

En busca del motor Stirling del siglo XXI

Autores: Iván Mesonero, Susana López,
Cristóbal Villasante, Saioa Herrero de IK4-TEKNIKER

INTRODUCCIÓN

Inventado en el siglo XIX por el reverendo escocés **Robert Stirling**, este motor térmico de ciclo cerrado se resiste a quedar olvidado de nuevo en el cajón de la historia de la ingeniería. La máquina *Stirling* ya fue rescatada del olvido a mediados del siglo XX para ser ingrediente de las recetas de mejora de la eficiencia energética. Las razones, su rendimiento térmico elevado (mayor que el de su duro competidor, el motor de combustión interna) y su versatilidad en cuanto a fuentes de energía utilizables. Este resurgimiento se cocinó en los fogones de *Philips Research Laboratories* en Eindhoven (Holanda) donde se diseñaron, fabricaron y testaron docenas de máquinas Stirling durante alrededor de cuarenta años [1]. Sin duda el trabajo desarrollado por Philips fue la base firme sobre la que los siguientes se apoyaron. Son esos desarrollos los que, de la mano de empresas licenciatarias, han llegado hasta nuestros días.

Propulsado por el ansia de conseguir un sistema de conversión de energía solar a energía eléctrica de máximo rendimiento además de fiable, un nuevo resurgir de estos motores está teniendo lugar durante estos primeros años de siglo. Sin olvidar la aparición de pequeños sistemas de cogeneración domésticos, eficientes y silenciosos, que pretenden convertirse en un electrodoméstico insustituible en nuestras vidas.

Pese a que parte del valioso conocimiento desarrollado durante el siglo pasado ha quedado en cajones a los que puede que no se acceda nunca, en este tiempo se han realizado avances tecnológicos que están esperando a

aplicarse con el objetivo de llegar al motor *Stirling* del siglo XXI. En el presente artículo se presenta un pequeño ejemplo de aplicación de dichos avances así como una revisión del presente y posible futuro de esta extraordinaria máquina.

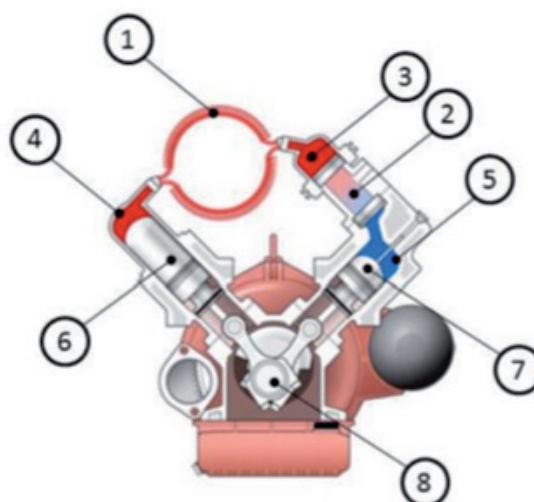
2. EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING

Un motor Stirling es una máquina térmica en la que un gas de trabajo (nitrógeno, helio o hidrógeno habitualmente) describe un ciclo termodinámico conocido como ciclo Stirling. Dicho gas permanece encerrado a presión dentro de la máquina, moviéndose alternativamente dentro de ella y reproduciendo sucesivos ciclos Stirling.

Con objeto de poner cara a una de estas máquinas y facilitar la explicación, se ha incluido la Figura 1. En ella se observan los componentes de un modelo de motor Stirling que actualmente fabrica la empresa sueca *Cleanergy* [2].

La máquina Stirling trabaja entre dos focos térmicos a dos temperaturas diferentes. Esos dos focos de temperatura se materializan en dos intercambiadores de calor, el intercambiador caliente o calentador y el intercambiador frío o enfriador. Así, a través del calentador, el motor se alimenta con energía térmica procedente de una fuente determinada (combustión de gas natural, energía solar concentrada, etc.) mientras que a través del enfriador la energía térmica que no es transformada en trabajo se evacúa al ambiente a través de un fluido refrigerante. Al margen de estos intercambiadores, los motores Stirling disponen de un intercambiador interno encargado de almacenar calor de un ciclo al siguiente. Este intercambiador especial recibe el nombre de regenerador y es muy importante de cara a la eficiencia del sistema.

Junto a los dos intercambiadores que fijan las dos temperaturas de trabajo existen dos cámaras cuyo volumen varía consecuencia del movimiento alternativo de unos pistones en su interior. La presencia de estos pistones provoca que el gas describa el ciclo Stirling entre los dos niveles de temperatura fijados en los intercambiadores. Así en una de las cámaras se produce la compresión del gas de trabajo (parte del ciclo Stirling que consume trabajo) en una fase del ciclo mientras que en la otra cámara se produce la expansión



Nº	Elemento
1	Calentador
2	Enfriador
3	Regenerador
4	Cámara expansión
5	Cámara compresión
6	Pistón desplazador
7	Pistón compresión
8	Cinemática

Figura 1: Componentes del motor Cleanergy Stirling V161

del mismo (parte del ciclo Stirling que produce trabajo) en una fase posterior. Entre la fase de compresión y la de expansión (y entre la de expansión y la de compresión) tiene lugar una fase de desplazamiento del gas de una cámara a la otra que es la encargada de cerrar el ciclo de Stirling.

Finalmente los pistones se unen a un mecanismo o cinemática (biela-manivela, yugo de Ross, etc.) a través del cual se extrae la energía mecánica neta de salida mediante un eje que, si es acoplado a un generador eléctrico, permite obtener energía eléctrica. A los motores Stirling que cumplen con esta última descripción se les conoce como motores cinemáticos.

Existen otro tipo de motores Stirling en los que no se emplean uniones mecánicas. En ellos los pistones oscilan por efecto de la presión y es el propio ciclo de trabajo el que sincroniza el movimiento de los mismos. A estos motores se les conoce como motores de pistón libre y, pese a ser teóricamente simples, su puesta en práctica no es en absoluto sencilla ya que cuestiones como el recorrido de los pistones, la frecuencia de oscilación y otras variables quedan a merced del propio ciclo. En la práctica, los sistemas de pistón libre incorporan muelles mecánicos o de aire para condicionar la frecuencia de oscilación y además suelen incluir generadores lineales acoplados al pistón que extraen la potencia útil e introducen fuerzas que controlan el sistema.

3. FUENTES DE ENERGÍA APROVECHABLES Y APLICACIONES

Por contraposición a los motores de combustión interna, los motores Stirling son conocidos también como motores de combustión externa. Esta designación es consecuencia de que el aporte de energía térmica (combustión u otros) se realiza desde el exterior del motor en lugar de producirse por la inflamación de una mezcla de combustible y aire dentro del mismo. Esta característica presenta la ventaja de poder emplear diferentes fuentes de ener-

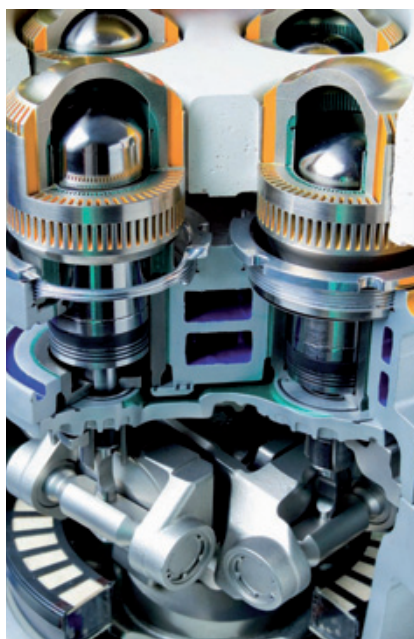


Figura 2: Detalle del interior del motor Whispergen de microcogeneración (Cortesía de EHE)

gía, pero requiere de un diseño específico del calentador acorde con dicha fuente. En consecuencia es posible encontrar desarrollos de motores Stirling en los que las fuentes son tan variadas como el gas natural, la biomasa, la energía solar concentrada o los isóto-



Figura 3: Vista general del motor Microgen de microcogeneración (Cortesía de Microgen)

pos radioactivos. Esta versatilidad de fuentes se emplean en diferentes aplicaciones (estacionarias y no estacionarias) como la producción de energía eléctrica para su inyección en la red, la cogeneración (producción de energía eléctrica y térmica simultánea), la carga de baterías en zonas aisladas de la red eléctrica, la alimentación eléctrica en submarinos de propulsión nuclear, etc.



Figura 4: Detalle del calentador del motor SD4-E de cogeneración (Cortesía de Stirling Denmark)



Figura 5: Motor Cleanergy Stirling V161 de aplicación solar sobre disco parabólico

4. ASPECTOS CLAVE DE LA TECNOLOGÍA STIRLING

4.1. Sellado y estanqueidad

Para la operación de un motor Stirling es fundamental mantener el gas de trabajo dentro del motor en las condiciones de trabajo del mismo. La relación entre alta presión, alta temperatura (zona del calentador y cámara de expansión) y empleo de gases de bajo peso molecular (hidrógeno y helio) con una alta potencia de salida, hacen que la tarea de sellado no sea baladí en este tipo de motores. Así, en aplicaciones de motores solares, presiones medias de gas del orden de 15 MPa y temperaturas de calentador de 650°C son habituales [3].

En los motores cinemáticos en los que se emplean aceites lubricantes el sellado no solo se limita al confinamiento del gas sino que también se extiende al impedimento de la entrada de gotas de aceite en el ciclo que describe el gas. Cuando el sellado no cumple esta función se producen problemas asociados a la carbonización de las gotas de aceite en el calentador como las obturaciones de los estrechos conductos que conforman muchos diseños de intercambiador.

La estanqueidad de la máquina no solo recae en el sellado, también requiere que las diferentes piezas que constituyen el espacio de trabajo del gas lo sean. Por ello la estanqueidad se convierte en un aspecto muy importante en las especificaciones de los diferentes componentes. Las soldaduras de los tubos de los intercambiadores, las paredes fundidas de los cilindros, etc. requieren especial cuidado a la hora de su realización para evitar fugas del gas de trabajo [4].

4.2. Limpieza del ciclo de gas

Esta cuestión que en otras máquinas térmicas puede no ser importante en los motores Stirling se puede calificar como muy importante. La zona en la que el gas de trabajo se va a mover requiere de un cuidado especial a la hora del montaje y de las operaciones de mantenimiento que se puedan rea-

lizar. La ausencia de restos de aceite y grasa, restos de líquidos procedentes del mecanizado, pequeñas partículas metálicas y polvo ha de ser cuidada para conseguir un funcionamiento exento de problemas (obturación de pasos estrechos en los intercambiadores, deterioro de sellados, etc.). Todo ello obliga a una limpieza, inspección y montaje en salas limpias.

4.3. Materiales de alta temperatura

Para una misma máquina térmica funcionando entre dos niveles de temperatura (calentador y enfriador) el rendimiento térmico es mayor cuanto mayor es el salto térmico. La consecuencia práctica de este principio termodinámico se traduce en que resulta deseable alcanzar temperaturas de calentador lo más altas posibles (la temperatura del enfriador viene fijada, en última instancia, por el ambiente exterior). La necesidad de una temperatura elevada y sostenida en el tiempo obliga al empleo de aleaciones metálicas especiales en el calentador y otros elementos como el pistón del lado de expansión (cámara caliente). Este hecho por una parte encarece y por otra complica su fabricación. De esta forma, aleaciones de base níquel como el Inconel suelen ser empleadas habitual-

mente en ciertos componentes de estos motores.

4.4. Control

El conjunto de técnicas que permiten una correcta operación, arranque y parada del motor representa otra de las claves de esta tecnología a la hora de conseguir una máquina fiable. En muchas de las aplicaciones de los motores *Stirling* se tiene capacidad de gestión sobre la fuente de energía de manera que se puede ir cambiando el punto de operación de forma cómoda y segura (por ejemplo en un quemador de gas). Sin embargo en aplicaciones como la solar donde la fuente es variable por naturaleza y los cambios bruscos (en dos segundos la potencia de entrada puede reducirse un 80%) un control rápido y eficaz es necesario.

5. BEMS: EL BANCO DE ENSAYOS DE MOTORES STIRLING DE IK4-TEKNIKER

Tras varios años de trabajo en el ámbito de los motores Stirling y la mirada puesta en la adecuación de las estrategias de control para aplicaciones con fuente variable como la solar, nace el banco de ensayos BEMS. Este

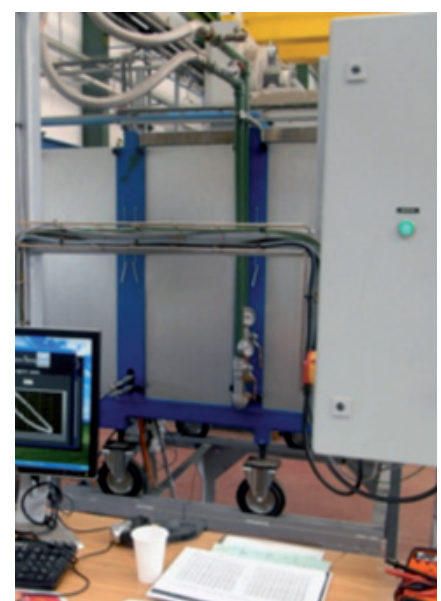


Figura 6: Vista general (izquierda) y de la mesa de control del banco de ensayos BEMS

banco de ensayos desarrollado por IK4-TEKNIKER en colaboración con el CEDER-CIEMAT [5] tiene como objetivo la caracterización y el ensayo de diferentes estrategias de control de este tipo de motores [6].

La instalación de ensayo se encuentra en las dependencias que el CEDER-CIEMAT tiene en Lobia (Soria), dentro de la nave de Procesos de Combustión Térmica.

El banco de ensayos, en esencia, está constituido por:

- Un sistema de calentamiento encargado de alimentar el calentador del motor Stirling mediante un generador de aire caliente industrial
- Una celda de ensayo dentro de la que se encuentra el motor Stirling junto a una serie de subsistemas, sensores y actuadores
- La unidad de operación y control compuesta por los armarios eléctricos y el software de ensayo

El software de ensayo ha sido desarrollado por IK4-TEKNIKER en Lab-View 2011 y permite la operación de la instalación en dos modalidades:

- Modo manual: permite la operación libre del sistema por parte del usuario
- Modo Semiautomático: permite la realización de ensayos de caracterización sistemáticos y seguros, en todo momento guiados por las instrucciones que el software proporciona por pantalla.

En ambos modos el software permite la visualización en tiempo real de los valores de las diferentes magnitudes que caracterizan la operación del motor: temperaturas de calentador y enfriador, presión de trabajo, velocidad de giro, par en el eje de salida, potencia eléctrica vertida a la red, potencia térmica disipada en el circuito de refrigeración, etc. De igual manera todas estas magnitudes pueden ser capturadas para su posterior tratamiento y análisis de resultados.

En la actualidad el motor Stirling que se encuentra montado en el banco de ensayo es un motor V160F, proveniente de un proyecto de investigación

de los años 90 llevado a cabo en las instalaciones del CEDER-CIEMAT [7]. Se trata de un motor cinemático de simple efecto con dos cilindros en V y 160 cm³ de volumen barrido. La potencia eléctrica de salida es de 9 kW funcionando con helio en unas condiciones definidas por: 15MPa de presión media, 650°C en el calentador, 70°C en el líquido refrigerante y 1500rpm de velocidad de giro. El motor posee un calentador especialmente diseñado para el aprovechamiento de una corriente de gases calientes que le permitía, en el proyecto original, emplear como fuente de energía la combustión en lecho fluidizado de biomasa. En la actualidad el calentador se está alimentando con el aire caliente que proporciona un generador industrial que combustiona propano.

El motor V160 es un motor histórico cuya línea de desarrollo proviene de la empresa sueca United Stirling (licenciataria de Philips) y de la estadounidense Stirling Power Systems. Este diseño fue la base a partir de la cual la empresa alemana Solo desarrolló su motor Solo Stirling 161. En la actualidad el testigo de Solo lo ha tomado la empresa sueca Cleanergy. El motor V160 y el posterior V161 (en ambos casos existen versiones de cogenerador a gas natural y versiones solares) es uno de los diseños que más horas de funcionamiento ha acumulado a lo largo de la historia siendo uno de los desarrollos más interesantes para su rango de potencia [3] [8].

El trabajo sobre el banco se centra en la realización de la caracterización completa del motor V160F a diferentes temperaturas, presiones y velocidades de giro. Una vez alcanzado este objetivo, y con la información lograda, se evaluará la viabilidad de emplear estrategias de control modernas que sirvan de alternativa al tradicional control en presión. El control en presión se basa en la modificación de la presión interna en el motor para adaptarse a los cambios en la potencia de entrada. De esta forma ante un aumento de la potencia, el motor inyecta gas en su interior abriendo la comunicación con una

bombona a presión logrando adaptarse al cambio sin poner en peligro el calentador (sobrecalentamiento). En el caso de producirse una disminución de la potencia ocurriría lo contrario, es decir, se extraería gas del interior del motor hacia la bombona. En el caso del empleo de fuentes de energía de gran variabilidad como la solar, el empleo de un control en presión puede provocar una respuesta lenta del sistema afectando negativamente a aspectos como la vida útil del calentador, la fiabilidad del equipo así como su disponibilidad. Esta es la razón por la que se pretende llegar al empleo de modos de control más rápidos y eficaces para este tipo de aplicaciones.

6. SITUACIÓN ACTUAL

En los últimos años la actividad dentro del ámbito de los motores Stirling está teniendo un resurgir reseñable. Este retorno ha venido, en parte, de la mano de la consolidación de una serie de trabajos de las últimas décadas que, silenciosos, han conseguido fructificar en productos de micro-cogeneración doméstica y de cogeneración de pequeña escala que ya han entrado en el mercado del norte y centro de Europa. A esta realidad pertenecen los desarrollos de EHE [9] y Microgen [10] por un lado y los de Stirling Denmark [11] por otro. Los primeros (EHE y Microgen) venden un producto, alimentado por gas natural, para satisfacer las necesidades de agua caliente sanitaria y calefacción de la vivienda a la vez que produce electricidad (1kW). El segundo (Stirling Denmark) ofrece diferentes sistemas capaces de realizar aprovechamientos energéticos de biomasa (gasificación de astillas de madera) orientados a satisfacer las demandas de grandes edificios, pequeñas industrias, calefacciones de distrito, etc. Las potencias eléctricas de salida se encuentran en el rango entre los 35kW (1 unidad) y los 140kW (4 unidades) con potencias térmicas entre 140kW (1 unidad) y los 560kW (4 unidades).

Otro de los condicionantes del re-

surgir ha sido el desarrollo del mercado solar termoelectrico de los últimos años gracias a políticas de primas a la producción de algunos países como el caso de España hasta el año 2012. La obtención de un sistema de pequeña escala pero modular, de gran rendimiento y sin consumo de agua para su refrigeración es el objetivo que muchas empresas persiguen. Diferentes desarrollos disco-Stirling de diferentes potencias pugnan por convencer a inversores de las bondades de sus sistemas de generación eléctrica solar. En esta carrera destacan empresas como Cleanergy [2] con su motor cinemático V161 de 11kW eléctricos de potencia de salida y las estadounidenses Sunpower [12] e Infinia [13] con motores de pistón libre de 3 kW eléctricos. La también estadounidense Solar Energy Systems (SES) ha tenido que abandonar la carrera recientemente al declararse en bancarrota al poco de culminar la instalación de una planta de 60 de sus motores cinemáticos de 25kW eléctricos en Arizona. Ante este panorama de claroscuros, en el último año nuevos e interesantes corredores están apareciendo. Quizá los más destacables sean Mahle Power Train [14] y Ripasso Energy [15] ambos con prototipos de motor de 25kW y 30 kW eléctricos respectivamente. La pertenencia de la alemana Mahle al sector de los componentes de automoción y la relación de la sueca Ripasso Solar con desarrollos de fiabilidad demostrada en el campo de la alimentación eléctrica de submarinos nucleares, hacen poner la mirada en ambas para el futuro.

7. CONCLUSIONES

Las políticas de eficiencia y de incremento del papel de las energías renovables en el *mix* de generación mundial están dando una nueva oportunidad a los motores Stirling. Los micro-cogeneradores y los discos-Stirling son la punta de lanza de esta tecnología pero deben enfrentarse a importantes retos. Así, los primeros deben competir en un mercado con

duros oponentes (sistemas de cogeneración basados en motores de combustión interna, microturbinas, etc.) donde la generalización de normativas de fomento de la autoproducción en más países puede dar cabida a todos ellos. En lo que respecta a los discos-Stirling la aparición de nuevos mercados solares termoelectricos (Sudáfrica, India, Chile, Marruecos, etc.) parecen posibilitar la continuidad de su maduración aunque aspectos como la fiabilidad, la reducción de costes de fabricación y la hibridación con otras fuentes se muestran necesarias para aumentar su disponibilidad y convencer a los inversores.

Aparte de las aplicaciones mencionadas existen otras todavía poco desarrolladas en las que estos motores cuentan con la ventaja de permitir una combustión externa controlada sin efectos negativos dentro del motor. Aprovechamientos energéticos como el de los gases de vertedero, gases procedentes de lodos de depuradora, etc. son ejemplos de algunos de ellos.

En conclusión podemos decir que estamos ante una tecnología con un recorrido y potencial interesante que necesita de un empujón, que solo el músculo financiero de algunas compañías puede darle, para conseguir un grado de desarrollo que le permita afianzarse en nichos de mercado en los que no tendría rival.

PARA SABER MÁS

- [1] Hargreaves, CM. The Philips Stirling engine. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1991. 457p. ISBN: 0-444-88463-7
- [2] <http://www.cleanergy.com/>
- [3] Baumüller A, Schiel W. "Single acting 10kWel Stirling engine applications and results". 8th International Stirling Engine Conference and Exhibition, 1997.
- [4] Baumüller A, Luft S. "Serial production of Stirling Engines. State of the art and difficulties". International Stirling Forum, 2006.
- [5] <http://www.ceder.es/CEDERportal/>
- [6] Mesonero I, López S, Herrero S et al. "New test bench for experimental

characterization of Stirling Engines". 15th International Stirling Engine Conference, 2012.

- [7] Martínez JM, Escalada R, Murillo JM et al. "Development of a Cogeneration Plant by Combustion of Biomass in an AFB Combustor and Heat Conversion into Electricity by a Stirling Engine V-160". 9th European Bioenergy Conference & 1st European Energy from Biomass Technology Exhibition, 1996
- [8] Baumüller A, Lundholm G, Lundström L et al. "Development history of the V160 and Solo161 engines". 9th International Stirling Engine Conference, 1999.
- [9] <http://www.whispergen-europe.com/> y <http://www.ehe.eu>
- [10] <http://www.microgen-engine.com/>
- [11] <http://www.stirling.dk/>
- [12] <http://sunpower.com/index.php>
- [13] <http://www.infiniacorp.com/>
- [14] http://www.mahle-powertrain.com/MAHLE_Powertrain/en/MAHLE-Powertrain/MAHLE-Powertrain-Projects/Project-Helios
- [15] <http://www.ripassoenergy.com/>