

Electricidad Termosolar Máster en Energías Renovables y Mercado Energético

Sesión 20: Los sistemas disco-Stirling

Curso: 2015-2016

Manuel Romero Alvarez IMDEA Energía Avda. Ramón de la Sagra 3 28935 Móstoles <u>manuel.romero@imdea.org</u>



DY NO SA Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (bync-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/

Discos Parabólicos. La tecnología disco-Stirling. Tabla de contenidos

1	IN	TRODUCCIÓN	1
2	LA	A CONVERSIÓN TERMOELÉCTRICA EN CENTRALES SOLARES.	2
	2.1	Ciclos termodinámicos.	
	2.2	El sistema disco/Stirling	8
3	Dł	14	
	3.1	Evolución histórica en sistemas disco/Stirling	16
	3.2	Centrales de discos con unidad de potencia centralizada.	20
4	FU	JNDAMENTOS	25
5	LO	OS DISCOS DE LA PSA: RESULTADOS DE OPERACIÓN	
6	Sľ	TUACIÓN ACTUAL	
	6.1	El proyecto Eurodish	
	6.2	Nuevos desarrollos en Estados Unidos	40
	6.3	Iniciativas recientes: Infinia Solar y Tessera Solar	45
7	PC	DTENCIAL DEL SISTEMA	49
8	Lit	teratura recomendada	51

1 INTRODUCCIÓN

Un estudio de prospectiva realizado por la Agencia Aerospacial Alemana en 1992 estimaba ya entonces un potencial de instalación de nuevas plantas de producción eléctrica en la región mediterránea de hasta 90 GW que vendrían a sumarse a las actualmente existentes. Se estima que en un periodo de implantación de tan sólo 10 años sería técnicamente posible alcanzar un total de 13,6 GW que pudieran tener su origen en plantas solares térmicas y hasta 31 GW en un plazo total de 20 años [DLR, 1992]. Este potencial, se ve sin embargo reducido y en ningún caso sobrepasaría los 23 GW, cuando se introducen criterios de competitividad económica con plantas térmicas de combustible fósil. En este entorno los sistemas disco/Stirling pueden jugar un papel significativo con un potencial estimado en estudios de viabilidad realizados por industrias fabricantes, de 650 MW, tomando como premisa su utilización por 2/3 de la población en áreas remotas y pequeñas aldeas sin suministro de electricidad. Marruecos resulta un país de extraordinario atractivo para esta aplicación pudiendo cubrir una potencia instalada de 130 MW. Los desarrollos de la tecnología están en este caso siendo patrocinados por la Comisión Europea con participación de empresas Alemanas y Españolas, y los esfuerzos en la obtención de un productos listo para el mercado se centran en el prototipo EuroDish.

El Sur de los EEUU constituye otro de los mercados que se están valorando por diseñadores y fabricantes como de extraordinario interés para la electrificación de ranchos, reservas indias y poblaciones aisladas en áreas de Nevada, Arizona y Nuevo México. Los desarrollos en Estados Unidos están siendo patrocinados por el DOE (Departamento de Energía) a través del Programa DECC (Dish Engine Critical Components). Con este Programa se están movilizando tres desarrollos en paralelo coordinados por las empresas Boeing, WG y SAIC. A pesar de la situación de indefinición actual de la Administración Bush, se valoraba por el DOE un potencial a corto plazo de 8 GWe de electricidad solar para el año 2000 [U.S. DOE 1992], y se piensa que mucha de esta capacidad vendrá dada por centrales termosolares, dentro de las cuales los sistemas de discos parabólicos esta llamados a jugar un importante papel sobre todo en aplicaciones aisladas [U.S. DOE, 1993].

Los sistemas disco/Stirling han demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica con valores máximos del 30 % y hasta un 25 % de promedio diario en unidades de 7 a 25 kW. Debido a la curvatura parabólica del concentrador y a la baja relación distancia focal/diámetro (f/D =0,6), se pueden conseguir altas relaciones de concentración por encima de 3.000. Esto permite alcanzar muy altas temperaturas de operación entre 650 y 800 °C, dando lugar a eficiencias en el motor Stirling del orden del 30 al 40 % [Mancini et al., 2003].

Si bien los sistemas disco/Stirling han demostrado en varios proyectos su madurez tecnológica, la principal barrera para su comercialización se encuentra en los altos costes de fabricación y en garantizar unos costes mínimos de operación y mantenimiento [Becker et al., 2002]. El coste del sistema se encuentra actualmente en los 8.000 Euro/kW (instalado) para sistemas con carácter de prototipos, por lo que todavía es difícil extrapolar el coste real para producciones en serie. Para poder conseguir las primeras comercializaciones en áreas aisladas e islas, los costes del sistema deben situarse por debajo de las 5.000 Euro/kW instalado con un nivel de fabricación de 100 a 500 unidades año (1 a 5 MW/año). Algunos estudios reflejan hipótesis de costes en el entorno de los 2.000 Euro/kW asumiendo mayores niveles de fabricación (10.000 unidades/año) [IEA, 2003].

2 LA CONVERSIÓN TERMOELÉCTRICA EN CENTRALES SOLARES

Los sistemas termosolares guardan un gran parecido en el proceso de producción de electricidad con las centrales térmicas convencionales. Algunos autores quieren ver en el campo de concentradores solares la réplica de la minería en los combustibles fósiles, de tal modo que la función del campo de concentradores sería recolectar el combustible solar. Por esta razón una vez que se ha producido la interfase radiativa/convectiva que tiene lugar en el elemento clave del sistema, el receptor, los sub-sistemas subsiguientes pasan a ser, en mayor o menor medida, los convencionales en una planta térmica de generación de electricidad. No obstante las características intrínsecas de la radiación solar, transitorios y estacionalidad, obligan a un dimensionado muy cuidadoso del sistema de almacenamiento o ,en su caso, del funcionamiento del sistema y el modo de almacenamiento de la energía van a ser

altamente determinantes en la elección del fluido térmico de trabajo y en el diagrama de flujo de la misma. El coste marginal de captar y almacenar la energía extra que después será usada en períodos de no-insolación es menor que el que exigiría el aumentar el tamaño de la turbina para ajustarse a la potencia térmica pico.

2.1 Ciclos termodinámicos.

Las centrales termosolares permiten con la tecnología existente de concentradores y receptores, y teniendo en cuenta las pérdidas por convección y radiación, trabajar en un rango de temperatura de fluido de 400-1.500 °C. Este rango de temperaturas para el fluido térmico permite acoplar éste a bloques de potencia con ciclos Rankine o Brayton [Garg, 1987]. Esto permite que las centrales de torre, los discos parabólicos y los concentradores cilindro-parabólicos puedan producir electricidad de una forma bastante convencional. La electricidad es generalmente producida de una forma centralizada en un bloque de potencia mediante la combinación de un generador con una turbina como accionador primario. En el caso del ciclo Rankine se usa un ciclo cerrado agua/vapor como fluido de trabajo y en el ciclo Brayton se utiliza aire o un gas en un lazo abierto. Los sistemas disco/Stirling constituyen una concepción completamente distinta donde la centralización es sustituida por módulos independientes de generación eléctrica que permiten abordar problemas aislados de pequeña potencia y de fácil escalación (totalmente modular) muy semejantes a los que realiza la tecnología fotovoltaica.

Como es bien sabido, el mayor rendimiento posible de una máquina que produce trabajo como resultado de un intercambio de calor entre un foco caliente y otro frío, viene dado por el rendimiento de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$
 Ec. (1)

El ciclo de Carnot (Fig. 1) determina los límites físicos de conversión de calor, Q, en trabajo mecánico, W, como una expresión dependiente de la temperatura del foco caliente (T₁) y el foco frío (T₂). Este ciclo ideal reversible se corresponde con cuatro cambios de estado infinitamente lentos, primero una aportación de calor a temperatura constante, una expansión isoentrópica (o adiabática), una expulsión de calor a temperatura temperatura constante y por último una compresión isoentrópica. La irreversibilidad, y

consecuentemente la pérdida de rendimiento, de la mayoría de los ciclos que se dan en la práctica se debe en gran medida a los procesos de intercambio de calor. Las dos etapas isotérmicas del ciclo de Carnot permiten que la temperatura de la substancia de trabajo se mantenga constante respecto al foco caliente y al foco frío, de tal modo que el trabajo extraído en la etapa isotérmica de aportación de calor es exactamente igual a la energía agregada. Esto da lugar a que la energía interna, U, y por tanto la temperatura, permanezca constante. En realidad, como es fácil imaginar, la transferencia de calor sólo puede tener lugar si ambas etapas isotérmicas presentan una diferencia de temperatura, ya que es evidente que la temperatura de la substancia de trabajo no puede ser exactamente igual a la del foco caliente en las etapas de aporte y extracción de calor.

Otra causa importante de irreversibilidad es el rozamiento, por ejemplo el rozamiento entre un pistón y las paredes del cilindro. Este siempre se opone al movimiento y ejercerá distinta fuerza en la biela dependiendo de la dirección. También se puede producir rozamiento entre las moléculas del fluido y el recipiente sólido donde está contenido. En muchos ciclos también se exigen recipientes con paredes aislantes que son imposibles de construir. Las máquinas reales, por lo tanto, van a ser siempre inevitablemente irreversibles y verán siempre expresada su eficiencia como una fracción f de Carnot:

$$f = \frac{\eta_{ciclo}}{\eta_{Carnot}}$$
 Ec. (2)

Si se emplea la energía solar, u otra fuente externa, podríamos recorrer un ciclo cerrado, utilizando la misma masa de fluido todo el tiempo. Un ciclo que se adapta muy bien a este proceso es el llamado Ciclo de Stirling (Figura 1). Posee dos etapas isotérmicas como el ciclo de Carnot (1-2 y 3-4). En el tramo 1-2, la sustancia de trabajo se supone que se calienta por contacto con una serie de focos calientes cuya temperatura aumenta gradualmente, y se enfría en 3-4 al ponerse en contacto con unos focos fríos similares. Como ambas etapas intercambian la misma cantidad de energía podemos hacer que el foco frío y caliente sean un mismo cuerpo denominado "regenerador". En la práctica consisten en un conjunto de tubos finos o de tela metálica. El calor expulsado en una parte del ciclo vuelve al siguiente, almacenándose mientras tanto en el regenerador, que si se diseña con suficiente inercia puede conseguir que la temperatura de sus distintos segmentos permanezca casi constante. El proceso es casi reversible y el rendimiento alto, ya que las otras dos etapas ocurren

a volumen constante, lo que las aproxima a condiciones adiabáticas. De este modo se han conseguido máquinas de 25 kWe con rendimientos del 35,7 % a 650 °C, sin embargo no existen prototipos fiables y comerciales a mayores tamaños lo que hace que su aplicación solar deba restringirse a los discos parabólicos.

Los ciclos Rankine y Brayton, representados también en la figura 1, son hoy en día los únicos aplicados a los sistemas solares centralizados para producción de electricidad. El ciclo Rankine, tal y como se observa en la figura, difiere del de Carnot en que la etapa 1-2 de adición de calor no se realiza a temperatura constante. El vapor producido se expande en la turbina produciendo un trabajo mecánico y después el exhausto de la turbina, que consiste en una mezcla de vapor y gotas de agua a menor P y T, es condensado para eliminar el calor. Para completar el ciclo, el líquido es bombeado a alta presión al ebullidor. La eficiencia baja respecto a Carnot porque no todo el calor es suministrado a la temperatura más alta. De todas formas presenta como ventaja una alta conversión a trabajo mecánico y el consumo de vapor es inferior a Carnot. El tamaño del ciclo se puede incrementar sobrecalentando el vapor o expendiéndolo sólo parcialmente y recalentándolo después varias veces. Se puede aumentar la eficiencia usando una parte del calor extraído para calentar el liquido usando un regenerador antes de que el líguido entre en el ebullidor. En la producción de energía eléctrica a gran escala (> 200 MWt) el rendimiento respecto a carnot "f" es de 0,5 a 0,7 en condiciones de operación nominales y a base de una considerable complejidad y perfeccionamiento. Este rendimiento baja sensiblemente cuando Rankine es utilizado en pequeñas plantas (< 1 MWt), con lo que "f" disminuye a 0,3.

El ciclo Brayton es utilizado en turbinas de gas (no hay cambio de fase) y consta de dos etapas adiabáticas y dos isobáricas, tal y como se muestra en la figura 1. Si bien el ciclo Rankine de vapor de agua puede alcanzar altas eficiencias en la conversión eléctrica (42 % a 570 °C y 200 bar), el ciclo Brayton requiere una temperatura 300 °C más alta para conseguir esta misma conversión y hasta unos 500 °C más para alcanzar el mismo valor de "f" [Grasse, Hertlein y Winter, 1991].



Figura 1. Esquemas y diagramas de distintos ciclos termodinámicos.

El ciclo Rankine no suele ser usado por encima de los 560°C, por problemas en los materiales utilizados. Por contra el ciclo Brayton se adapta bien a rangos de temperaturas entre los 800 °C y los 1.000 °C, pero requieren de configuraciones muy refinadas y optimizadas para conseguir buenos rendimientos (lazo cerrado, recuperación de calor y refrigeración interna (intercooling)). El punto débil, no obstante, del ciclo Rankine viene motivado por su pérdida de eficiencia a carga parcial y a fluctuaciones en la temperatura de entrada. Este aspecto es más crítico en grandes potencias y para altas temperaturas (> 500 °C) y presiones (> 100 bar), lo que motiva un cuidadoso diseño del sistema de almacenamiento. En cuanto a los ciclos Brayton, las centrales de torre exigen ciclos cerrados por razones de eficiencia, sobre todo a carga parcial. Sin embargo, por razones de complejidad los primeros proyectos solares se están llevando a cabo con lazos abiertos.

La tendencia actual es optimizar las características de funcionamiento de las centrales de torre, discos centralizados y colectores cilindroparabólicos mediante el uso de ciclos combinados Bravton-Rankine, donde la planta solar o bien acomete el ciclo en su totalidad o bien apoya a una central de gas natural de forma que cubre la parte baja



Fig. 2.- Eficiencia de distintos ciclos en función de la temperatura

del ciclo con producción de vapor saturado (Fig. 2). Por contra los sistemas modulares tienen su representación más eficiente en los discos/Stirling por las altas eficiencias del ciclo de acoplamiento.

Por todo lo anteriormente mencionado, el diseño de una central termosolar para producción de electricidad ha de suponer un compromiso entre las relaciones de concentración y temperaturas proporcionadas por la planta solar, los factores que afectan al rendimiento del ciclo de potencia y el almacenamiento de energía para el acoplamiento de ambos [Brinkworth, 1981].

2.2 El sistema disco/Stirling

Los sistemas disco/Stirling han demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica. Debido a la curvatura parabólica del concentrador y a la baja relación distancia focal/diámetro (f/D = 0,6), se pueden conseguir altas relaciones de concentración por encima de 3.000. Esto permite alcanzar muy altas temperaturas de operación y por tanto altas eficiencias en el ciclo termodinámico.

Aunque han existido otras opciones de aplicación de los discos parabólicos como el sistema disco/Brayton ensayado por la empresa Cummins y DLR [Buck, Heller y Koch, 1996], o el uso en el pasado de granjas de discos para la producción de vapor sobrecalentado que alimentaba un ciclo Rankine (Georgia) [Alvis, 1984], es el sistema disco/Stirling el que ya desde sus primeros prototipos ha alcanzado porcentajes de eficiencia pico por encima del 30 % y hasta un 25 % de promedio diario en la conversión de la energía solar en eléctrica, lo cual constituye todo un record. A esto hay que añadir su fiabilidad con prototipos ensayados por más de 25.000 horas de operación, y su

modularidad que permite desarrollar el sistema completo a costes relativamente pequeños, buscar ámbitos de competición con la energía fotovoltáica y así acumular desde el principio experiencia de operación. La in-



Figura 3: Cálculo teórico de la eficiencia global de diferentes sistemas termosolares como una función de la temperatura de proceso, factor de concentración C y factor de carnot f.

fluencia de la temperatura del fluido caloportador y el factor de concentración son fundamentales a la hora de determinar la eficiencia global de una planta, tal y como se refleja en la fig. 3. El sistema disco/Stirling consiste en un concentrador con curvatura parabólica y un motor Stirling que es instalado en el punto focal. El concentrador dispone de un sistema de seguimiento solar en dos ejes y concentra la radiación en un



Fig.4:Configuración básica de un disco parabólico conectado a un motor Stirling. La imagen se corresponde con el disco de McDonnell Douglas.

intercambiador de calor (receptor). Este receptor actúa de unión entre el concentrador y la unidad de conversión de potencia. La energía térmica absorbida por el receptor es convertida en energía mecánica por el motor Stirling у después en electricidad mediante un generador.

Con la tecnología actual un sistema disco/Stirling de 5 kWe requiere un disco de unos 5,5 m. de diámetro, y un sistema de 25 kWe alcanzaría 10 m.

La eficiencia global del sistema η_{SVS} se define como:

$$\eta = \eta_C * \eta_R * \eta_{Stir} * \eta_{Gen} = \frac{P}{A c * I}$$
 Ec. (3)

donde

η c=	Eficiencia del concentrador
η R =	Eficiencia del receptor
ηStir =	Eficiencia del motor Stirling
ηGen = P =	Eficiencia del generador eléctrico Potencia bruta producida
Ac ⁼	Area proyectada del concentrado
=	Insolación directa.

El concentrador:

Un elemento clave es el concentrador parabólico que puede estar formado por elementos reflectantes individuales situados sobre una estructura soporte o bien ser una superficie continua. La superficie cóncava está cubierta por espejos de vidrio de segunda superficie o por polímeros metalizados de primera superficie. Una innovación, introducida en los años 90, en el diseño del concentrador consiste en la utilización de membranas tensionadas alrededor de un anillo soporte. Mediante el uso de un sistema de vacío activo se consigue la deformación de la superficie, para ello inicialmente se deforma la membrana con agua y posteriormente el vacio lo que hace es mantener la curvatura. En el apartado 3 (Desarrollo tecnológico) se recogerán más en detalle las distintas aproximaciones al diseño de la superficie reflectante.

El seguimiento de la posición del sol se hace habitualmente mediante dos métodos (Adkins, D.R., 1987):

- Seguimiento en acimut y elevación mediante la predicción de la posición.
- Seguimiento polar, en el que el colector rota alrededor de un eje paralelo al eje de rotación de la tierra. El colector rota a una velocidad constante de 15 ° por hora. El movimiento respecto al eje de declinación es tan sólo de ± 23,5 ° a lo largo de un año (un máximo de 0,016 °/hora).

El receptor:

El receptor cumple dos funciones, absorber la radiación y transferirla al gas de trabajo del motor. Como es sabido la distribución del flujo de radiación en un receptor es de tipo gaussiano. Los receptores para sistemas disco/Stirling son de tipo cavidad, con una pequeña apertura y su correspondiente sistema de aislamiento. En los receptores de discos se usan dos métodos habituales para la transferencia de la radiación solar al gas de trabajo [Diver, 1987]. En el primero se ilumina directamente un panel de tubos por el interior de los cuales circula el gas (Figura 5). En el segundo método, que se basa en el concepto de tubo de calor o heat pipe, se utiliza una malla fina fijada a la pared opuesta del receptor. En el interior un metal liquido (normalmente sodio) es absorbido por capilaridad en la malla y posteriormente vaporizado. Este receptor que se denomina de reflujo de sodio se representa en la Figura 6. Se denomina de reflujo, porque el metal liquido primero se vaporiza en el absorbedor, luego condensa en la superficie de los tubos por los que circula el gas de trabajo y refluye nuevamente al absorbedor.



Fig. 5.- Receptor de tubos directamente iluminado con cavidad.





El motor:

El motor Stirling fue patentado en 1816 por el Reverendo escocés Robert Stirling, y su primera utilización solarizada que se conoce fue hecha por John Ericsson in 1872. Desde su invención, los motores Stirling se han venido utilizando en automóviles, camiones, autobuses y barcos. En teoría, el motor Stirling es el más eficiente dispositivo para convertir la energía calorífica en trabajo mecánico, pero por contra necesita muy altas temperaturas. Estas temperaturas no obstante resultan muy adecuadas para los discos parabólicos, y siempre se pretende que los motores trabajen a sus máximas temperaturas de diseño. Son por tanto los materiales de construcción los que determinan los límites térmicos. Las temperaturas típicas están entre 650 y 800 °C, dando lugar a eficiencias del orden del 30 al 40 %. Helio e hidrógeno son por sus altos coeficientes de transferencia de calor los gases más usados. El hidrógeno es termodinámicamente la mejor opción (Walker, 1980), pero presenta mayores problemas de compatibilidad con los materiales y mayores problemas de seguridad.



Fig. 7.- Dibujo esquemático de configuraciones típicas en motores cinemáticos.

Para maximizar la potencia, los motores trabajan normalmente a altas presiones, en el rango de 5 a 20 MPa. Esto plantea problemas de operación por el difícil sellado del gas entre la región a alta presión y aquéllas partes a presión ambiental.

Los diseños de los motores usados en sistemas disco/Stirling se dividen en cinemáticos y de pistón libre (Figuras 7 y 8). El pistón de potencia en los cinemáticos está conectado mecánicamente con el eje de salida, mientras que en los de pistón libre no. En estos últimos el pistón se mueve alternativamente entre el espacio que contiene el gas y un muelle. La frecuencia del pistón y su tiempo de recorrido viene establecido por la dinámica del sistema muelle/masa.



Fig. 8.- Esquema de un motor Stirling de pistón libre conectado a un receptor de reflujo de sodio.

Los sistemas disco/Stirling requieren diseños duraderos por más de 20 años, con un mínimo mantenimiento. La horas de operación han de superar las 40.000 (10 veces más que un motor de coche). Uno de los mayores retos en el diseño de motores Stirling es el reducir el desgaste en componentes críticos o crear nuevas vías de funcionamiento menos agresivas.

3 DESARROLLO TECNOLÓGICO

La figura 9 muestra la diversidad de propuestas de diseño que se han desarrollado en los últimos 20 años y recoge tanto los discos cuyo único objetivo han sido los sistemas disco/Stirling como aquéllos de menos prestaciones utilizados en granjas con unidad de potencia centralizada.



C = factor geométrico de concentración

Figura 9.- Evolución histórica de los prototipos de discos parabólicos.

En la Tabla I se recogen las características más reseñables de los principales desarrollos de sistemas discos/Stirling.

Tabla I: Especificaciones funcionales y de diseño de algunos discos Stirling

SISTEMA					
Nombre	Vanguard	MDAC	German/Saudi	SBP 7.5 m	CPG 7.5 kW
Año	1984	1984-1988	1984-1988	1991-	1992-
Potencia neta*	25 kW	25 kW	52.5 kW	9 kW	7.5 kW a 950 W/m ²
Eficiencia*	29,4 % a 760°C	29-30 %	23.1 %	20,3 %	19 %
Número	1	6	2	8	3 (14 más en
					proyecto)
Emplazamiento	California	USA (Varios)	Riyadh (Arabia)	España 6 Alemania 2	USA
Situación actual	Tests finalizados	Tests finalizados	Operación ocasional	En ensayo	En ensayo
CONCENTRADOR					
Fabricante	Advanco	MDAC	SBP	SBP	CPG
Diámetro**	10.57 m	10.57 m	17 m	7.5 m	7.3 m
Tipo	Espejos en facetas	Espejos en facetas	Membrana tensionada	Membrana tensionada	Membrana tensionada
No. de facetas	336	82	1	1	24
Tamaño facetas	0,451x0,603 m	0,91x1,22 m	17 m. diámetro	7.5 m diámetro	1,524 m diámetro
Superficie	Vidrio/Plata	Vidrio/Plata	Espejo plata/acero	Espejo plata/acero	Polímero aluminizado
Reflectividad	93,5 %	91 %	92 %	94 %	85 % a 78 %
Concentración (+)	2750	2800	600	4000	1670
Seguimiento	Exocentrico	Acimut/elevación	Acimut/Elevación	Polar	Polar
Eficiencia	89 %	88,1 %	78,7 %	82 %	78 %
MOTOR					
Fabricante	USAB	USAB	USAB	SPS/SOLO	Sunpower/CPG
Modelo	4-95 Mark II	4-95 Mark II	4-275	V-160I	9 kW
Tipo	Cinemático	Cinemático	Cinemático	Cinemático	Pistón libre
Potencia (elect.	25 kW	25 kW	50 kW	9 kW	9 kW
Gas de trabajo	Hidrógeno	Hidrógeno	Hidrógeno	Helio	Helio
Presión (máx)	20 Mpa	20 Mpa	15 Mpa	15 Mpa	4 Mpa
Temp. gas (alta)	720°C	720°C	620°C	630°C	629°C
Eficiencia pico	41 %	38-42 %	42 %	30 %	33 % (++)
RECEPTOR					
Tipo	lluminación directa de	lluminación directa de	lluminación directa de	Iluminación directa (4)	Tubo de calor con
	los tubos	los tubos	los tubos	y tubo calor (1)	sodio
Diámetro apertura	20 cm	20 cm	70 cm	12 cm	18 cm
Flujo pico	75 W/cm ²	78 W/cm ²	50 W/cm ²	80 W/cm ²	30 W/cm ²
Temp. tubo (max.)	810 °C		800 °C	850 °C	675 °C(+++)
Eficiencia	90 %	90 %	80 %	86 %	86 %

 * A 1000 W/m² si no se especifica.

- ** Disco equivalente
- + Concentración geométrica
- ++ Incluye el alternador

+++ Temperatura interna del vapor de Na.

3.1 Evolución histórica en sistemas disco/Stirling

La primera generación de discos está formada por configuraciones faceteadas de vidrio/metal, que se caracterizaron por unas altas concentraciones (C=3000), y sus excelentes resultados, aunque a precios muy elevados (estimaciones por encima de los 300 \$/m² para grandes producciones) y estructuras muy pesadas del orden de los 100 kg/m². El disco Vanguard fue operado en Rancho Mirage (California) en el desierto de Mojave durante un periodo de 18 meses (Feb. 84 a Jul. 85). Los resultados han sido publicados por EPRI [Droher y Squier, 1986]. Este disco tenía 10,7 m de diámetro, 86,7 m² y llevaba un motor/generador de 25 kWe de United Stirling AB (USAB) modelo 4-95 Mark II. Este motor dispone de cuatro cilindros con un desplazamiento de 95 cm ³ por cilindro. Los cilindros están dispuestos en paralelo y montados en un cuadrado. Están interconectados con el regenerador, el enfriador y usan pistones de doble acción. El gas de trabajo fue Hidrógeno a una presión máxima de 20 MPa y una temperatura de 720 °C. La potencia del motor se regula mediante la presión del gas. Con más de un 30 % de conversión neta (incluyendo consumos auxiliares), este sistema posee todavía el record mundial.



Fig. 10. Vista trasera de la estructura y facetas del disco de McDonnell Douglas, con el motor en la parte superior.

McDonnell Douglas desarrolló un disco con la misma tecnología, aunque con algunas mejoras, de 10,5 m de diámetro, 91,5 m², y con un motor de 25 kWe, llegó a vender

seis unidades que fueron operadas por compañías eléctricas (Ver Fig. 4 y 10). La unidad incorporaba el mismo motor utilizado en el Vanguard. Posteriormente vendieron los derechos del sistema a la compañía Southern California Edison [Lopez and Stone, 1992].

Entre las opciones de abaratamiento de costes de los discos destaca la sustitución del vidrio por polímeros aluminizados y plateados. Entre los distintos diseños cabe destacar los discos de LaJet, Solar Kinetics y Acurex. Son discos de menores prestaciones ópticas, que surgieron para aplicaciones en granjas no-Stirling que requerían menos concentración y menos temperatura como es el caso de la planta de Shenandoah (Solar Kinetics), y de Solarplant 1 en Warner Springs (USA) que usaba LaJet. Si bien no alcanzan las excelentes eficiencias de los discos anteriores si presentan un menor coste de producción.



Fig. 11. Imagen de la planta Solarplant1 con 700 discos de LaJet

La empresa Cummins de USA fue la primera que ensayó un sistema con motor de pistón libre. Asimismo fueron los primeros en introducir el receptor de reflujo de sodio frente a los anteriores que eran de iluminación directa. En este caso los prototipos probados se han movido en potencias de 5 a 7,5 kWe con una eficiencia de diseño de 19 % neto [Bean and Diver, 1995]. El concentrador empleado por Cummins (el CPG-460) es una versión del disco de LaJet, con 24 facetas de polímero tensionado, cada una de 1,5 m. de diámetro. El film utilizado es 3M ECP-305+ laminado sobre PET (polietileno tereftalato). El motor de 9 kWe del sistema mas grande fue desarrollado

por la empresa Sunpower. El gas de trabajo es Helio a 629°C. Dado que el actuador lineal se encuentra confinado en el interior de la carcasa, la unidad puede ser sellada herméticamente, penetrando únicamente en su interior la conexiones eléctricas. Las únicas dos partes móviles son los pistones de potencia y de desplazamiento (Su esquema se recoge en la figura 8).

La actividad de Cummins se inició en 1.991 mediante la firma de un programa conjunto con el DOE por un montante de 17,2 millones de \$, para el desarrollo de estos sistemas para mercados remotos, con el objetivo de comercializar en 1.997 unidades de 7,5 kW y en el año 1.999 unidades más grandes con 25 kW. Fue por tanto el primer intento serio de comercializar esta tecnología a gran escala. El programa encontró problemas en el sistema motor/alternador, sobre todo en la distribución de flujo del gas de trabajo y en la aparición de elevadas vibraciones en los cilindros. En 1.994 la empresa CFIC (Clever Fellows Innovation Consortium) se hizo cargo del desarrollo del grupo motor/alternador, que con anterioridad intentó Sunpower, introduciendo un diseño innovador que sin embargo tuvo problemas en su solarización. Tras la lista de problemas enumerados con anterioridad, el grupo de Cummins en sistemas disco/Stirling con motor dinámico en USA se desmanteló. Esto dio lugar a la creación de una nueva empresa con el know-how y los técnicos en Turquia, aunque se desconoce la situación real de esta nueva empresa.



Fig. 12 .- Esquema del concentrador CPG-460

El disco SBP constituye un nuevo tipo de sistema basado en el concentrador de membrana tensionada, y es el único europeo, también con el objetivo de reducir costes. Los primeros prototipos fueron ensayados en Arabia Saudita durante el periodo 1984-1988. Dos concentradores de 17 m. de diámetro (220 m²) y motores Stirling cinemáticos de 50 kWe se ensayaron satisfactoriamente con un rendimiento del 23 %. Posteriormente, y como consecuencia de estos resultados se han venido desarrollando nuevos prototipos de 7,5 m de diámetro (Figura 13), adaptados a un motor robusto cinemático V-160 de 9 kW desarrollado por las empresas United Stirling (USAB) de Suecia y Stirling Power Systems (SPS) de USA. SBP compró la licencia del motor y la sublicenció a la empresa SOLO Kleinmotoren en alemania quien lo fabrica en la actualidad (Figs. 7 y 14). Mediante proyectos conjuntos entre SBP, DLR y CIEMAT se han ensayado tres unidades en la PSA [Schiel, et al., 1994].



Fig. 13. Esquema y fotografía del sistema disco/Stirling de 9kW de SBP



Fig. 14.- Esquema y foto del motor cinemático Stirling V-160 de 10 kWe

Los resultados y perspectivas de este diseño se comentarán en profundidad, más adelante, por existir una amplia experiencia operativa en la Plataforma Solar de Almería. Se puede decir hoy en dia que tras los problemas encontrados por Cummins en el desarrollo de su comercialización, el disco de SBP es el único que a nivel mundial posee suficientes ensayos de durabilidad, si bien han surgido con posterioridad opciones de menor coste, como el concepto EuroDISH.

3.2 Centrales de discos con unidad de potencia centralizada.

Si bien se considera hoy en día que los sistemas disco/Stirling son los únicos en los que los discos parabólicos resultan atractivos, ha habido en el pasado y todavía en el presente permanece alguna actividad en la utilización de discos dentro de plantas tipo granja. En este caso una red de tuberías transporta el fluido térmico que posteriormente es enviado a una unidad estándar con turbina y generador. La información sobre el funcionamiento de las pocas plantas existentes es muy escasa.

La planta más conocida es la de Shenandoah en Georgia (USA), con 400 kWe/2.000kWt en cogeneración. La planta comenzó a operar en 1.982 cofinanciada por el DOE y la eléctrica Georgia Power Company, y utiliza aceite térmico como fluido transportador que despues da lugar a vapor sobrecalentado y es utilizado en un ciclo Rankine convencional. La instalación opera en modo híbrido con apoyo fósil. Los resultados de operación han mostrado una eficiencia baja, siendo las temperaturas de operación muy bajas para las posibilidades que ofrece la tecnología de discos. La planta utiliza 2.300 m² de discos de Solar Kinetics cuya superficie reflectante está formada por film polímero de aluminio (FEK-244). La figura 15 muestra un diagrama de flujo de la planta y en la Tabla II se recogen sus principales datos de diseño.

	Shenandoah	Solarplant 1
Potencia kWe	400	4920
KWt	2000	no disponible
Colector		
Тіро	SKI	LEC-460
Número	114	700
Apertura		
Superfice m ²	21	43
Superficie total m ²	2328	30.261
Mat. Reflectante	FEK-244 sobre aluminio	anillos polímero tensionado
Seguimiento	Polar	Polar
Receptor	cavidad cónica	cavidad
Fluido térmico	Syltherm 800	agua/vapor
Temp. operación (°C)	260/363	277/371
Almacenamiento	Termoclina	No
Medio	Syltherm 800	No
Capacidad kWht	1600	No
Unidad de Potencia	Rankine vapor	Rankine
Temp./Presión	382°C/43.3 bar	360°C/41,4 bar
	(177°C extr)	110°C
Generador kVA	400	3400/1520
Apoyo fósil	quemador gas	No
Capacidad kWt	2300	

Tabla II: Datos de granjas de discos parabólicos



La planta Solarplant 1 surge de una iniciativa privada, y usa 700 discos de LaJet (Fig. 11). En este caso el fluido térmico es directamente agua evaporada en una linea de 600 colectores y posteriormente sobrecalentada desde 276 hasta 371 °C en el resto del campo (Fig. 16). La potencia eléctrica se distribuye en dos turbinas, una de 3.68 MW y la otra de 1.24 Mw. Esta planta entró en operación en 1.985, pero sus resultados jamás han sido publicados. Se sabe no obstante de importantes problemas con el lazo de vapor motivado por los transitorios solares y los arranques y paradas, debido a la inexistencia de almacenamiento. Con posterioridad se utilizó un sistema Diesel de apoyo.

La conclusión de estas dos plantas es muy pobre y la información es escasa, constituyendo sistemas antiguos en su concepción. En la actualidad la única actividad con discos para generación de vapor sobrecalentado a 500°C y 7 MPa, la constituye el "big dish" australiano patrocinado por un consorcio de empresas y compañías eléctricas, que con un tamaño de 400 m² y 50 kWe por unidad, pretende la creación de granjas a partir de discos de gran tamaño en el rango de 200 kWe (4 discos) a 100 Mwe (792 discos). En el año 2000, se creó un consorcio industrial que pretendía la construcción de una fila con 18 discos que totalizarían 2 MWe y que se integrarían en una planta térmica convencional de 33 MW operada por gas natural (Kaneff, 2000 y Luzzi, 2000). El proyecto, finalmente se malogró.



Fig. 17.- Disco australiano de 50 kWe en operación.

4 FUNDAMENTOS

En un sistema disco/Stirling, la ecuación que gobierna su comportamiento viene dada por la integración de los rendimientos de los distintos subsistemas, tal y como se recoge en la ecuación 3. La energía útil captada por el conjunto concentrador/ receptor viene dada como en cualquier otro sistema solar térmico por la expresión:

$$Q_{util} = I_{bn} * A_{ap} * E * (\cos\theta_i) \rho \phi \tau \alpha - A_{rec} * \left[U (T_{rec} - T_{amb}) + \sigma F (T_{rec}^4 - T_{amb}^4) \right]$$
 Ec. (4)

donde:

A_{ap} = area de apertura del concentrador

Arec = area de apertura del receptor

E = Fracción del concentrador no sombreada por el receptor y demás elementos.

F = Conductancia radiativa equivalente

Ibn = radiación solar normal incidente

Q_{util} = Energía térmica útil suministrada por el receptor.

Tamb = temperatura ambiente

T_{rec} = Temperatura de operación del receptor

U = Coeficiente de pérdidas por conducción y convección debido a corrientes de aire dentro del receptor y a conducción a través de las paredes del receptor.

 α = Absorbancia del receptor

 τ = Transmitancia del medio entre el reflector y el absorbedor (ventanas).

 θ_i = ángulo de incidencia (en discos parabólicos es 0).

 ρ = reflectividad del concentrador

 σ = constante de Stefan-Boltzmann

 ϕ = factor de interceptación (fracción de energía que una vez abandonado el reflector entra en el receptor).

<u>Concentrador</u>

Para poder maximizar Qutil, es necesario que Aap sea grande y Arec pequeño. La relación de concentración geométrica en un concentrador óptico viene dada por la expresión:

$$CR_g = A_{ap}/A_{rec}$$
 Ec. (5)

Esta relación de concentración define un factor ideal. En la realidad la radiación solar que incide sobre la superficie no es paralela (la divergencia de la radiación solar es

32'), por lo que la ecuación 5 tiene un límite máximo que viene dado por el tamaño del sol CRg (max) = 46.200. Este valor es en la práctica muy inferior motivado por los distintos errores ópticos como la aberración, la reflectancia de la superficie y los errores de la superficie. Estas deficiencias tienen diferentes causas que, dependiendo del tipo de construcción tendrán efectos diferentes. Se pueden diferenciar los siguientes tres tipos:

- Errores debidos a deformaciones de la curva de referencia (error de inclinación o slope error)
- Errores debidos a ondulaciones del orden de mm hasta cm (waviness)
- Errores por rugosidad microscópica de la superficie del orden de μ m (rugosidad).

Estas deficiencias dan lugar a una calidad de imagen. Como todos estos errores se distribuyen estadísticamente en el rayo reflejado, se pueden describir mediante una distribución estándar de Gauss. El error total viene dado por la desviación estándar σ_t en mrad, que es la deviación del rayo reflejado y viene dada por la expresión:

$$\boldsymbol{\sigma}_{t}^{2} = \boldsymbol{\sigma}_{b}^{2} + \left(\boldsymbol{a} \, \boldsymbol{\sigma}_{N}\right)^{2} + \boldsymbol{\sigma}_{a}^{2} \qquad \qquad \text{Ec. (6)}$$

de donde resulta la relación de concentración mínima para paraboloides dependiente del ángulo límite o de contorno Θ :

$$CR_{min} = \frac{\operatorname{Sen}^{2} \Theta \cos^{2}(\Theta + \Delta)}{\operatorname{Sen}^{2} \Delta} \qquad \text{Ec. (7)}$$

Si analizamos esta relación y representamos Cmin frente al ángulo límite Θ , resulta la figura 18. Puede observarse que el factor de concentración máximo a un ángulo límite es de 45 °, que equivale a una relación focal de f/D = 0,6 (Ver figura 19), y que es independiente del σ_t del sistema. De aquí se deduce que un concentrador óptimo ha de tener una relación focal de 0,6.

Manuel Romero Álvarez



Fig. 18.- Relación de concentración en espejos Parabólicos con el ángulo límite.



La relación entre f/D y el ángulo límite de la fígura 19 viene dada por la geometría del paraboloide que es descrita por:

$$x^2 + y^2 = 4fz$$
 Ec. (8)

donde $x \in y$ son las coordenadas en el plano de apertura y z es la distancia del plano al vértice, y f es la distancia focal (Fig. 20).



Fig. 20: Esquema óptico de un paraboloide de revolución

Dado que a pequeños ángulos límite el paraboloide tiende a parecerse a una esfera y que los discos faceteados suelen usar superficie esféricas, se hace valida la relación:

$$f/d = \frac{1}{4\tan(\Theta/2)}$$
 Ec. (9)

La figura 19 recoge dicha ecuación demostrando que para 45° corresponde una relación focal de 0,6. En aquellos casos donde se usan receptores de cavidad, los ángulos límite son inferiores a 50°, por lo que normalmente el receptor está situado lejos y la curvatura del concentrador es pequeña.

El factor más importante en la conexión del concentrador con el receptor es el factor de interceptación (ϕ), y define la fracción de energía que después de abandonar la superficie del concentrador es capaz de penetrar en el interior del receptor. Depende de los errores en la superficie del concentrador, errores de seguimiento o tracking, canteo y alineamiento de los espejos y del receptor y del tamaño aparente del sol. Existe una relación directa entre ϕ y el área del receptor A_{rec}, pero inversa de ésta última con las pérdidas del receptor, por lo que es necesario optimizar la relación.

Receptores

En general se usan dos tipos de diseños: Externos y Cavidad. Los discos parabólicos acoplados a motores Stirling usan habitualmente receptores de cavidad debido a las altas temperaturas. El rendimiento del receptor viene dado por la expresión:

$$\eta_{rec} = \tau \alpha - \frac{U(T_{rec} - T_{amb}) + \sigma F(T_{rec}^{4} - T_{amb}^{4})}{\eta_{conc} C R_g I_{bn}}$$
 Ec (10)

Como se deduce de la ec. 10, la eficiencia del receptor puede aumentarse mejorando la transmitancia del medio, mejorando la absorbancia de la superficie, reduciendo la temperatura de operación, o reduciendo la capacidad de la cavidad para perder calor por conducción, convección y radiación (términos U y F).

El motor Stirling

Como se recogía en el apartado 2.2, el motor Stirling consiste básicamente en un pistón compresor (pistón frío), un refrigerador, un calentador y un pistón de expansión (pistón caliente), tal y como se recoge en la Figura 21. La principal ventaja del ciclo Stirling es el uso de un regenerador. El calor rechazado durante la etapa de enfriamiento isócora es reutilizada en la etapa de calentamiento isócora. El calor neto es sólo añadido o extraido en etapas isotermas, lo cual es la base fundamental para la gran eficiencia del ciclo.

Motor cinématico:

El proceso tal y como se representa en la Figura 21 describe lo que ocurre en la mayoría de los motores cinemáticos, y más en concreto en el United Stirling 4-95.



Fig. 21.- Etapas de funcionamiento en un motor Stirling cinemático

1-2 Compresión isotérmica

Si el pistón de expansión permanece en el punto muerto superior, el gas de trabajo es comprimido isotérmicamente por el movimiento hacia arriba del pistón compresor. Para esto es necesario disminuir la energía térmica con el refrigerador.

2-3 Aumento isócoro de temperatura

El pistón compresor sube al mismo tiempo que el pistón de expansión baja. Esto tiene como resultado que el gas de trabajo es desplazado a través del regenerador a la cámara de expansión sin que se produzca ninguna modificación en su volumen. El gas absorbe el calor almacenado en el regenerador.

3-4 Expansión isotérmica

El pistón de expansión se desplaza hacia abajo, el gas de trabajo se expande, el pistón de compresión permanece mientras tanto en la posición superior de punto muerto. El calor que se necesita para la expansión isotérmica es transmitido a través del calentador.

4-1 Enfriamiento isócoro

El pistón de expansión se desplaza desde abajo hacia arriba, el pistón de compresión desde arriba hacia la posición inferior de punto muerto. El gas de trabajo es desplazado a través del regenerador hasta la cámara de compresión y transmite calor al regenerador

El porcentaje de eficiencia del proceso Stirling ideal es el mismo que el de Carnot, pero en la realidad resulta un proceso circular. Esto se debe por un lado a que el movimiento de los pistones no es discontinuo, y a que los procesos no son exactamente isócoros e isotermos.

Motor de pistón libre:

Se trata de una vía innovadora cuyo funcionamiento se recoge en la figura 22, que incluye los principios del mismo acoplados a un receptor de tubo de calor con sodio líquido. Su funcionamiento termodinámico es idéntico al cinemático. Sin embargo, en este caso la operación se efectúa sin uniones mecánicas, y los desplazamientos del pistón son producidos por gas o muelles mecánicos. El gran potencial de este concepto es su simplicidad, bajo coste y su alta fiabilidad que los hacen aconsejables en el futuro para el desarrollo de sistemas de muy bajo mantenimiento. En la

actualidad todavía no se encuentran totalmente desarrollados, tal y como se ha mencionado anteriormente al describir la situación del disco de Cummins.



Fig. 22.- Etapas de funcionamiento en un motor Stirling de pistón libre.

5 LOS DISCOS DE LA PSA: RESULTADOS DE OPERACIÓN.

La Plataforma Solar de Almería cuenta con la instalación más completa en cuanto a ensayos y evaluación de sistemas disco/Stirling. Durante el periodo 1991/1995 tuvieron lugar los ensayos de durabilidad de tres discos de SBP dentro del proyecto DISTAL I. Estos discos acumularon más de 30.000 horas (record mundial), con funcionamiento puramente solar.

Con la experiencia adquirida en el proyecto DISTAL I, se comenzó en 1997 el proyecto DISTAL II, consistente en otras tres unidades de 10 kWe fabricadas por la empresa alemana Steinmüller, que constituyen una mejora frente a las anteriores al disponer de un sistema de operación y control totalmente automático. Estas seis unidades configuran la instalación más importante de sistemas disco-Stirling, tanto por el número de discos como por las horas de operación acumuladas.



Fig. 23. Vista frontal de los seis discos de la PSA. En primer termino los tres discos de DISTAL-II en segundo término, a la izquierda, los tres discos de DISTAL-I.

A estos dos proyectos cabe añadir un tercer proyecto que se realizó entre los años 1997 y 2000 financiado por el programa JOULE de la UE. Este proyecto denominado "Development of Advanced Hybrid Heat Pipe Receivers in Dish/Stirling Systems for Decentralised Power Production" o HYHPIRE, desarrolló un sistema híbrido gas/solar para facilitar la penetración en el mercado de este tipo de sistemas.

El concentrador

Consiste en un anillo de 1,2 m de altura y con dos membranas tensionadas a lo largo de su perimetro de 0,23 mm de espesor cada una. Las membranas son de acero inoxidable, y han sido construidas a partir de la soldadura de tiras de 1 m. En la figura 13 se recogía un esquema de conjunto del disco.

La membrana delantera se deformó con procedimientos de moldeo hidroneumático, sin el uso de ningún contramolde para conseguir la geometría parabólica (Ver Fig. 24). En operación la membrana se estabiliza gracias a una pequeña presión negativa de 20 a 50 mbar. Una vez conformada se le pegan vidrios delgados de 0,9 mm de espesor de 50 x 30 cm.



Fig. 24.- Procedimiento de conformación hidro-neumático

El factor de concentración es de 2.300 con un pico de 14.000, situándose la eficiencia del concentrador en el 81 %. Los principales datos del sistema se encuentran recogidos en la Tabla I.

El sistema de receptor/motor

El motor es el V-160 de USAB (representado en las figura 14), fabricado por SOLO Kleinmotoren en Alemania. Se trata de un motor aparentemente sencillo, de un ángulo de 90° de los cilindros con 160 cm³ de volumen desplazado y que se caracteriza por una construcción robusta y una alta eficiencia. El motor usa helio a 650 °C hasta

15 MPa. Se han construido ya 170 de estas máquinas existiendo en algunas de ellas experiencia acumulada de más de 28.000 horas (equivalente a 5 veces la vida de un motor convencional de combustión). El rendimiento varía dependiendo de la rotación, consiguiéndose valores del orden del 30 al 37 %. En cuanto al receptor, se trata de un sistema de tubo de calor diseñado por el DLR para uno de los discos y los otros dos incorporan tubos de calentamiento directo.

Producción eléctrica:

En la figura 25 se recogen los datos de insolación y de potencia neta producida en días típicos (con y sin nubes). Se puede apreciar la baja inercia del sistema con respuesta de producción casi instantánea. En un día soleado 15-20 minutos después de salir el sol ya comienza a operar y la explotación cubre todo el periodo solar. En días donde otros sistemas térmicos no podrían operar, el sistema disco/Stirling produce en régimen parcial. Después de una nube, el sistema arranque inmediatamente y alcanza el estado estacionario en menos de 5 minutos. Por contra los elementos calientes del sistema sufren grandes stresses térmicos, por lo que han de ser diseñados cuidadosamente. El receptor está hecho de Inconel para soportar temperaturas de hasta 900 °C y poder operar durante al menos 10 años. La figura 26 muestra un ejemplo de potencia bruta y neta del sistema y su eficiencia.







Fig. 26.- Típicas características de entrada y salida y eficiencia neta de la unidad disco/Stirling de 7,5 m y 9 kW, con dia claro (Disco 1, con tubo de calor y temperatura de referencia de 740 °C)

A 1.000 W/m² el sistema alcanza una eficiencia bruta del 20,4 % y neta del 19,5 %. El consumo auxiliar es de 0,45 kW. La unidad comienza su producción con una insolación de 200 W/m², y empieza a producir electricidad neta a los 230 W/m². En la figura 27 se recoge la eficiencia por subsistemas en condiciones de alta insolación (1000 W/m²), viento por debajo de 2 m/s y baja temperatura ambiente. En esas condiciones el concentrador tiene una eficiencia del 81 %, principalmente por la reflectividad de los espejos y el factor de interceptación. El receptor el 85 %, siendo sus principales pérdidas por reflexión de los tubos y re-radiación térmica. El motor tuvo un 30 % de eficiencia. El consumo auxiliar era un 5 % de la potencia máxima producida.



Fig. 27.- Eficiencias por subsistemas (Insolación 1000 W/m², T amb. = 10°C y temp. ref. 740 °C)

Producción acumulada:

Como resumen de 18 meses de operación continua se recoge en la figura 28 la producción diaria. Cuando la radiación directa es superior a 1 kWh/m²/dia, el sistema alcanza rendimientos diarios netos del 15-16 %. En días con algunos pasos de nubes ésta se reduce ligeramente al 14-15 %. Los rendimientos se ven afectados por la limpieza de los espejos, y la velocidad del viento, así como por la temperatura ambiente. Durante los días de invierno con alta radiación se obtienen los mejores resultados. Los resultados de la evaluación muestran que un incremento en la temperatura ambiente de 10 °C supone un decremento de un 3 % en el rendimiento del motor.



Fig. 28.- Producción eléctrica medida para los tres discos durante 18 meses

Operación y mantenimiento:

En la figura 29 se recogen los resultados de disponibilidad del sistema durante 18 meses de operación. De ella se determina que la disponibilidad del sistema sobre las horas teóricas de sol ha sido un 70 %. En la figura 28 se recogen también las estadísticas de fallos y el tiempo de reparación de los mismos. En el concentrador no se han presentado averías. Siendo las más importantes relacionadas con el motor y el receptor (principalmente ajustes en los cilindros y sus cabezas).



Fig. 29.-Horas de operación solar medidas realmente para los tres discos discos DISTAL I durante el periodo de 18 meses.



Manuel Romero Álvarez

6 SITUACIÓN ACTUAL

A diferencia de los sistemas de torre y de los campos de colectores cilindroparabólicos, en los que existe un común acuerdo de que la tecnología está lo suficientemente madura como para que se acometan las primeras plantas comerciales, en el caso de los sistemas disco-Stirling todavía es necesario un desarrollo adicional de la tecnología. Los sistemas han mostrado excelentes eficiencias, pero dado que han de competir en nichos de mercado de energía distribuida frente a los sistemas fotovoltaicos y los generadores diesel, han de garantizar una competitividad económica y una disponibilidad muy alta. En la actualidad los proyectos que se realizan tanto en Europa como en EEUU están enfocados a estos dos aspectos.

6.1 El proyecto Eurodish

La empresa SBP ha abandonado la línea de concentradores de membrana tensionada que se han venido ensayando en la PSA, al considerarse que era necesaria una mayor reducción de costes, pues el coste actual de los discos DISTAL, en el entorno de los 11.000 EURO/kWe resultaba desmedido. Se ha identificado el concentrador solar como uno de los componentes con mayor potencial de reducción durante su proceso de diseño y fabricación (Heller, Baumüller y Schiel, 2000). El objetivo del proyecto Eurodish, financiado por la Comisión Europea y con participación de SBP, SOLO, Inabensa, DLR y CIEMAT, era desarrollar un nuevo tipo de concentrador que permita alcanzar los 5.500 Euro/kWe, para varias centenas de discos, considerándose ésta la frontera para iniciar búsquedas de nichos de mercado en competencia con la fotovoltaica y el diesel.

El concentrador utiliza un soporte formado por sectores de fibra de vidrio con estructura tipo sandwich, consiguiéndose una reducción importante de peso de unos 1.000 kg en el disco. En cuanto a la máquina consiste en una SOLO Stirling 161 que es un nuevo diseño de los años 90 procedente del anterior SPS V 160. El gas de trabajo es Helio a 650°C y 15 MPa con una producción de 10 kW a 150 rpm.

El disco EuroDISH presenta resultados operacionales, temperaturas y rendimientos muy similares a los obtenidos por DISTAL-II, pero con una nueva estructura de menor coste, siendo hoy en día el estado del arte de la tecnología en Europa.



Fig. 31. Prototipos del disco Eurodish instalados en el año 2001 en la Plataforma Solar de Almería, y desarrollado por SBP en colaboración con INABENSA, SOLO, DLR y CIEMAT.

El rendimiento en la conversión pico de solar a electricidad es del 20-21%. La producción anual estimada para un lugar de muy alta insolación como Albuquerque, en Nuevo México es de 20.252 kWh, con una disponibilidad del 90% y una eficiencia de conversión promedio anual del 15,7%.

SBP y el consorcio EuroDISH han realizado un estudio de costes de producción estimados para una ratio de fabricación de 500 unidades por año (5 MW/año) y para 5000 unidades año (50 MW/año). El coste actual obtenido para los prototipos de 10 kW sin incluir transporte, ni instalación, ni cimentación es de aproximadamente 8000 Euro/kW. La proyección obtenida para 500 y 5000 unidades año es de 2500 Euro/kW y 1500 Euro/kW respectivamente [Mancini et al, 2003].

En la actualidad, y con financiación del Ministerio de Medio Ambiente Alemán se han construido 4 unidades para ensayos prolongados que han sido instaladas en India, Francia, Italia y España. La unidad instalada en España (además de las dos existentes en la PSA), se encuentra en Sevilla y está siendo operada en conexión a red por la Fundación CENTER. Esta unidad empezó a operar el 27 de marzo de 2004 y se encuentra despachando electricidad en base a la nueva tarifa electrica para sistemas termosolares.

6.2 Nuevos desarrollos en Estados Unidos

En el caso de EEUU existen tres proyectos en marcha con financiación del DOE a través del Programa DECC (Dish Engine Critical Components) que comenzó en el año 1998. Con este Programa se están movilizando tres desarrollos en paralelo coordinados por las empresas SES, SAIC y WG. En la siguiente Tabla III podemos observar una comparación de estos discos, con el disco Europeo de SBP (EuroDish) [Mancini et al., 2003].

Tabla III: Comparativa de especificaciones y resultados para los sistemas DS más recientes.

Concentrator	SAIC/STM System	SBP System	SES System	WGA (Mod 1) ADDS System	WGA (Mod 2) Remote System
Туре	Approximate	Paraboloid	Approximate	Paraboloid	Paraboloid
No. of Facets	16	12	82	32	24
Glass Area (m ²)	117.2	60	91.0	42.9	42.9
Proj. Area (m ²)	113.5	56.7	87.7	41.2	41.2
Reflectivity	0.95	0.94	0.91	0.94	0.94
Height (m)	15.0	10.1	11.9	8.8	8.8
Width (m)	14.8	10.4	11.3	8.8	8.8
Weight (kg)	8172	3980	6760	2864	2481
Track Control	Open/Closed Loop	Open Loop	Open Loop	Open/Closed Loop	Open/Closed Loop
Focal Length (m)	12.0	4.5	7.45	5.45	5.45
Intercept Factor	0.90	0.93	0.97	0.99+	0.99+
Peak C R (suns)	2500	12,730	7500	>11,000	>13,000
Power Conv. Unit	SAIC/STM	SBP	SES	WGA ADDS	WGA Remote
Aperture Dia. (cm)	38	15	20	14	14
Engine Manf/Type	STM 4-120	SOLO 161	Kockums/SES	SOLO 161	SOLO 161
	double acting	kinematic	4-95	kinematic	kinematic
	kinematic		kinematic		
No. of Cylinders	4	2	4	2	2
Displacement (cc)	480 cc	160 cc	380 cc	160 cc	160 cc
Op Speed (rpm)	2200	1500	1800	1800	800-1890
Working Fluid	hydrogen	helium	hydrogen	hydrogen	hydrogen
Power Control	Variable Stroke	Variable	Variable	Variable	Variable
		Pressure	Pressure	Pressure	Pressure
Generator	$3 \varphi/480 v/Induct$	$3 \varphi/480 v/Induc$	$3 \varphi/480v/Induct$	3 φ/480v/Induc	$3 \varphi/480v/synch$
System Information	SAIC/STM	SBP	SES	WGA ADDS	WGA Remote
No. Systems Built	5	11	5	1	1
On-Sun Op (hrs)	6360	40,000	25,050	4000	400
Rated Output (kW)	22	10	25	9.5	81
Peak Output (kW)	22.9	8.5	25.3	11.0	8
Peak Efficiency Net	20%	19%2	29.4%	24.5%	22.5%
Ann Efficiency Net	14.5%	15.7%	24.6%	18.9%	N/A ³
Ann Energy (kWhrs)	36,609	20,252	48,129	17,353	N/A

Table 2 Comparative specifications and performance parameters for DS systems

¹The Mod 2 ADDS drives a conventional submersible water pump. The test pump is undersized for the output of the system. Therefore, mirror covers are used to limit output to the pump capacity. ²The SBP system peak efficiency is calculated at its design point of 800 W/m². All other system efficiencies are calculated at their design points of 1000 W/m². ³The Mod 2 system has not operated for 1000 hr.

El más probado de ellos, SES, está basado en el relanzamiento del exitoso disco de McDonnell Douglas que tan buenos resultados obtuvo a comienzos de los años 80. Para ello se ha creado un consorcio industrial denominado SES (Stirling Energy Systems) formado por Boeing como desarrollador del disco y Kockums del motor Stirling. El sistema ha pasado a denominarse SES/Boeing. En su primera fase se han restaurado tres unidades antiguas del disco de McDonnell Douglas que con un nuevo motor y un nuevo sistemas de control se han venido ensayando en las instalaciones que Boeing tiene en Huntington Beach, Los Angeles, California. Posteriormente otras unidades se han estado ensayando en Las Vegas y también en Sudáfrica por parte de la Compañía Sudafricana ESKOM. Estos discos han acumulado más de 25.000 horas de operación desde entonces. La eficiencia de conversión diaria se ha evaluado en 24-27%, y la anual en el 24%, y lo que es mas importante se afirma que se han conseguido disponibilidades promedio a radiación superior a 300 W/m² para los tres discos del 94% (Stone et al., 2001).



Fig. 32 Sistema disco-Stirling SES/Boeing de 25-kW



Fig. 33 Curvas típicas para un día claro en potencia generada a lo largo del dia (izq.) y potencia frente a la irradiancia (dcha) para el disco número 1.



Fig. 34. Producción diaria y eficiencia diaria del sistema SES/Boeing.

El segundo desarrollo es del sistema SunDish promovido por la empresa SAIC, en el proyecto Salt River (Mayette J., Davenport R y Forristall R., 2001). El concentrador sigue el estilo del desarrollado por Lajet, con un total de 16 discos de membrana tensionada que suman un total de 118 m². La membrana es de acero inoxidable y sobre ella se pegan espejos finos de 1 mm de espesor. Las facetas se focalizan mediante el uso de un ventilador que genera vacio en su interior. El receptor es de cavidad con tubos helicoidales refrigerados por hidrógeno.



Fig. 35. Vista del prototipo de SunDish en el emplazamiento.

Se han instalado cuatro unidades de SunDish. La última fue instalada en el vertedero de la reserva India de Pima-Maricopa a mediados de 1999, para poder operarlo en modo híbrido con los gases producidos en el vertedero. Durante el transcurso del programa SunDish, los sistemas han operado más de 5800 horas, despachando 63.574 kWh de electricidad a la red. Los sistemas han acumulado, además, por encima de 600 horas de operación híbrida con gas natural, despachando 6.622 kWh. Su potencia nominal es de 22 kW y el rendimiento neto en punto de diseño del 20%. El sistema ha presentado hasta el momento muchos problemas relacionados con su acoplamiento a la red, con el ajuste del sistema de tracking, el sistema de control y la integración con el gas. La eficiencia anual se reduce al 14.5%.



Fig. 36. Potencia producida por SunDish en función de la irradiancia para un día soleado.

El tercer proyecto a reseñar es el desarrollado por WG Associates, en el Proyecto denominado ADDS (Advanced Dish Development System). WG ha desarrollado el concentrador y SOLO el motor (Diver et al., 2001). Se trata de un sistema de 9 kW con operación híbrida. Las facetas son de sandwich de vidrio soportadas sobre una estructura metálica formando segmentos muy parecidos a los del disco Eurodish. El único disco existente ha sido operado durante 4000 horas en modo totalmente autónomo y despachando electricidad a la red (Mod.1), posteriormente ha sido adaptado para operar en modo remoto como sistema de bombeo (Mod. 2), llevando acumuladas más de 400 horas en este segundo modo.



Figura 37. Vista del disco ADDS de WGAssociates de 9-kW para aplicaciones remotas con posibilidad de hibridación con gas natural En el foco se sitúa el receptor conteniendo un absorbedor de tubos y un motor Stirling con pistones dispuesto en V de la firma SOLO Kleinmotoren.



Fig. 38. Producción frente a la irradiancia para el disco ADDS.

Los resultados de operación de los Modos 1 y 2 se recogen en la Tabla III. Recientemente la tecnología de WG ha sido adquirida por la empresa SES.

6.3 Iniciativas recientes: Infinia Solar y Tessera Solar

Los sistemas han mostrado excelentes eficiencias, pero dado que ha de competir en un mercado de energía distribuida, frente a los sistemas fotovoltaicos y los generadores diesel, han de garantizar competitividad económica y una disponibilidad muy alta. Estos son los enfoques de los proyectos actualmente.

Últimos proyectos, en promoción y/o en construcción:

 <u>Aznalcóllar TH (Abengoa Solar)</u> es una planta solar termoeléctrica de 80 Kwe, con tecnología de disco parabólico, ubicada en la Plataforma Solar de Sanlúcar la Mayor.



Fig. 39.Disco Stirling Planta Aznalcóllar. http:///www.rankingsolar.com

La tecnología de discos parabólicos tiene un alto nivel de innovación y marcado carácter demostrativo, sirviendo el proyecto AZ-TH para la validación, como primer paso, de esta tecnología para la generación de electricidad. Debido a su singularidad, esta planta ha recibido una subvención del Programa de Energías Renovables de la Junta de Andalucía a través de la Agencia de Innovación (IDAE) y la Agencia Andaluza de la Energía (AAE).

La planta está formada por ocho discos parabólicos con motor Stirling de 10 kWe cada uno y que, en conjunto, generarán 120 MWh de electricidad limpia anual. Cada uno de ellos está compuesto por un concentrador solar, un receptor de cavidad, un motor Stirling y un generador. Estos componentes están montados en un seguidor a dos ejes con un sistema de control que, por la implementación de un programa que recoge las ecuaciones de movimiento solar, permite mantener su enfoque al sol de manera constante.

El concentrador solar ha sido desarrollado por Solúcar con tecnología nacional con objeto de encontrar una alternativa viable, tanto tecnológica como económica, a la solución de discos de fibra de vidrio alemanes. Para ello, se ha basado en espejos de alta reflectividad de bajo coste a partir de espejos planos que, en su conjunto, consiguen la esfericidad adecuada para la concentración solar, siendo esta una de las grandes aportaciones al desarrollo de la tecnología nacional.

La función del receptor solar es absorber tanta radiación solar como sea posible mientras que transfiere dicha energía al fluido de trabajo del motor Stirling. Simultáneamente, debe reducir las pérdidas térmicas por radiación y convección. Este elemento está directamente conectado con la cabeza de los cilindros del motor Stirling.

El motor Stirling es un motor de combustión externa en el que los pistones tienen un gas dentro de un circuito cerrado. Dicho gas es calentado y enfriado alternativamente, convirtiendo parte de la energía térmica aportada al fluido en energía mecánica y, mediante su acople a un generador, en electricidad. Este elemento consigue ofrecer los rendimientos más altos en la conversión del calor en energía mecánica con rendimientos del 34%. La temperatura de funcionamiento de los motores Stirling se sitúa entre 650°C y 800°C.

Actualmente Abengoa Solar New Technologies está adentrándose en el desarrollo de un motor Stirling propio, de potencia 25 kWe, contando para ello con el apoyo de diversos centros tecnológicos nacionales.

• <u>Casa del Ángel (Renovalia Energy)</u> en Villarrobledo, es una planta solar termoeléctrica de 1 MW, en construcción con un sistema de Discos Stirling con motor Infinia Corp. de 3 kWe en un pack, con un total de 333 discos Stirling.



Fig. 40. Planta Casa del Ángel, Villarrobledo. http://www.renovaliaenergy.es



Fig. 41. Motor de Infinia. http://www.infiniacorp.com

A principios de 2006, se aprobó en California el proyecto Stirling Energy Systems of Arizona 2 (SES 2). Este proyecto podría tratarse de la primera instalación de envergadura de discos Stirling en el mundo. La planta de 300 MW y un total de 12000

discos reflectores con receptores de hidrógeno, se ubicará en el desierto de Imperial Valley. Cabe esperar que este proyecto marque el despegue del mercado para las turbinas Stirling.

Hay que reseñar otros desarrollos en EE.UU., involucrando a empresas como LaJet, Solar Kinetics, SAIC, Acurex y WG. También hay que destacar la empresa Tessera Solar unida a Stirling Energy System (SES) que tiene varios proyectos en promoción y/o construcción en Estados Unidos, entre los que cabe destacar:

- Imperial Valley (Solar 2), California con la compañía eléctrica San Diego Gas & Electric (SDG&E) de 750MW y 30.000 discos Stirling. Como ampliación de Arizona 2 (SES2).
- <u>Calico (Solar 1)</u>, California con la compañía eléctrica Southern California Edison (SCE) de 850MW y 34.000 discos Stirling.
- <u>Western Ranch Solar</u>, West Texas con la compañía CPS Energy de 27MW y 1.080 discos Stirling.
- La Planta Piloto Maricopa Solar, Arizona con la compañía Salt River Project (SRP) de 1.5 MW y 60 discos Stirling.



Fig. 42. Vista de la planta Maricopa Solar en Arizona, con el disco Suncatcher de Tessera Solar.

Los logros que se están alcanzando (hibridación, optimización de procedimientos de arranque y control, etc.) hacen prever unos costes de generación inferiores a 0.12-0.17 Euro/kWh a corto plazo. No obstante, pese al enorme potencial a largo plazo de esta tecnología, debido a sus elevadas eficiencias y su modularidad, la limitación en cuanto

a su potencia unitaria (inferior a 25 kW) obstaculiza muchas aplicaciones que pretenden la producción eléctrica a gran escala. Así, tienen su aplicación más obvia en la producción de electricidad para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica (bombeo de agua en pozos, suministro de electricidad a núcleos de viviendas rurales, etc.), donde cabe esperar que puedan competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel.

7 POTENCIAL DEL SISTEMA

Los sistemas disco-Stirling presenta un gran potencial a largo plazo, por sus altas eficiencias y su modularidad que los hacen extraordinariamente atractivos desde el punto de vista de la planificación de la inversión. La limitación en cuanto a su potencia unitaria (por debajo de 25 kW) es, no obstante, un obstáculo para muchas aplicaciones que pretenden producción eléctrica a gran escala. Las experiencias de operación se restringen a unas pocas unidades por lo que el riesgo tecnológico es alto. También es limitada la experiencia sobre fiabilidad a partir del número de horas acumuladas de ensayo. Se trata además de un sistema que precisa establecer un sistema de producción en masa para reducir costes de utillajes, sobre todo en los motores, por lo que los costes de la inversión para las primeras plantas son altos y la incertidumbre en su reducción también más elevada, resultando ineludible una estrategia industrial que contemple la exportación hacia un mercado amplio para garantizar su viabilidad.

En la introducción se describía el potencial que se presenta para el sistema en zonas aisladas del área mediterránea y del Suroeste de EEUU, y también se esbozaban los altos precios que todavía presenta esta tecnología. Si bien todavía podrían conseguirse mejoras en las eficiencias de los subsistemas, estas serían ligeras. Es de esperar que mejoren algo los rendimientos del motor aumentando la temperatura del gas. Es de todas formas la reducción de precios de los componentes y el aumento de la disponibilidad, el reto a conseguir en futuros desarrollos. Con condiciones de irradiación de 1.800 a 2.500 kWh/m²/año, se encuentran nichos de utilización en consumos locales con potencias entre 10 y 100 kWe para costes de 5.500 Euro/kW.

En el estudio realizado por SBP para el área del Magreb, se determina un potencial de 550 MWe o lo que es lo mismo 55.000 unidades de 10 kWe.

Si bien los sistemas disco/Stirling han demostrado en varios proyectos su madurez tecnológica, la principal barrera para su comercialización se encuentra en los altos costes de fabricación y en garantizar unos costes mínimos de operación y mantenimiento. El coste del sistema se encuentra actualmente en los 8.000 Euro/kW (instalado) para sistemas con carácter de prototipos, por lo que todavía es difícil extrapolar el coste real para producciones en serie. Para poder conseguir las primeras comercializaciones en áreas aisladas e islas, los costes del sistema deben situarse por debajo de las 5.000 Euro/kW instalado con un nivel de fabricación de 100 a 500 unidades año (1 a 5 MW/año). Algunos estudios reflejan hipótesis de costes en el entorno de los 2.000 Euro/kW asumiendo mayores niveles de fabricación (10.000 unidades/año).



Fig. 43.- Evolución prevista de los sistemas disco Stirling en comparación con otras tecnologías CET.

8 Literatura recomendada

- Adkins, D.R. (1987), Control strategies and hardware used in solar thermal applications, SAND86-1943, Albuquerque, N.M., Sandia National Laboratories, November 1987.
- Alvis, R.L., (1984), Some Solar Dish/Heat Engine Design Consideration. Technical Report SAND84-1698, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Bean, J.R. and R.B. Diver, (1995), Technical status of the dish/stirling joint venture program, SAND95-1082C, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M.
- Becker M., Meinecke W., Geyer M., Trieb F., Blanco M., Romero M., Ferriere A. (2002), Solar Thermal Power Plants, in: The future for Renewable Energy 2: Prospects and Directions, Eurec Agency, James&James Science Publishers Ltd., London, UK. pp. 115-137. ISBN: 1-902916-31-X
- Buck, R., P. Heller and H. Koch, (1996), Receiver development for a Dish-Brayton System, Solar Engineering 1996, ASME 1996, pp. 91-96.
- Diver, R.B., (1987), J. Solar Energy Engineering, 109 (3), 199-204.
- DLR (1992), System comparison and potential of solar thermal installations in the mediterranean area Phase I. Eds. H. Klaiss and F. Staiss, Stuttgart, Germany, Agencia Aerospacial Alemana (DLR), Enero 1992.
- U.S. DOE (1992), SOLAR 2000: A collaborative strategy, Vols. 1 & 2, US DOE, Office of Solar Energy Conversion, Washington, D.C. February 1992.
- U.S. DOE (1993), Solar Thermal Electric Five Year Program Plan, FY 1993 through 1997, US DOE, Office of Solar Energy Conversion, Washington, D.C., April 1993.
- Diver R., Andraka C., Rawlinson K., Thomas G., Goldberg V. (2001), "The Advanced Dish Development system project", Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose April 21-25, 2001, Washington, DC, Ed. S. J. Kleis and C.E. Bingham, ASME, New York (CD-Rom).
- Droher, J.J. and S.E. Squier, *Performance of the Vanguard Solar Dish-Stirling Engine Module*. Technical Report EPRI AP-4608, Electric Power Research Institute, Palo Alto/CA, 1986.
- Garg, H.P., (1987), "Advances in Solar Energy Technology", Vol. 2, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht (Holanda).
- Grasse, W., Hertlein, H.P. and Winter, C.J., (1991), En: "Solar power plants. Fundamentals. Technology. Systems. Economics". Ed. C.J. Winter, R.L. Sizmann and L.L. Vant-Hull.; Springer Verlag.
- Heller P., Baumuller A., Schiel W. (2000). "Eurodish-The next milestone to decrease the costs of dish-Stirling systems towards competitiveness". Proceedings Solar Thermal 2000-Renewable Energy for the New Millennium Conference, Sydney, Australia, 8-10 March, 2000. Eds: H. Kreetz, K. Lovegrove and W. Meike; Australian and New Zealand Solar Energy Society, Sydney; pp. 33-38.
- IEA (2003), "Renewables for power generation. Status and prospects". IEA Publications, Paris (France). 2003 Edition. ISBN: 92-64-01918-9
- Kaneff S. (2000) "Multi-Megawatt dish based solar thermal electricity generating plant with optional co-generation". Proceedings Solar Thermal 2000-Renewable Energy for the New Millennium Conference, Sydney, Australia, 8-10 March, 2000. Eds: H. Kreetz, K. Lovegrove and W. Meike; Australian and New Zealand Solar Energy Society, Sydney; pp. 77-82
- López, C.W. and K.W. Stone, (1992), "Design and performance of the Southern California Edison Stirling Dish", ASME Solar Engineering, Vol. 2, pp. 945-952.
- Luzzi A (2000) "Showcase project: 2 MW Solar Thermal Demonstration Power Plant". Proceedings Solar Thermal 2000-Renewable Energy for the New Millennium Conference, Sydney, Australia, 8-10 March, 2000. Eds: H. Kreetz, K. Lovegrove and W. Meike; Australian and New Zealand Solar Energy Society, Sydney, pp. 77-82

- Mancini T., Heller P., Butler B., Osborn B., Schiel W., Goldberg V., Buck R., Diver R., Andraka C., Moreno J. (2003), "Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status", Int. J. Solar Energy Eng., Vol. 125, pp. 135-151.
- Mayette J., Davenport R, Forristall R. (2001), The Salt River Project SunDish Dish-Stirling System. Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose April 21-25, 2001, Washington, DC, Ed. S. J. Kleis and C.E. Bingham, ASME, New York (CD-Rom).
- Schiel, W., T. Keck, J. Kern and A. Schweitzer (1994), Long term testing of three 9 kW dish/Stirling systems, Solar Engineering 1994, ASME 1994 Solar Engineering Conference, pp. 541-550.
- Stine W., Diver R.B (1994), "A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology", report SAND93-7026; Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- Stone K., Leingang E., Rodriguez G., Paisley J., Nguyen J., Mancini T., Nelving H. (2001), "Performance of the SES/Boeing Dish Stirling System", Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose April 21-25, 2001, Washington, DC, Ed. S. J. Kleis and C.E.. Bingham, ASME, New York (CD-Rom).
- Walker, G., 1980, Stirling Engines, Claredon Press, Oxford, England