es transformada en energía térmica y transmitida al fluido de trabajo. Las altas temperaturas de trabajo de estos absorbedores (del orden de

800 ºC) dificultan el empleo de recubrimientos selectivos por el gran solape de la radiación emitida y absorbida. Un inconveniente de estos receptores es la falta de uniformidad en el flujo de radiación incidente en el absorbedor, lo cual trae como consecuencia el que la temperatura en los tubos absorbedores presente picos, limitando por tanto la máxima temperatura del fluido de trabajo para evitar sobrepasar la máxima temperatura permitida en los materiales (aparición de "puntos calientes").

- Receptores de reflujo. Este tipo de receptores emplea un fluido intermedio para la transmisión del calor, un metal líquido (normalmente sodio), mediante su evaporación en la superficie del absorbedor y su condensación en los tubos por donde circula el fluido de trabajo. Al condensar el metal líquido, por gravedad regresa a la superficie del absorbedor.

  Actualmente se tiende a emplear este último tipo de receptores, ya que conllevan las siguientes ventajas:

  - La gran capacidad de transmisión del calor de los metales líquidos (hasta 800 W/cm^2) permite desarrollar receptores más pequeños.
  - Mediante la condensación de este metal líquido se consigue un calentamiento más uniforme del fluido de trabajo, y éste se produce realmente a temperatura constante, lo que permite trabajar con temperaturas máximas del fluido de trabajo más cercanas a las máximas admisibles por los materiales.

- Permite el diseño independiente de receptor y motor, evitando los compromisos de diseño entre ambos que limitaban el rendimiento en el caso de los receptores de tubos directamente iluminados.

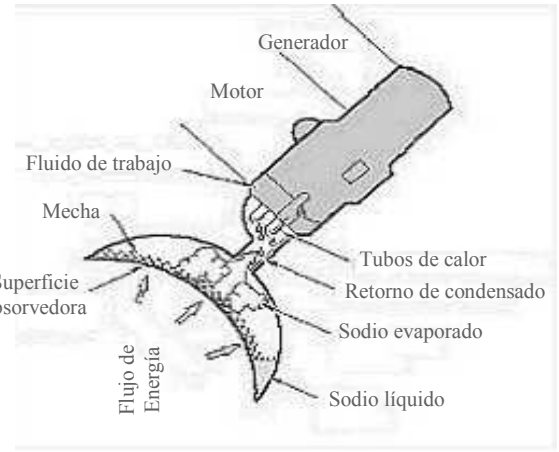

Figura 7: Receptor de tubo directamente iluminado (arriba) y esquema de receptor de reflujo de tipo tubo de calor (abajo)

- Se facilita la hibridación del sistema.

Se distinguen dos tipos de receptores de reflujo:

- Receptor tipo "pool boiler". En este caso, hay una poza de metal líquido siempre en contacto con el absorbedor y de donde va evaporándose éste para ir hacia el calentador del motor.
- Receptor tipo tubo de calor (*heat pipe*), **Figura 7**. En este caso el líquido metálico asciende por fuerzas de capilaridad por unas mechas situadas en la parte posterior del absorbedor, de donde se evapora para ir a condensar en el calentador del motor. Las gotas de metal líquido condensan aquí y por gravedad caen al absorbedor donde mojan las mechas y empiezan a

subir por capilaridad. La reserva de metal líquido dentro del receptor es en este caso mucho más pequeña.

La configuración en tubo de calor tiene la ventaja de su mayor seguridad asociada a una menor reserva de metal líquido para llevar a cabo la transmisión de calor. Por otro lado, al tener menor masa térmica presenta una respuesta más rápida a los transitorios y unas menores pérdidas térmicas durante los mismos. Además, es posible emplear este receptor para sistemas que implementen los dos tipos de seguimiento del sol comentados (acimut-elevación , polar-declinación), mientras que el "pool boiler" sólo se presta fácilmente a su integración en el seguimiento acimut- elevación. La desventaja del receptor de tubo de calor frente al "pool boiler" es la existencia de un mayor número de ciclos térmicos en motor y receptor durante días nublados, así como una mayor variación en la potencia de salida.

Actualmente también se están desarrollando receptores que permitan un funcionamiento híbrido solar / gas natural (Stirling Technology Company-USA). Estos receptores pueden aceptar independientemente o simultáneamente el calor solar o el de la combustión del gas natural, pudiendo funcionar del 100% al 25 % de la potencia nominal, y en modo solo solar, fósil o híbrido.

Sistema generador:

El sistema generador está constituido por un ciclo termodinámico de potencia o máquina térmica y el generador propiamente dicho, que transforma la energía mecánica en electricidad.

El desarrollo de los sistemas de discos parabólicos ha estado muy ligado a los motores Stirling. Las primeras aplicaciones del ciclo Stirling al aprovechamiento de la energía solar datan de 1872, siendo debidas a Ericsson.

En 1984, con un sistema de disco parabólico y un motor Stirling se consiguió el que sigue siendo el mayor rendimiento de conversión solar-eléctrico (29,4%) con un sistema de 25 kW eléctricos con hidrógeno como fluido de trabajo a 200 bar y una temperatura máxima del ciclo de 720 ºC. El rendimiento térmico del motor Stirling fue del 41%.

En la actualidad se comienza a emplear también ciclos de turbinas de gas, gracias al desarrollo de turbinas de gas de tamaño reducido y alto rendimiento.

Las potencias de estos motores o turbinas suelen oscilar entre los 5 y los 25 kW, con rendimientos entre el 30% y el 40%.

En la **Figura 8** se muestra el esquema de un sistema de disco parabólico con turbina de gas, con posibilidad de utilizar también un combustible fósil (gas natural) como complemento a la energía solar.

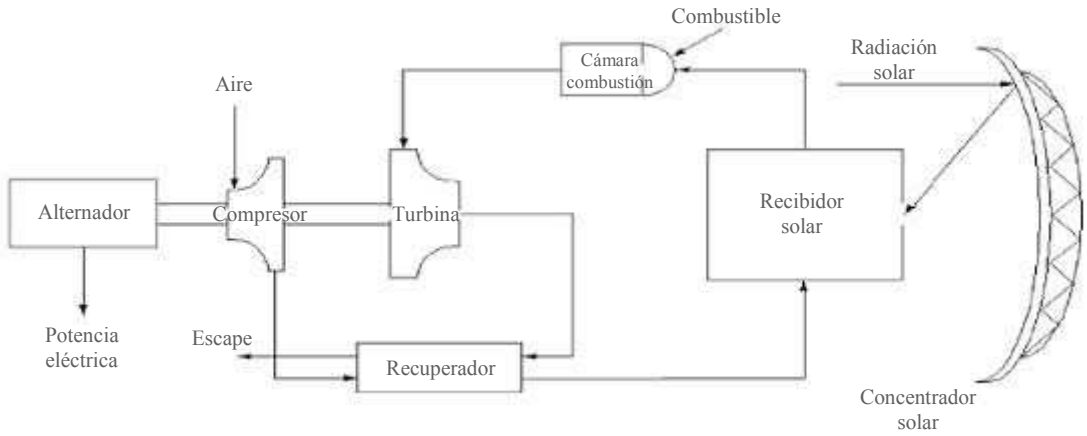

Figura 8: Esquema de un sistema disco parabólico – turbina de gas con recuperación e hibridación

2.2.2. Balance energético de un STC de disco parabólico

Los parámetros que caracterizan el concentrador son los siguientes:

- Área de apertura del concentrador, A_{pp}..
- Área de apertura del receptor, A_{rec}.
- Fracción del área de apertura no sombreada, E.
- Reflectividad de la superficie, ρ.
- Fracción de intercepción (fracción de la energía reflejada por el concentrador que entra en el receptor, alcanzando la superficie absorbedora), φ.

El receptor, así como la máquina térmica o ciclo de potencia y el generador, vienen caracterizados por sus respectivos rendimientos energéticos, definidos como cocientes entre las potencias de salida y entrada a cada uno de estos componentes.

La **Figura 9** muestra el diagrama de pérdidas y rendimientos de un STC disco parabólico, concretamente el sistema EuroDish, ejemplo del cual se encuentra instalado en las inmediaciones de la ESI – Sevilla.

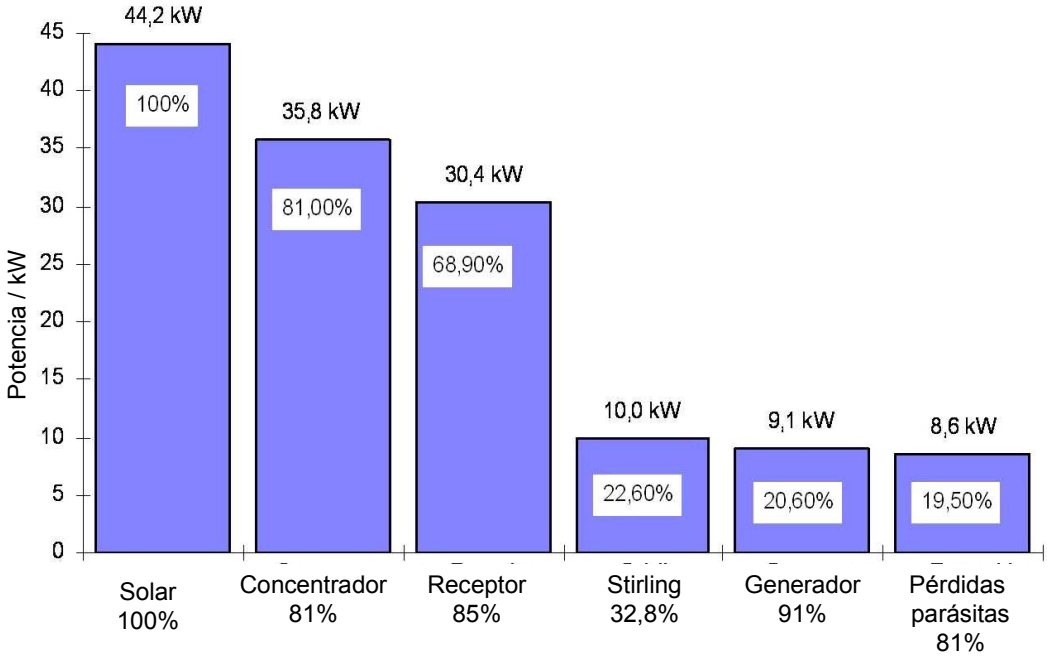

Figura 9: Diagrama de pérdidas y rendimientos en el sistema de disco parabólico EuroDish

2.2.3. Estado actual de la tecnología de disco parabólico

Hasta la fecha se han diseñado prototipos que funcionan con potencias entre 15 kWe y 50 kWe . Se encuentran instalados en centros de investigación españoles, alemanes, estadounidenses, árabes, etc. Estos sistemas, que funcionan perfectamente en estos emplazamientos, resultan en la actualidad más costosos que el resto de tecnologías para ser considerados a la hora de promover grandes plantas. Tienen sin embargo a favor el hecho de ser sistemas modulares. Como principal incertidumbre de esta tecnología para grandes plantas en la actualidad está la vida útil de los motores Stirling, que se ha de esperar en torno a las 30.000 horas a plena potencia, como resultado de la operación de una central durante 15 años, pero sometidos además a continuos arranques y paradas diarios.

Europa:

En la actualidad un consorcio Europeo en el que participa Inabensa elabora mejoras que incidan en el abaratamiento de estos sistemas con proyectos de desarrollo del prototipo Eurodish. Este prototipo incorpora un motor Stirling de la compañía alemana SOLO que ha sido diseñado específicamente para este tipo de aplicaciones solares. La empresa encargada del desarrollo del disco parabólico especular dentro de este consorcio es SBP, también de Alemania. Inabensa ha sido responsable de la fabricación y montaje del conjunto al que se acopla el motor fabricado por SOLO.

USA:

El consorcio SES en el que participa DOE, departamento norteamericano de energía, y Boeing entre otros dispone también de un prototipo Dish-Stirling de 25 kWe desarrollado.

Arabia Saudí:

Instalación de dos prototipos de 50 kW por unidad.

2.3. El proyecto EviroDish

Se trata de un proyecto llevado a cabo por el consorcio de empresas EnviroDish[1] que consiste en la instalación, puesta en marcha y operación rutinaria de varias unidades de disco parabólico de 10 kW de potencia nominal.

[1] El consorcio EnviroDish está formado por las empresas alemanas SBP (ingeniería del conjunto, diseño y fabricación del concentrador), SOLO (motor Stirling) y MERO (estructura)

El objetivo fundamental del proyecto EnviroDish es preparar la introducción en el mercado de este tipo de sistemas mediante la reducción de costes de instalación y de O&M.

Otros objetivos perseguidos son:

- Obtener experiencia sobre los procesos de instalación, operación y mantenimiento en entornos típicos para el funcionamiento real de estos sistemas.
- Servir de escaparate para el público interesado y ayudar a encontrar y a convencer a clientes futuros.
- Facilitar a los socios locales el acceso a la tecnología. Se contempla como socios potenciales a instituciones con actividad en el campo de la energía solar (compañías eléctricas, centros de investigación, universidades,…)

Los socios locales contribuyen económicamente al proyecto, preparan la infraestructura requerida y se responsabilizan de la operación y mantenimiento rutinario del sistema.

Los datos recogidos de las diferentes unidades se integran en una base de datos común, a la que tienen acceso todos los socios.

2.3.1. Contribución local al proyecto EnviroDish: proyecto DISPA - Stirling

La aportación local al proyecto EnviroDish se materializa en el proyecto DISPA – Stirling. Este proyecto se enmarca dentro de las actividades del CENTER (Centro de Nuevas Tecnologías Energéticas) en el campo del aprovechamiento de la energía solar a media y alta temperatura, y más específicamente, en la línea de profundizar en la

tecnología de disco parabólico especialmente adecuada para sistemas de generación distribuida. El proyecto DISPA – Stirling está subvencionado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía.

Además de los objetivos comunes del proyecto EnviroDish (enunciados en el apartado anterior), los objetivos del CENTER en este proyecto son:

- Ampliar las líneas de trabajo en el campo de los Sistemas Termosolares de Concentración a los sistemas de disco parabólico con motores Stirling, que integran dos tecnologías adecuadas para entornos de generación distribuida.
- Disponer de una instalación experimental para el desarrollo de las actividades de I + D en colaboración con la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

2.4. El sistema de disco parabólico de la ESI – Sevilla

El sistema de disco parabólico instalado en la ESI – Sevilla consta básicamente de los siguientes elementos:

- Concentrador solar parabólico
- Sistema de seguimiento
- Intercambiador de calor solar (recibidor)
- Conjunto Motor Stirling + alternador

El esquema del sistema se muestra en la **Figura 10.**

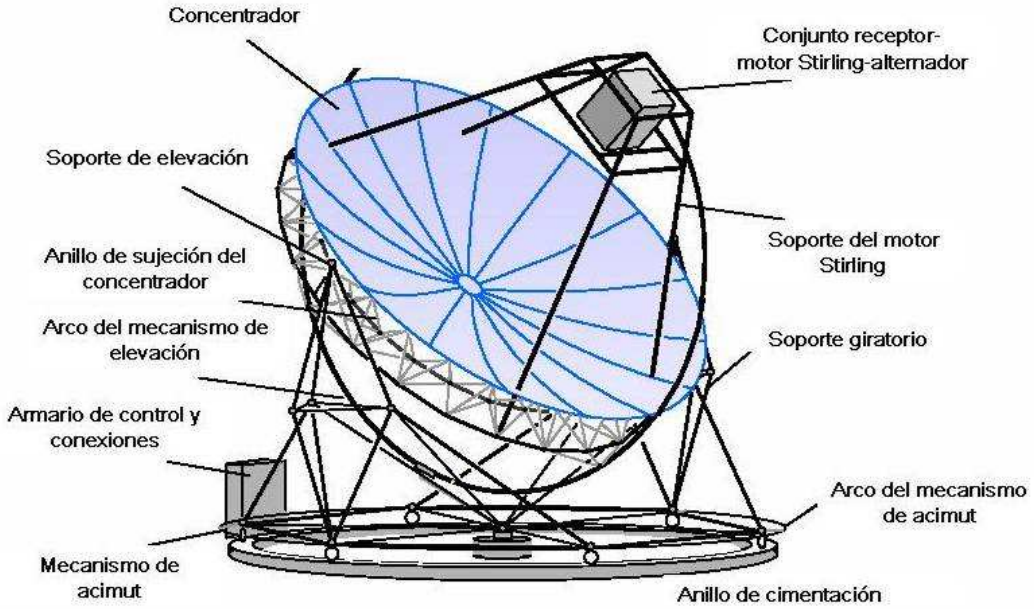

Figura 10: Esquema del sistema de disco – parabólico ubicado en las inmediaciones de la ESI - Sevilla

El concentrador refleja la radiación solar incidente en la cavidad del recibidor que está localizada en el punto focal del concentrador. La radiación solar es absorbida por el recibidor y transmitida en forma de calor al gas de trabajo del motor Stirling, en este caso hidrógeno, a temperaturas en el entorno de los 650 ºC. En el motor Stirling, parte del calor es transformado en energía mecánica que, posteriormente, se transforma en energía eléctrica vertiéndose a la red. Con el fin de mantener la incidencia de la radiación solar concentrada sobre la superficie del recibidor a lo largo del día, el sistema de seguimiento provoca el movimiento continuo del concentrador en dos ejes, acimut y elevación, para de esta forma seguir la trayectoria diaria del sol.

2.4.1. Concentrador solar parabólico

En líneas generales, el concentrador constituye el combustible del motor Stirling. Su función es la de reflejar y concentrar la radiación solar en su punto focal.

El concentrador está formado por 12 segmentos simples, fabricados con resina de fibra de vidrio, que acoplados forman una "concha" casi perfecta. El borde del concentrador está reforzado con un anillo estructural que sostiene la estructura soporte del conjunto motor Stirling + alternador. Sobre la cara frontal de cada segmento se ubican la superficies reflectoras, delgadas láminas especulares (0,8 mm. de espesor), diseñadas para mantener una reflectividad del 94 %

Figura 11: Imagen de un segmento del concentrador (izquierda) y del concentrador completo (derecha)

2.4.2. Sistema de seguimiento

En aras de mantener una perfecta orientación hacia el sol, el concentrador está montado sobre un sistema de seguimiento en dos ejes. Los movimientos de acimut y elevación se realizan por medio de dos arcos guía dotados de sendos servomotores, caja de velocidades y cadenas de tracción. La orientación del concentrador hacia el sol es

realizada por un programa de computación especial capaz de predecir la posición del sol en cada instante en cualquier día del año.

Figura 12: Imagen de los arcos de movimiento del sistema (izquierda) y de un servomotor (derecha)

2.4.3. Recibidor

El recibidor es, a grandes rasgos, el nexo de unión entre el concentrador y el motor Stirling. Tiene dos misiones fundamentales:

- Absorber la mayor cantidad posible de la radiación solar procedente del concentrador.
- Transmitir al motor Stirling la radiación solar absorbida en forma de calor con las mínimas pérdidas posibles.

Como ya se ha mencionado anteriormente, existen básicamente dos tipos de recibidores: los recibidores *"sólo solares"* que pueden operar sólo en días de sol, y los

recibidores *híbridos* que disponen adicionalmente de quemadores de gas y pueden operar cualquier día.

El recibidor de la instalación de la ESI – Sevilla es de los denominados *"sólo solares"* . Este recibidor fue diseñado para ser conectado directamente a las cabezas de los cilindros del motor Stirling. El recibidor está formado por tubos muy finos (3 mm De diámetro) que resisten muy altas temperaturas. El conjunto de estos tubos conforman una superficie casi cerrada que constituye la superficie absorbedora. El gas de trabajo, a su paso por el recibidor, llega a calentarse a temperaturas en el entorno de los 650 ºC.

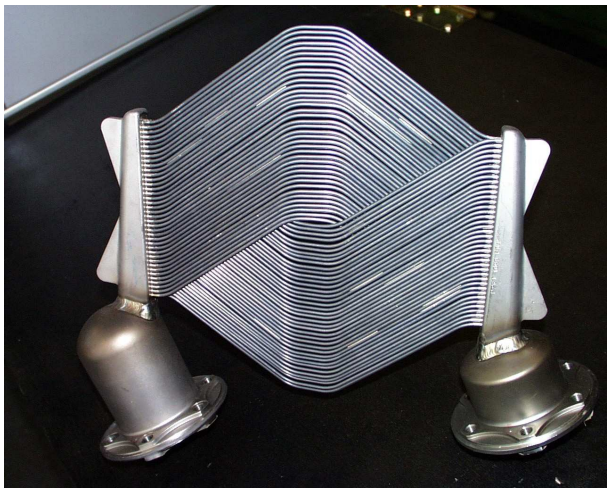

Figura 13: Imagen del recibidor solar

2.4.4. Motor Stirling

El ciclo de Stirling es el ciclo termodinámico más eficiente para la transformación de calor en energía mecánica o eléctrica. Hacia 1825, el reverendo escocés Robert Stirling inventó este motor y fue en este mismo siglo cuando alcanzó su mayor auge, llegando a contarse por miles las maquinas de este tipo que estaban en funcionamiento.

El motor Stirling posé propiedades que le confieren un carácter extraordinario:

- Comparado con el ciclo de Otto o de Diesel, ciclos de combustión interna, el ciclo de Stirling necesita aporte de calor externo, sin importar la forma de generar este calor. Esto hace del motor Stirling el candidato ideal para transformar la radiación solar en energía mecánica.
- En el motor Stirling se calienta y se enfría de manera cíclica una cantidad constante de gas de trabajo (hidrógeno en este caso). Debido a la compresión que sufre el gas cuando es calentado y a la expansión del mismo cuando es enfriado, se produce el movimiento de dos pistones conectados a un eje produciéndose de esta forma la energía mecánica.
- El rendimiento del motor Stirling será mayor cuanto mayor sea la temperatura de operación del sistema. Esto hace que este tipo de motores sean ideales para producir energía con colectores solares.
- El motor Stirling, al no realizar combustión interna, es muy silencioso.
- El ciclo de vida de los motores Stirling es extraordinariamente alto en funcionamiento continuo. Esto se debe a que no hay contaminación interna de las distintas partes de la máquina al no producirse combustión.
- El motor Stirling puede operar también con un recibidor *híbrido*. Esto hace que el calor requerido pueda también generarse con combustibles fósiles (bio – gas p.e.) garantizando así el funcionamiento del sistema incluso en periodos de baja radiación solar.

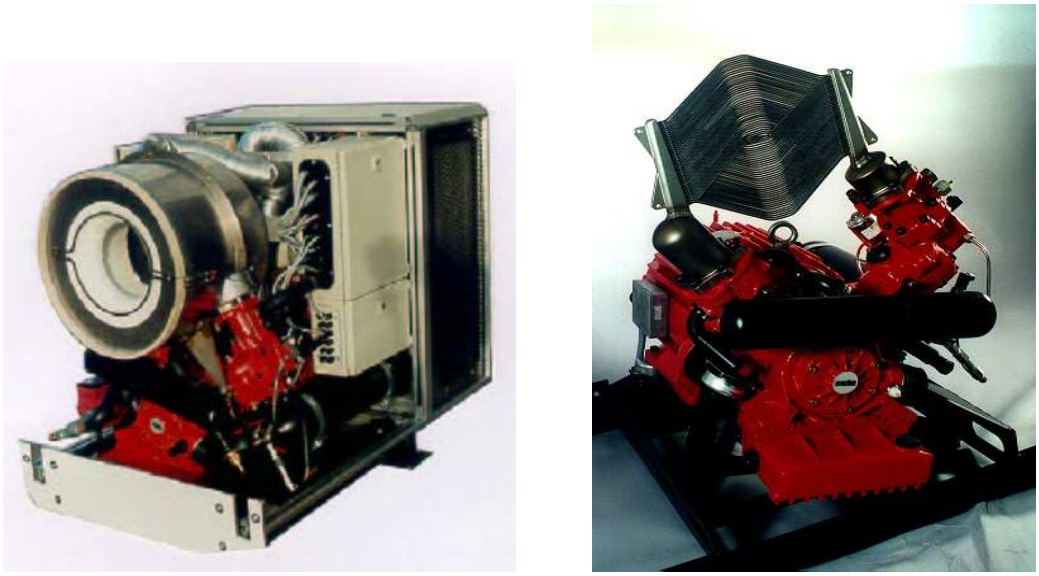

Figura 14: Imagen del conjunto motor Stirling + Alternador (derecha) y vista de la conexión del motor Stirling al recibidor (izquierda)

2.4.4.1. Funcionamiento del motor Stirling

En su versión más simple, el motor Stirling está formado por dos cilindros (de compresión y de expansión) en cuyo interior se encuentra el gas de trabajo (en este caso hidrógeno). Ambos cilindros disponen de sendos pistones conectados a un eje.

El funcionamiento se esquematiza en la **Figura 15** , el ciclo termodinámico descrito se muestra en la **Figura 16** . El gas de trabajo se calienta debido a la radiación solar provocando su expansión e induciendo al mismo tiempo potencia sobre el pistón del cilindro de expansión (1 - 2). Parte de esta potencia es utilizada para mover el gas desde el cilindro de expansión hasta el cilindro de compresión (2 – 3) .En su camino, el gas pasa a través del regenerador donde se transfiere la mayor parte del calor a un fluido refrigerante (en este caso agua). Una vez confinado completamente el gas en el cilindro de compresión, éste será de nuevo impulsado hasta el cilindro de expansión aprovechando el empuje del pistón en su carrera ascendente, movimiento producido por

la propia inercia del eje del motor. El gas de trabajo se comprime a baja temperatura previamente a su movimiento hacia el cilindro de expansión. De nuevo, el gas atraviesa el regenerador en su camino absorbiendo calor y calentándose (4 – 1), a partir de aquí vuelve a iniciarse el ciclo. Debido a que la expansión del gas produce más trabajo del necesario para comprimirlo, el trabajo restante se aprovecha para mover el eje del motor al que va unido el alternador.

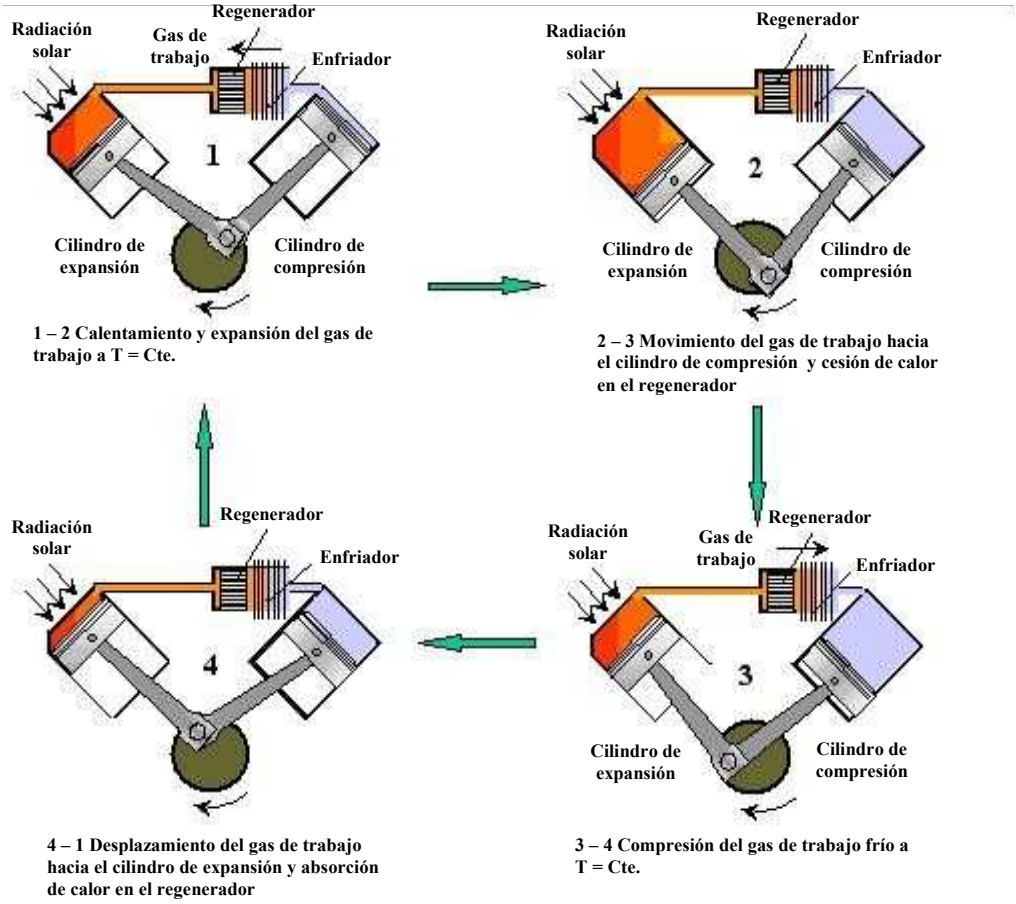

Figura 15: Principio de funcionamiento del motor Stirling básico

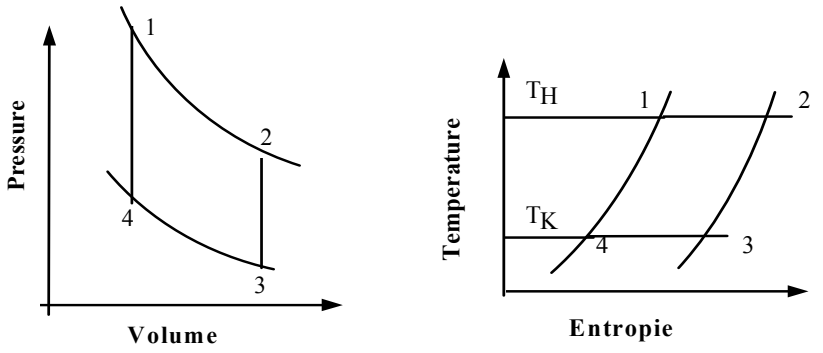

Figura 16: Diagramas p – v y T – S del ciclo termodinámico descrito por el gas de trabajo en el motor Stirling

2.4.5. Datos técnicos de la instalación de la ESI – Sevilla

Diámetro	8.5 m
Área proyectada	56.7 m²
Longitud del foco	4.5 m
Razón de concentración media	2500
Reflectividad	94 %

Tabla 1: Características técnicas del concentrador

Suspensión	Acimutal
Posición de parada (stand – by)	Concentrador cara - abajo
Velocidad del viento máxima permitida en operación	65 km/h
Velocidad del viento máxima permitida en posición de parada	160 km/h
Seguimiento	servomotor
Velocidad de seguimiento	60 °/min.
Sistema de control	PC y microcontroladores
Transferencia de datos	InterBus-S

Tabla 2: Características técnicas del sistema de seguimiento y control

Tipo	Dos cilindros en V a 90º
Cilindrada	160 cm³
Potencia bruta nominal	9.8 kW
Potencia neta nominal	9.2 kW
Conexión a la red	400 V, 50 Hz, 3 fases
Temperatura del gas en el recibidor	650 °C
Gas de trabajo	Hidrógeno
Presión del gas	20-150 bar
Control de la potencia	Por presión

Tabla 3: Características técnicas del motor Stirling

2.5. Fuentes consultadas para la elaboración del Capítulo 2

- Silva Pérez M. A. (2006). *Sistemas termosolares de concentración.* Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos - Universidad de Sevilla.

- Reinalter, W. Keck, T. Euro/*EnviroDish Referente Manual Versión 1.1*. Almería / Stuttgardt. Abril 2004.