



## DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN PROTOTIPO DE MOTOR DE COMBUSTION EXTERNA FUNCIONAL A PARTIR DE BIOMASA

Silvina Manrique<sup>1</sup>, Judith Franco<sup>2</sup>, Virgilio Núñez<sup>3</sup>

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO); Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de Salta (UNSa).

Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED), Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Consejo de Investigaciones de la UNSa. (CIUNSa)

Avda. Bolivia 5150, A 4408 FVY Salta, Argentina

Tel.: 0387-4255533 – E-mail: [silmagda@unsa.edu.ar](mailto:silmagda@unsa.edu.ar)

### RESUMEN

Se propone un sencillo esquema metodológico que considera algunos aspectos básicos de diseño de un motor Stirling experimental que deben ser analizados previo a su construcción. Ciertas cuestiones teóricas son revisadas. Un primer dimensionamiento puede ser realizado mediante simples ecuaciones y análisis termodinámicos elementales. Dicho esquema se aplica en el diseño de un prototipo experimental tipo beta, cuya finalidad proyectada es la generación de energía eléctrica en zonas rurales utilizando biomasa residual agrícola. Se estiman como referencias para su construcción, algunas variables de funcionamiento y de diseño. Los cálculos muestran que es de gran relevancia lograr la presurización del aire –fluido de trabajo- dentro del cilindro principal, para afectar positivamente la fuerza ejercida por el pistón y la potencia de salida. Se estima necesario lograr un diferencial de temperatura de aproximadamente 370°C. Además, el aumento del volumen barrido afecta proporcionalmente a la potencia, lo que deberá considerarse en su construcción.

**PALABRAS CLAVES:** motor combustión externa, Stirling, biomasa, energía renovable, diseño motor, configuración beta.

### INTRODUCCION

Dos aspectos fundamentales –y simultáneos- deberían ser promovidos con el objeto de evitar mayores daños a la atmósfera y al medio ambiente en general. Por un lado, el empleo de fuentes de energía alternativas que deberían gozar de mayor predominio en la matriz energética mundial –actualmente fósil dependiente- y por otro, el desarrollo y aplicación de tecnologías limpias o menos contaminantes (Abdullah et al., 2005).

Las llamadas fuentes de energía renovables involucran una serie de grandes ventajas: su carácter en principio inagotable, su menor efecto contaminante sobre el medio ambiente y la posibilidad de producción descentralizada e independiente. La ley 26190, promulgada en 2007, establece que el 8 % de la matriz energética de la Argentina para el año 2017 debe ser provista por fuentes renovables. Por otra parte, considerando que existen muchas regiones dentro del país –y en otros países- desconectadas de las redes eléctricas principales, la producción de electricidad descentralizada y a pequeña escala a partir de estas fuentes energéticas alternativas, resulta una opción de muy alto interés (Podesser, 1999). En el caso de la ciudad de Salta - enclavada en un valle fértil denominado Valle de Lerma- la biomasa residual agrícola generada a partir de sus principales actividades productivas, se constituye en una alternativa potencial. Plaza et al. (1996) y Fiore (2004) mencionan una superficie promedio anual de 16.000 ha cultivadas con tabaco –cultivo principal del Valle-. Sólo considerando los residuos de este cultivo por campaña, y para una producción promedio de 2000 kg/ha, el Valle contaría con un potencial de 16.000 toneladas de residuos o su equivalente energético aproximado de 313,19 TJ<sup>4</sup> de bioenergía disponible (Manrique et al., 2008). Esto sin considerar otros tipos de residuos generados. Nishiyama et al. (2007) reconocen que desde el punto de vista medioambiental, el uso de biomasa coadyuvará al establecimiento de una sociedad más sustentable, porque la biomasa tiene la ventaja no sólo de ser una fuente renovable, sino también un combustible neutro en la producción de dióxido de carbono. La generación de electricidad desde biomasa, puede jugar un rol muy importante en un futuro cercano por los ventajosos pagos por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el cual busca una necesaria contribución hacia la reducción de niveles de emisión de CO<sub>2</sub> establecidos por el protocolo de Kyoto. Se estima que entre un 8% y 12% de las inversiones en MDL se estima que serán canalizados hacia América Latina representando aproximadamente 3670 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas en el periodo de 2008-2012 (CEBDS, 2002)

Por otra parte, dentro de las tecnologías poco contaminantes y en proceso de recuperación e investigación se encuentran los motores Stirling (Kong et al., 2004; McDowall y Eames, 2007; Tavakolpour et al., 2008; Lean et al, 2009). Estos motores han ganado popularidad en los últimos decenios debido, principalmente, a su conversión no explosiva de la energía a formas mecánicas –y por tanto, su bajo nivel de contaminación comparado con motores de combustión interna (SOLO Stirling Engine, 2002)- y su potencial para aprovechar una variedad de fuentes de energía disponibles tales como la energía solar o la biomasa. Podesser (1999) realiza una evaluación de consideraciones básicas y procesos técnicos de diferentes tecnologías y encuentra que el motor Stirling funcionando a partir de la quema de biomasa debería ser la mejor solución técnica y económica para la producción de energía independiente de la red, en el rango de aproximadamente 5 a 100 kWe. Corria et al. (2006) asumen que el empleo de un motor Stirling a partir de biomasa como fuente de energía en regiones aisladas, proporcionan un servicio estable, no necesita de otras fuentes de generación auxiliar y elimina los altos costos asociados con el consumo y transporte de combustibles fósiles.

<sup>1</sup> Becaria Doctoral del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)

<sup>2</sup> Investigador Adjunto CONICET. Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO)

<sup>3</sup> Director Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)

<sup>4</sup> Terajoule: 10<sup>12</sup>J.

El motor Stirling, patentado en 1816 por Robert Stirling, se hizo popular en la última mitad del siglo diecinueve sobre todo para pequeñas máquinas de uso doméstico -tales como ventiladores de kerosene y bombas de agua- (Karabulut et al., 2009 a). En inicios del siglo veinte, los combustibles fósiles refinados y baratos y los motores de combustión interna cada vez más perfeccionados en base a estos combustibles, superaron por lejos la relación peso-potencia alcanzada con los Stirling (Parlak et al., 2009). Recién un par de décadas más tarde, el holandés Philips comenzó a interesarse en los Stirling modernos. El aumento del precio de los combustibles fósiles junto con el creciente daño ambiental causado por los motores de combustión interna, indujo a muchos otros investigadores a seguirlo. Por otra parte, el desarrollo de nuevas teorías y métodos de análisis, materiales y procesos antes desconocidos, impulsaron la fabricación de diferentes tipos de dispositivos con aplicaciones variadas (Kongtragool y Wongwises, 2007). Actualmente algunas compañías que trabajan con este tipo de motores son STM Corporation, SOLO Kleinmotoren GMBH, Stirling Energy Systems Inc., Kockums Sweden, Sunpower, Inc., Infinia Corporation, y Enatec micro cogen b.v., entre otras.

Sin embargo, las patentes y derechos de propiedad intelectual de los prototipos construidos comercialmente pertenecen a empresas extranjeras, quienes tornan inaccesible este dispositivo para su empleo en comunidades rurales, tanto por los altos costos como así por las dificultades técnicas que puede implicar una tecnología importada (Saravia et al., 2007). Zmudzki y Lipa (2000) afirman que la cantidad de conocimiento disponible con respecto a métodos de diseño y construcción es todavía muy escasa y por lejos, insuficiente. El objetivo del presente trabajo es, por tanto, la elaboración de un sencillo esquema metodológico que permita visualizar los aspectos fundamentales de diseño y avanzar en el dimensionamiento de un prototipo de motor Stirling cuya finalidad, en este caso, es la generación de energía eléctrica. Dicho esquema se utiliza para realizar un diseño preliminar de un prototipo beta que se planifica construir próximamente y ensayar a partir de biomasa, para su empleo en el sector sur del Valle de Lerma, provincia de Salta.

## DESCRIPCION DE LA TECNOLOGIA

### *Principio de funcionamiento de un motor Stirling*

En su descripción más simple, un motor Stirling es un dispositivo que convierte la energía calórica en energía mecánica por compresión y expansión alternativa de un volumen dado de fluido de trabajo (aire, helio, hidrógeno o incluso un líquido) a diferentes temperaturas. El cambio de volúmenes activa un pistón conectado a un cigüeñal, el cual ejerce el trabajo del motor (Boucher et al., 2007).

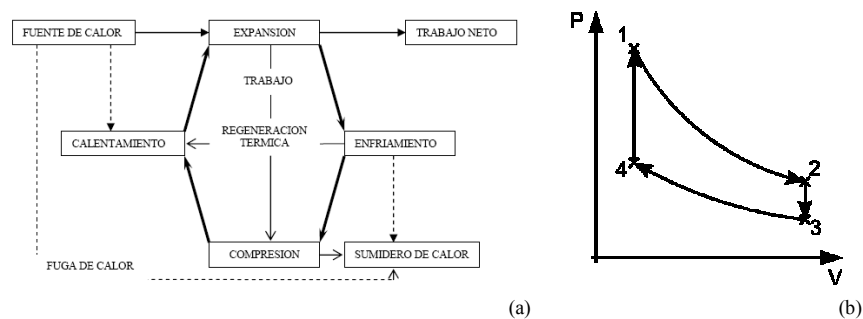


Figura 1. Procesos básicos de un motor Stirling (Martini, 1983) (a) y diagrama del ciclo ideal (Presión-Volumen) (b).

Similarmente a un motor de combustión interna, el motor Stirling está basado en el ciclo de un fluido, que se expande y comprime por calentamiento y enfriamiento con el fin de incrementar la presión. El ciclo Stirling ideal consta de cuatro procesos termodinámicos que actúan sobre el fluido de trabajo (Martini, 1983): 1-2: expansión isotérmica. El espacio de expansión y el intercambiador de calor asociado son mantenidos a temperatura alta constante, y el gas sufre expansión isotérmica absorbiendo el calor desde la fuente de calor; 2-3: remoción de calor isócara (volumen constante). El gas pasa a través del regenerador que absorbe una parte del calor que luego transferirá en el próximo ciclo; 3-4: compresión isotérmica. El espacio de compresión y el intercambiador de calor asociado, son mantenidos a una baja temperatura constante, por lo que el gas sufre compresión isotérmica cediendo el calor a la fuente fría; y 4-1: absorción de calor a volumen constante (isocóra). El gas pasa a través del regenerador de regreso y recupera parte del calor transferido en 2-3, y luego se calentará más en el espacio de expansión. La eficiencia de un motor Stirling puede ser mejorada por el regenerador -material poroso y con una conductividad térmica despreciable- ya que éste puede reciclar algo del calor que es removido desde el gas durante la transferencia hacia el cilindro frío y precalentar el gas cuando éste es transferido hacia el cilindro caliente (Andersen et al., 2006 a y b).

### *Elementos principales del motor*

Los elementos principales del motor básico son: el cilindro, el desplazador, el pistón de trabajo, la biela y el cigüeñal, la camisa refrigerante (Corria et al., 2006). El desplazador sirve para mover el fluido del lado frío al caliente y viceversa, por lo que no entrega ningún trabajo útil al exterior. El pistón es el elemento que entrega trabajo útil y acciona (indirectamente) al desplazador. El movimiento global se asegura por bielas y manivelas que sincronizan pistón con desplazador. Además suele haber un volante que sirve para almacenar energía cinética y hacer todo el movimiento más suave y armónico. El cilindro es la materialización de la cámara de volumen variable: un extremo está abierto hacia los intercambiadores de calor y el otro está cerrado por el émbolo, el cual determina las variaciones de volumen. La forma cilíndrica viene impuesta por la facilidad de la construcción. El material suele ser metálico para una buena conducción térmica, y el grosor de la pared depende de la presión máxima del fluido de trabajo (Dhar, 1999). El émbolo puede ser de tres tipos, según la función que tenga (Flórez y Agramunt, 2002):

- Pistón: es el émbolo que debe resistir una diferencia elevada de presión entre sus dos caras, pero no ha de soportar ningún salto térmico apreciable entre el fluido de trabajo y el exterior.
- Desplazador: es el émbolo que trabaja con presiones muy parecidas en los dos lados, pero que sí soporta un elevado gradiente térmico. Sus paredes metálicas suelen ser delgadas para evitar la conducción y tienen forma redondeada para evitar concentraciones de tensión y fatiga del material, que se encuentra debilitado por la temperatura.
- Mixto (pistón y desplazador): es aquel que ha de soportar un fuerte gradiente térmico y una elevada diferencia de presiones.

*Fortalezas y debilidades de un motor Stirling y su aplicación*

La revisión de literatura sobre este tipo de motores (Carlsen, 2008; Barndhorst y Chapman, 2008) muestra mayor énfasis en las fortalezas que en las debilidades de su aplicación. Entre las primeras, se incluyen aspectos ambientales, tecnológicos, sociales, económicos; mientras que entre las desventajas aparecen sobre todo cuestiones financieras y de escasez de información. Si bien existen asimismo, aspectos tecnológicos que aún deben ser mejorados (Obara et al., 2008), sólo es cuestión de tiempo para que las mejoras se hagan visibles. Sin embargo, estas ventajas aparecen sobre todo para aplicaciones como refrigeración (Chen Xi et al., 2008), calefacción y generación de energía (Hsieh, et al., 2008), campos donde no compite mayormente con los predominantes motores de combustión interna.

Entre las principales fortalezas pueden mencionarse: a) la eficiencia global alcanzada. Existen prototipos con eficiencias eléctricas desde 22-30%, lo cual hace que sean competitivos con otras tecnologías de pequeña capacidad de generación (Wilke y Silva Lora, 2004); b) Bajo ruido y baja vibración de operación. Se pueden construir para un funcionamiento silencioso y sin consumo de aire para propulsión de submarinos o en el espacio (Ishiguro y Guimaraes, 2007); c) Alta confiabilidad y seguridad de operación (Martini, 1983); d) Bajo costo de mantenimiento. Se estima un rango de cerca de 0.008 US\$/kW h, lo cual es mucho menor que valores típicos de motores de combustión interna (0.020 US\$/kW h) (Mc Kenna, 2003); e) Relativamente pocas partes móviles (STM, Power Corporation); f) Simple mecánicamente, arrancan con facilidad (después y después del calentamiento inicial) (Arango, 2006); g) Versatilidad de fuentes de calor: capacidad de múltiples combustibles, incluyendo energías alternativas (Lira Cacho y Zamora, 2007); h) Larga vida (Martini, 1983); i) Menor necesidad de lubricación que otras máquinas alternativas (mecanismos y juntas en el foco frío) (Kyei-Manu y Obodoako, 2006); j) Flexibilidad de aplicaciones: bombeo de agua, cogeneración, refrigeración, entre otras (Clucas y Raine, 1994); k) Bajas emisiones de NOx y CO (Kong et al., 2004); Posibilidad de uso para cogeneración (Kuhn et al., 2008).

Las principales debilidades reconocidas actualmente son: a) el alto costo de inversión de capital principalmente porque son manufacturados en bajas cantidades (Stirling Advantages Inc., 2000) y b) la escasez de información sobre optimización, viabilidad, costos de construcción, sumado a los pocos combustibles que han sido ensayados (Corria et al., 2006).

**ASPECTOS BASICOS DE DISEÑO DEL MOTOR**

El punto de partida para el diseño y dimensionamiento de un motor tipo Stirling, es definir claramente el objetivo que se persigue o tipo de aplicación deseada y la potencia que se pretende lograr: generación de energía eléctrica, automoción, bombeo de agua, refrigeración, etc. A partir de allí se puede determinar cuál es la configuración espacial más apropiada, y optar por la clase de fluido de trabajo que se usará, el tipo y calidad de la fuente de calor, los métodos de refrigeración disponibles. En análisis posteriores, deberán conocerse las revoluciones por minuto (r.p.m.) necesarias, el tamaño y peso mínimo y máximo –si es que existe alguna limitante- y la presión de trabajo.

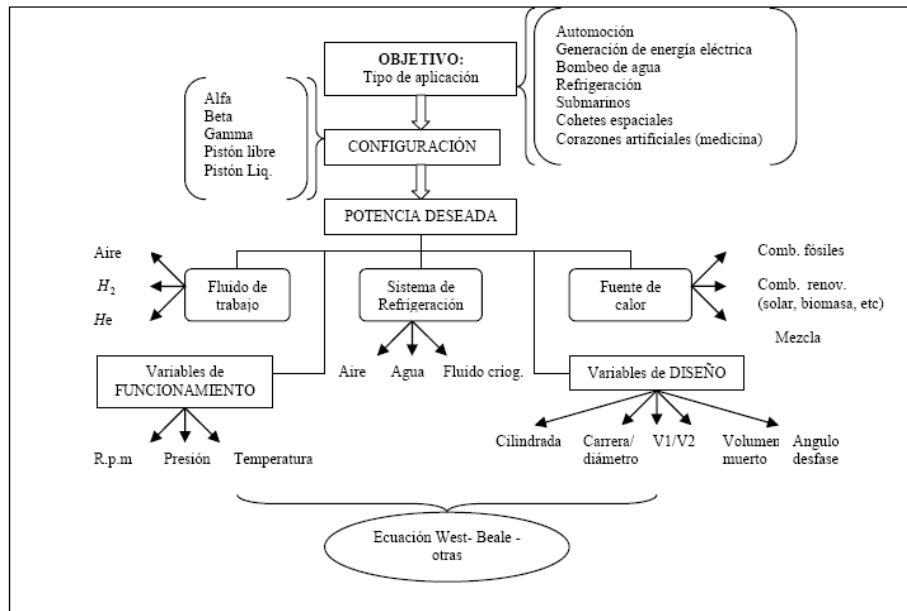


Figura 2. Secuencia metodológica propuesta para el diseño preliminar de un motor tipo Stirling.

Definidas cada una de las cuestiones anteriores, es posible aplicar algunas ecuaciones conocidas relativamente sencillas (Martini, 1983) para obtener una estimación aproximada de los principales parámetros del motor. Entre esas formulaciones, figuran por ejemplo, las ecuaciones de West (1987) o de Beale (Dyson et al., 2004), a partir de las cuales se pueden estimar aspectos básicos como volumen y tamaño físico del motor, o incluso r.p.m. (revoluciones por minuto) y presión, si no estuvieran definidas (Scollo et al., 2008). El esquema metodológico propuesto se resume en la Figura 2. La secuencia lógica de posibles pasos a seguir para el diseño de un motor de ciclo Stirling no se considera exclusiva ni lineal, en la medida en que un cambio en alguno de los aspectos considerados, puede conducir a una revisión de los aspectos previamente definidos. Sin embargo, la organización y clarificación de cuestiones centrales permitirá avanzar en el dimensionamiento del motor en una etapa de boceto.

#### Objetivo de trabajo a partir de un motor Stirling

En la definición del objetivo, no sólo se considera la aplicación, sino también la escala (relacionada asimismo con la potencia de salida). Motores de tipo Stirling se emplean, por ejemplo, en producción de electricidad a escala de hogares individuales (Starr, 2001), distritos o comunidades aislados de la red (Podesser, 1999) y grandes emprendimientos para venta a la red eléctrica (Blanco et al., 2007). Por tanto, es importante precisar la finalidad y alcance del proyecto.

#### Principales Configuraciones de motor Stirling

Según la posición de cilindros, pistones y desplazadores, los motores Stirling presentan diferentes configuraciones. Entre las principales pueden mencionarse (Clucas y Raine, 1994; Barros et al., 2004):

- Configuración *alfa*. De dos cilindros, con dos émbolos: un pistón y un pistón/desplazador, que se mueven en dos cilindros diferentes. Es la configuración más simple, pero presenta el inconveniente de que los dos pistones necesitan ser protegidos por contener el gas. Estos motores pueden ser de múltiples cilindros y de gran potencia, necesarias en aplicaciones automotrices, en donde el peso no es un factor determinante (Kuosa et al., 2007; STM Power, 2009).
- Configuración *beta*. De cilindro único, con dos émbolos: pistón y desplazador. La presión del fluido está soportada sólo por un pistón que trabaja a baja temperatura. Es la clásica configuración de los motores Stirling desde que fue creado en 1816, y la más utilizada en motores de poca potencia –aunque también se ha usado en potencias superiores. El espacio muerto se reduce al mínimo y se obtiene una tasa de compresión y potencia mayor que en el Gamma. Sin embargo, los pistones de desplazamiento y de trabajo están alineados, lo que torna el mecanismo más complicado (Barros et al., 2004; Karabulut et al., 2009 b).
- Configuración *gamma*. De doble cilindro. Los motores beta y gamma son llamados “de desplazamiento”, siendo que el gas de trabajo es movido entre los espacios de alta y baja temperatura por el desplazador. La compresión y expansión se realiza por el pistón de trabajo. En el gamma, la disposición de doble cilindro ofrece más libertad en el diseño de la transmisión hacia un eje giratorio y facilita la construcción y el montaje. Aunque, por el espacio muerto y la menor potencia específica alcanzada, son usados cuando las ventajas de tener cilindros separados sean mayores que las desventajas de potencia específica (Zmudzki y Lipa, 2000; Parlak et al., 2009).

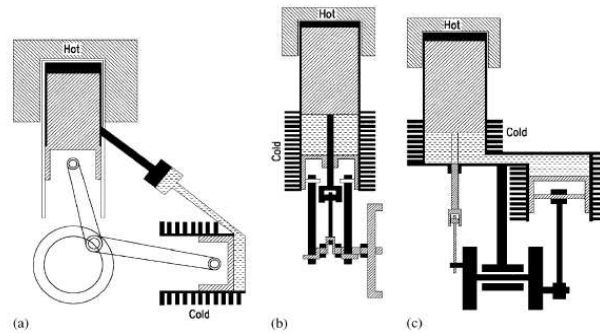


Figura 3. Principales configuraciones de motor Stirling: a) Alfa, b) Beta y c) Gamma (Corria et al., 2006).

Otras configuraciones pueden observarse en West (1987), Dhar (1999), Dyson et al. (2004; 2005), Rogdakis et al. (2004), Karabulut et al. (2006), Brandhorst y Chapman (2008), Chen et al. (2008), entre otros.

#### Fluido de trabajo

Entre los posibles fluidos de trabajo se encuentran diferentes gases, líquidos o fluidos condensantes. La Tabla 1 enumera en forma exhaustiva los tipos de fluidos que pueden ser utilizados en los motores Stirling. Algunos de ellos ya se han experimentado, pero otros son sólo teóricos.

Mono-componente	Mono-fase	Gas	H <sub>2</sub> , He, Ar, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O.
		Líquido	H <sub>2</sub> O, Hg, aceites, alcoholes, CO <sub>2</sub> (l), gasolina ..
	Multi-fase	Fluido condensante	H <sub>2</sub> O(l)+H <sub>2</sub> O(g)..
Multicomponente	Mono-fase	Mezcla de gases	Aire, ...
		Líquido multi-componente	H <sub>2</sub> O+solutos, mezclas..
	Multi-fase	(Gas portador)+ gas disociante	No estudiados
		(Gas portador)+fluido condensante	Aire+H <sub>2</sub> O(l)+H <sub>2</sub> O(g)
		(Gas portador)+fluido condensante-disociante	(Helio)+N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)NO)NO)O <sub>2</sub> ...

Tabla 1. Posibles fluidos de trabajo para motores Stirling (Flórez y Agramunt, 2002).

Sin embargo, el uso de fluidos líquidos impone restricciones sobre los motores Stirling: i) las elevadas presiones exigen paredes gruesas, que hacen al motor más pesado; ii) para evitar las pérdidas térmicas a lo largo de estas paredes, es necesario hacer los cilindros y los pistones muy largos y de poco diámetro; iii) la densidad y la inercia de los líquidos no permiten funcionar a velocidades elevadas (Kyei-Manu y Obodoako, 2006). Por tanto, los gases son los fluidos de trabajo más utilizados (Kuosa et al., 2007), y las propiedades más importantes que se deben tener en cuenta al momento del diseño del motor, son (Clucas y Raine, 1994):

- peso molecular, o masa de las moléculas (g. por mol gramo)
- viscosidad, o resistencia al flujo interno (g/cm<sup>2</sup>/seg). A 800°K y 1 Mpa, es función de la temperatura y la presión.
- conductividad térmica (w/cm<sup>2</sup>/°K/cm) o cantidad de gas que conduce el calor.
- capacidad de calor (J/g°K). Puede ser a presión constante (PC) o volumen constante (VC).

Comparando el aire (Nitrógeno) con otros gases como el Hidrógeno y el Helio (Tabla 2), se puede apreciar que un dado volumen de aire, tendrá una mayor densidad de gas, mayor masa y peso que el mismo volumen de H<sub>2</sub> o He.

	Aire	Hidrógeno	Helio
Peso molecular	29	2	4
Viscosidad	0,00045	0,00019	0,00043
Conductividad térmica	0,00058	0,0037	0,0032
Capacidad de calor (PC)	1,11	14,72	5,20
Capacidad de calor (VC)	0,8235	10,72	3,12

*Tabla 2. Características comparativas del aire, hidrógeno y helio (Altman, 2000)*

La viscosidad afectará las características del flujo y la resistencia del flujo, dependiendo de la temperatura. En este caso, el He y el aire son dos veces más viscosos que el Hidrógeno. Con respecto a la conductividad térmica, el H<sub>2</sub> y el He tienen una conductividad seis veces mayor que el aire. Esto significa que un calentador de tubo diseñado para aire debe tener un diámetro interno mucho menor para que el aire conduzca el calor a todas las moléculas. Por esto, los motores de aire funcionarán bien con H<sub>2</sub> o He pero no a la inversa. El aire sólo puede mantener un cuarto de la cantidad de calor que el He o un duodécimo de la cantidad del H<sub>2</sub>. Por tanto, Hidrógeno y Helio se han consolidado como los fluidos de trabajo más utilizados (Nishiyama et al., 2007; Timoumi et al., 2008). El aire, argón y otros fluidos, sólo se encuentran, actualmente, en pequeños motores demostrativos o experimentales (Altman, 2000; Abdullah et al., 2005).

#### *Sistema de refrigeración*

Los sistemas de refrigeración básicamente pueden ser de tres tipos:

- a) refrigeración por agua: si se dispone de una fuente inagotable de agua a temperatura ambiente (río, lago, red pública, etc.), sólo hace falta bombearla por el interior del refrigerador. Es la solución más eficiente aunque limitada a motores estacionarios (Karabulut et al., 2009a).
- b) refrigeración por aire: en este caso se debe transmitir el calor al aire, y puede hacerse de dos maneras:
  - Convección directa con aire mediante aletas metálicas: la convección puede ser natural o forzada. Es una transmisión poco eficiente y sólo se utiliza en pequeños motores demostrativos o bien en motores lentos y no presurizados que deban funcionar desasistidos durante largos periodos de tiempo (Santos Castilla y Martínez Fernández, 2007).
  - Circuito de agua con radiador: es el sistema más utilizado debido a su eficiencia de transmisión y a la libertad de movimiento que da al motor. Sin embargo, se debe consumir energía para bombear agua e impulsar el aire.
- c) refrigeración mediante un fluido criogénico (nitrógeno o helio líquido) o agua helada. Por supuesto, a medida que se busque menor temperatura, la inversión energética y los costos aumentan, por lo que deben considerarse estos factores en la toma de decisiones.

#### *Fuente de calor*

La flexibilidad de fuentes de calor posibles de utilizarse es uno de los aspectos que colocan a este motor en la mira actualmente. En la medida en que la combustión sea externa, este motor puede funcionar con combustibles que podrían dañar a otros motores (combustión interna) como biogás o siloxanos<sup>5</sup>, aunque su principal interés radica en fuentes de energía renovable como solar, geotérmica, biomasa, etc. En el caso de que la fuente de calor sea algún recurso renovable, deberá realizarse un estudio diagnóstico preliminar que permita caracterizar este recurso y estimar su disponibilidad y energía posible de obtenerse en una zona determinada y para un cierto periodo de tiempo (Manrique et al., 2008).

#### *Variables de funcionamiento*

La utilidad de un motor térmico es convertir la energía calórica en trabajo mecánico. Para esto es necesario conocer la potencia mecánica (W) y el rendimiento ( $\eta$ ), que están en función de las condiciones de trabajo o variables de funcionamiento (Flórez y Agramunt, 2002):

- Velocidad ( $v$ ): entendida como la frecuencia de repetición del ciclo. A bajas r.p.m. un incremento de la velocidad eleva la W. En altas velocidades, las pérdidas aumentan y la W comienza a caer. El  $\eta$  también se ve afectado por las pérdidas del motor (Abdullah et al., 2005). Hay una  $v$  de W<sub>máx</sub> y una  $v$  de  $\eta$  máx, entre las cuales conviene

<sup>5</sup> Compuestos químicos constituidos por unidades de R<sub>2</sub>SiO, donde R son átomos de Hidrógeno o grupos hidrocarbonados.

trabajar. En Stirling no se suele superar los 2500 r.p.m. mientras que en motores de combustión interna se llega fácilmente a 5000 r.p.m. (Boucher et al., 2007).

- Presión media (Pme): El efecto de la presión del fluido de trabajo sobre la W y el  $\eta$  es casi el mismo que el de la velocidad.
- Temperatura del calentador (temperatura máxima,  $T_{\max}$ ): cuanto más alta sea la temperatura más intercambio térmico habrá y por lo tanto se generará más W y el  $\eta$  real del motor crecerá (Cinar et al., 2005).
- Temperatura del refrigerador (temperatura mínima,  $T_{\min}$ ): un incremento de la temperatura del refrigerador, provoca, por tanto, una disminución de la W como del  $\eta$  (Scollo et al., 2008).

#### Variables de diseño

Por otra parte, las prestaciones P y  $\eta$  están también en función de los parámetros que definen la configuración del motor, o variables de diseño (Flórez y Agramunt, 2002):

- Cilindrada (m): es la diferencia entre los volúmenes máximo y mínimo a que se somete todo el fluido de trabajo en cada ciclo. La relación de la cilindrada con la potencia desarrollada es lineal (pero no proporcional). El rendimiento en cambio no se tendría que ver afectado por este parámetro, pero la experiencia demuestra que los pequeños motores demostrativos no dan tan buenos resultados como sus homólogos más grandes.
- Relación de volúmenes barrido ( $V1/V2$ ): es la relación entre el volumen barrido por el pistón de compresión y el barrido por el de expansión.
- Relación carrera-diámetro (c/D): se encuentra alrededor de 0,5 tanto para la cámara de expansión como para la de compresión. Esta relación favorece el intercambio térmico a pesar de que dificulta el diseño.
- Relación de volumen muerto (x): relación entre el volumen muerto (no barrido) y el volumen de la cámara de expansión. El aumento del espacio interior del regenerador y los intercambiadores auxiliares (aumento de x), afecta negativamente a la potencia. Se debe diseñar el motor con un x tan bajo como sea posible (Abdullah et al., 2005).
- Angulo de desfase ( $\alpha$ ): el movimiento de los dos émbolos de un motor Stirling suele ser senoidal<sup>6</sup>, con la misma frecuencia pero con un cierto desfase  $\alpha$ . La potencia presenta un máximo para valores de  $\alpha$  entre 60° y 120°, según el motor.

#### Ecuación de Beale

Una primera aproximación del valor de potencia que puede desarrollar un motor Stirling viene dada por la fórmula de Beale (ec.1) donde W: potencia del motor (W); B: Número de Beale; Pm: presión media del ciclo (bar); F: frecuencia de funcionamiento (Hz); V: volumen barrido por el pistón de potencia (cm<sup>3</sup>) (West, 1987).

$$W = B \cdot P_m \cdot F \cdot V \quad (\text{ec.1})$$

El número de Beale (B) es un parámetro que caracteriza el funcionamiento de motores Stirling y puede ser definido en términos de los parámetros de operación del motor. Para motores que funcionan con una alta diferencia de temperaturas, los valores típicos para el número de Beale se encuentran en el rango de 0.11 a 0.15; donde un número más grande indica un mejor funcionamiento (Dyson et al., 2004). Entre los supuestos básicos para usar esta ecuación, figura la necesidad de contar con un ratio de temperatura de 3:1 desde el calentador al enfriador, lo que demandará que el combustible o fuente de calor sea de alta calidad (alto poder calorífico). Para estimar la potencia de salida del motor, se asumen valores nominales para el número de Beale, presión, volumen del cilindro y frecuencia, y la potencia se calcula como el producto de esos parámetros (Smith, 2007). Puede estimarse r.p.m. (Hz x 60); longitud de la carrera del pistón y diámetro del pistón (raíz cúbica del volumen) o presión de referencia. Esta relación es útil para cálculos preliminares y estudios de viabilidad (Scollo et al., 2008). Es interesante conocer que el rendimiento de motores Stirling reales, bien diseñados y ajustados, trabajando con  $T_{\max}=600^{\circ}\text{C}$  (límite metalúrgico habitual) y  $T_{\min}=20^{\circ}\text{C}$  (temperatura del agua corriente), llega a 33% (Kyei-Manu y Obodoako, 2006). De todas maneras, los primeros prototipos de cualquier modelo todavía no optimizados, suelen proporcionar rendimientos que alcanzan la mitad de este valor o menos (Barros et al., 2004).

#### CALCULO TERMODINAMICO ELEMENTAL DEL PROTOTIPO

Gustav Schmidt fue el primero (en 1871) en realizar análisis sobre los motores Stirling (Martini, 1983), proponiendo un modelo isotérmico ideal que no considera las pérdidas del sistema, que se basa en la Ecuación General de los Gases Ideales (EGGI). Sin entrar en detalle del conjunto de ecuaciones del modelo de Schmidt (pueden consultarse en Urieli y Berchowitz, 1984; Dyson et al., 2004; Machacek, 2005), es posible tener una aproximación termodinámica elemental del funcionamiento del motor, a partir de la aplicación de la EGGI. Si bien los valores reales serán bastante menores a los estimados, ya que el ciclo real no sigue exactamente el teórico y existen roces y fricciones entre el cilindro y el pistón, estos valores sirven como referencia de diseño. Las hipótesis básicas para el cálculo termodinámico del motor son: i) El fluido de trabajo es un gas ideal; ii) La masa total de aire en el motor es constante; iii) Los volúmenes muertos son cero; iv) De existir regenerador, éste se considera perfecto (Parlak et al., 2009).

Las siguientes variables deben ser estimadas:

- Masa del fluido contenido en el motor, calculada como el volumen del fluido dentro del cilindro  $V$  (cm<sup>3</sup>) =  $\pi \cdot r^2 \cdot h$  (cm)/2 (ec.2) y luego la masa como  $m(\text{g}) = P(\text{Pa})V(\text{m}^3)/R$  (J/kg. °K)T(°K) (ec.3), considerando una temperatura media ambiente.
- Presión máxima y mínima sin variación de volumen ( $\Delta V = 0$ ), para un diferencial de temperatura fijado  $P_{\max} = m \cdot R \cdot T_{\max} / V$  y  $P_{\min} = m \cdot R \cdot T_{\min} / V$ .
- Volumen medio de fluido dentro del cilindro  $V_{me} = \pi \cdot r^2 \cdot h / 2 + \pi \cdot \phi^2 \cdot L / 2$ . (ec.4). Cuando hay diferencia de volumen, el nuevo volumen ocurrirá a la mitad de la carrera del pistón de trabajo.

<sup>6</sup> Curva senoidal: gráfica de la función seno.

- d) Volumen máximo y mínimo, donde L (cm) de ec.4 toma valor L/1 y L/0, respectivamente. La presión máxima tenderá a ocurrir a  $V_{mín}$  y  $T_{máx}$  y la presión mínima a  $V_{máx}$  y  $T_{mín}$ .
- e) Masa del fluido de trabajo para un volumen medio a partir de la ec.3.
- f) Presión máxima y mínima para diferencia de volumen real desde ec.3 Si la diferencia de volúmenes aumenta, menor tiende a ser la diferencia de presiones. La presión será máxima con  $T_{máx}$  y  $V_{mín}$ , y será mínima con  $T_{mín}$  y  $V_{máx}$ .
- g) Fuerza a esperar en el pistón de trabajo, conociendo que la fuerza máxima será hacia afuera y estará dada por:  $F=S(P_{máx}-P_{amb})$  o  $F(N)=\pi(\phi/2)^2(P_{máx}-P_{amb})$  (ec.5) y la fuerza mínima  $F=\pi(\phi/2)^2(P_{amb}-P_{mín})$ .
- h) Potencia para una determinada cantidad de ciclos (r.p.m.) y estimar como  $W=J/s=N.m/s=kg.m^2/s^3$  (ec.6). La máxima potencia del motor se tiende a producir a m/m la mitad de la máxima velocidad (Roman, 2007).

### APLICACIÓN DEL ESQUEMA PROPUESTO

Como se mencionara en la introducción, la investigación y experimentación de este tipo de tecnologías poco contaminantes, es fundamentalmente importante para los habitantes de regiones aisladas de la red eléctrica nacional. Esa es la población meta en el presente proyecto: comunidades rurales del interior de la provincia de Salta, principalmente de la zona sur del Valle de Lerma. Esta selección a priori está basada en que el tipo de combustible que se busca emplear es biomasa residual agrícola que se genera en grandes volúmenes en dicho sector geográfico. Existen estudios en la zona que permiten tener una idea del potencial energético disponible a partir de estos residuos (Manrique et al., 2008).

La aplicación de interés en este caso, es la generación de energía eléctrica a nivel de vivienda rural a partir de un motor Stirling acoplado a una caldera de quema de biomasa. Para alcanzar este objetivo se plantea en primer término el diseño de un prototipo de aproximadamente 500W a los fines de su estudio, generación de información y posterior redimensionamiento y construcción. La biomasa residual agrícola es un recurso que se encuentra disperso y posee un poder calorífico inferior al que poseen los tradicionales combustibles fósiles. Por lo tanto, es fundamental que la caldera de biomasa realice la quema eficiente de los recursos que serán aprovechados y recupere toda la energía calórica posible.

El análisis de la experiencia acumulada internacionalmente tanto como la evaluación personal de las distintas configuraciones posibles, permitió optar por un motor Stirling tipo Beta, que posee un sólo cilindro, pocas piezas, y facilidad de operación y mantenimiento. Por ser un motor pequeño no lleva regenerador, únicamente un espacio de algunas décimas de milímetro entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del fluido de trabajo. En este caso, se optó por aire como fluido de trabajo (como así también para el sistema de refrigeración, mediante un sistema de aletas refrigerantes), en la medida en que está mundialmente disponible, es más económico que utilizar cualquier otro tipo de gas (helio o hidrógeno), las juntas para pérdidas de aire son menos costosas y pueden utilizarse productos estándar. Por otra parte, los motores que trabajan con aire como fluido, pueden ser luego empleados con otros tipos de gases, lo que no ocurre a la inversa; diseños a partir de He o H2 no pueden luego emplearse con aire por las características diferenciales de éste. En cuanto al mayor peso de los motores operando con aire como fluido de trabajo, es poco significativo si las aplicaciones son estacionarias (Podesser, 1999).

La aplicación de la secuencia metodológica de diseño del motor permite definir algunas de las principales variables del prototipo en proceso de diseño y dimensionamiento, predefiniendo la potencia y estimando los restantes parámetros (Tabla 3).

En este punto, se supone un fluido de trabajo presurizado a 1 MPa, lo que se estima que podría lograrse con un compresor a pistón con válvulas de control (Clucas y Raine, 1994). Se asumen 1000 r.p.m., un  $\Delta T=370^{\circ}C$ , y un volumen muerto ideal (cero). El número de Beale utilizado es de 0,11 considerando el menor rendimiento. Una primera aproximación al dimensionamiento del motor sugiere un volumen barrido de 268 cm<sup>3</sup>, con una carrera del pistón de trabajo de 6 cm y un diámetro del pistón de 12 cm aproximadamente. Si la presión de trabajo puede establecerse en un valor mayor, el volumen de barrido necesario podría reducirse mediante la siguiente relación:

$$V(cm^3) = 267,12x^{-1,0005}$$

Características del prototipo		Unidad
Tipo de motor	Beta	-
Potencia deseada	500	Watt
Fluido de trabajo	aire	-
Sistema de refrigeración	aire	-
Fuente de calor	biomasa	-
Frecuencia	17	Hz
Presión media	1	MPa
Temperatura máxima	400	°C
Temperatura mínima	30	°C
Volumen barrido	268	cm <sup>3</sup>
Carrera/diámetro	0,5	-
Volumen muerto	0	-
Angulo de desfase	90	Grados

Tabla 3. Especificaciones de diseño del prototipo de motor Stirling

Dado que la potencia de salida está directamente relacionada con la presión, el volumen, la velocidad y el número de Beale, se pueden obtener las ecuaciones lineales que relacionan estos parámetros y realizar un rápido análisis de sensibilidad observando la potencia de salida al variar las condiciones de trabajo. El número de Beale, en condiciones experimentales, se

considera en su valor inferior (0,11). Las ecuaciones 1,2 y 3, se obtuvieron manteniendo los demás parámetros de la Ecuación de Beale con los valores predefinidos que figuran en la Tabla 3.

Potencia (W) en función de la presión de trabajo (Mpa):  $W = 501,19x - 0,2935$

Potencia en función del volumen barrido por el pistón (cm<sup>3</sup>):  $W = 1,871x - 0,1$

Potencia en función de la velocidad (Hz):  $W = 29,48x + 0,1431$

Las condiciones internas de funcionamiento del motor, se pueden aproximar con el análisis termodinámico. Estimaciones de volumen máximo y mínimo, presión máxima y mínima y masa del fluido, permiten observar cómo varía la fuerza en el pistón de trabajo, y por tanto, la potencia que podría lograrse en el motor. Para los datos de la Tabla 3, se tiene:

	Estimaciones		Condiciones		
	Valor	Unidad	Presión	Temperatura	Volumen
<b>Sin diferencia de volumen</b>					
Masa del fluido	3,13.10 <sup>-3</sup>	Gramos	1 MPa	Ambiente (25°C)	Mínimo (268 cm <sup>3</sup> )
Presión máxima	2,25	MPa		Máxima (400°C)	Mínimo
Presión mínima	1,01	MPa		Mínima (30°C)	Máximo
Volumen mínimo	268	Cm <sup>3</sup>	Máxima	Máxima	
Volumen medio	536	Cm <sup>3</sup>	Media	Media (185°C)	
Volumen máximo	947	Cm <sup>3</sup>	Mínima	Mínima	
<b>Con diferencia de volumen</b>					
Masa del fluido	4,07.10 <sup>-3</sup>	Gramos	1 MPa	Media	Medio (536 cm <sup>3</sup> )
Presión máxima	2,93	MPa		Máxima	Mínimo
Presión mínima	0,3	MPa		Mínima	Máximo (947 cm <sup>3</sup> )
Fuerza máxima	5465	N	Máxima	Máxima	Mínimo
Fuerza mínima	1770	N	Mínima	Mínima	Máximo

Tabla 4. Estimaciones teóricas de aspectos termodinámicos del motor proyectado.

En un principio, se dispondría en promedio de 3600 N. La potencia lograda en el eje, dependerá de las r.p.m., las T<sub>máx</sub> y mín y la presión media lograda. La velocidad nominal del motor depende de muchos parámetros: diámetro del cilindro, carrera de los pistones, relación de compresión del motor, relación de temperaturas entre las zonas caliente y fría, fluido de trabajo, etc., por lo que no existe una fórmula específica para predecir la velocidad nominal de un motor; esto obviamente dificulta el diseño, porque básicamente de este parámetro depende la potencia del motor (Kongtragool y Wongwises, 2006). Es difícil predecir la velocidad a alcanzar, por tanto, pero sí puede medirse fácilmente una vez construido.

Es importante considerar que existe una resistencia térmica a superar tanto en el calentamiento como enfriamiento del fluido. Es decir, realmente se calienta y se enfría menos de lo teórico. Por otra parte, la búsqueda de un buen rendimiento energético exige que las T<sub>máx</sub> y T<sub>mín</sub> entre las que trabaja el motor sean tan distantes como se pueda (Clucas y Raine, 1994). Como generalmente la T<sub>mín</sub> es la temperatura ambiente, se busca que T<sub>máx</sub> sea tan alta como sea posible. Pero en este caso, T<sub>máx</sub> tendrá un límite dado principalmente por el tipo de combustible a utilizar y el máximo calor alcanzado en la estufa, y como límite superior, la resistencia de los materiales generalmente metales, que son buenos conductores térmicos. Por otra parte, mantener la presión en 1 MPa, implicará un mecanismo de recuperación de la presión durante el funcionamiento, como así, el montaje de un compresor al motor que posiblemente resultará complicado, y quizás, hasta poco práctico en aplicaciones rurales. Sin embargo, diferentes alternativas pueden ser ensayadas. Cabe destacar que en estas simulaciones no se consideran las pérdidas de energía, que en los motores Stirling son debido a procesos termodinámicos y mecánicos (Tlili et al., 2008). Esto se debe, principalmente, a que la compresión y expansión no son adiabáticas y que los intercambiadores de calor no son ideales. Sin embargo, los valores obtenidos sirven como referencia de diseño.

## CONCLUSIONES

El motor Stirling de combustión externa, resulta una alternativa promisoría para ámbitos rurales, por su versatilidad de fuentes de calor y facilidad de operación. Sin embargo, las patentes y derechos de propiedad intelectual de los prototipos construidos comercialmente pertenecen a empresas extranjeras, quienes tornan inaccesible este dispositivo para su empleo en comunidades rurales, por los altos costos de venta como así, por las dificultades técnicas que puede implicar una tecnología importada. Este trabajo comprueba que se puede realizar el diseño y dimensionamiento de un prototipo local, y plantea un sencillo esquema metodológico y amplia revisión de temas básicos determinantes para proyectar su construcción.

Los cálculos muestran que es de gran relevancia lograr la presurización del aire –fluido de trabajo- dentro del cilindro principal, para afectar positivamente la fuerza ejercida por el pistón de trabajo y la potencia de salida. Se estima necesario lograr un diferencial de temperatura de 370°C aproximadamente. Además, aumentar el volumen barrido afecta proporcionalmente a la potencia, lo que deberá considerarse en su construcción. Si la velocidad de trabajo puede alcanzar por lo menos el 50% de lo estimado, y los parámetros mencionados logran maximizarse, se estima obtener una potencia útil.

Este trabajo se considera la base de partida para proyectar la construcción de un prototipo experimental que permita evaluar los aspectos teóricos mencionados, como así, lograr mediciones experimentales. Ese es el objetivo próximo de los autores.

## ABSTRACT

One proposes a simple methodological scheme that considers some basic aspects of design of an engine experimental Stirling that they must be analyzed before your construction. Certain theoretical questions are checked. The first scaling can be



realized by means of simple equations and thermodynamic elementary analyses. The above mentioned scheme applies to itself in the design of an experimental prototype type beta, which projected purpose is the generation of electric power in rural zones using residual agricultural biomass. They are estimated as references to construction, some variables of functioning and of design. The calculations show that is of great relevancy to achieve the pressurization of the air - fluid of work - inside the principal cylinder, to affect positively the force exercised by the piston and the power of exit. It considers necessary to achieve the differential one of temperature of 370°C approximately. In addition, to increase the swept volume affects proportionally to the power, which will have to be considered in the construction.

**KEYWORDS:** external combustion engine, Stirling, biomass, renewable energy, engine design, b-type Stirling Engine.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia y Técnica de la Nación (MinCyT), por el financiamiento parcial otorgado al presente proyecto, bajo el Convenio E655/07/Bis2 PET30. A los Institutos INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) e INENCO (Instituto de Investigación en Energías no Convencionales) por su participación en el proyecto. Asimismo, este estudio se llevó a cabo en el marco de los proyectos 1345 y 1643 del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA), y desarrollado con el soporte de una beca doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), otorgada a la autora principal del presente. Se agradece particularmente a los auxiliares de investigación por sus contribuciones y participación; y a José Alcorta, Ricardo Echazú, Aldo Nioi y Vicente Morillo, por sus aportes técnicos.

## REFERENCIAS

- ABDULLAH, S. ; B.F. YOUSIF; K. SOPIAN. 2005. Design consideration of low temperature differential double-acting Stirling engine for solar application. Technical Note. Renewable Energy 30 (2005) 1923–1941.
- ALTMAN, A. 2000. “Stirling Engine Heat Transfer – A Snappy Primer”. Savannah, Georgia.
- ANDERSEN, S.K.; CARLSEN, H.Y P.G. THOMSEN. 2006. a. Numerical study on optimal Stirling engine regenerator matrix designs taking into account the effects of matrix temperature oscillations, Energy Conversion Management 47: 894–908.
- ANDERSEN, S.K.; H. CARLSEN, P.G. THOMSEN. 2006.b. Preliminary results from simulations of temperature oscillations in Stirling engine regenerator matrices. Energy 31, 1371–1383.
- ARANGO, J. 2006. Diseño y fabricación de un prototipo de motor Stirling. Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica. Rea de Diseño. Medellín. Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico.
- BARROS, R.W.; ARADAS, M.E.C.; COBAS, V.R.M. Y E.E.SILVA LORA. 2004. Uso De Biomassa Como Combustível Para Acionamento De Motores Stirling. In: Agrener, Campinas. Disponible en <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%2032.pdf>.
- BLANCO, J.D.; FERRER, C.B.; LOPEZ, J.P.; D.V. SANIN. 2007. Motor Stirling: Alternativa Energética Como Posible Solución A La Problemática Ambiental. Disponible en [www.convena.upb.edu.co/ingeniar/documentos/.../MOTORSTIRLING.pdf](http://www.convena.upb.edu.co/ingeniar/documentos/.../MOTORSTIRLING.pdf)
- BOUCHER, J.; F. LANZETTA Y P. NIKA. 2007. Optimization of a dual free piston Stirling engine. Applied Thermal Engineering 27: 802–811.
- BRANDHORST, H.W. Jr y P.A. CHAPMAN Jr. 2008. New5kWfree-piston Stirling space convertor developments. Acta Astronautica 63:342 – 347.
- CARLSEN, H. 2008. Stirling Engine And Bioenergy. Helsinki University of Technology. 23. October 2008. Disponible en [http://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/ene-39.4006/.../stirling\\_bio\\_2.pdf](http://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/ene-39.4006/.../stirling_bio_2.pdf).
- CEBDS. Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentavel. 2002. Mercado de Carbono. www.cebdes.com.
- CHEN XI; WU, Y.N., ZHANG, H., CHEN, N., 2008. Study on the phase shift characteristic of the pneumatic Stirling cryocooler, Cryogenics (2008), doi: 10.1016/j.cryogenics.2008.10.015.
- CINAR, C.; S. YUCESU; T. TOPGUL; M. OKUR. 2005. Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure. Applied Energy 81,351–357.
- CLUCAS, D.M.; J.K. RAINE. 1994. Development of a hermetically sealed Stirling Enghien battery charger. Journal of mechanical Engineering Science 208, 357-366.
- CORRIA, M.E., COBAS, V.M. Y E. SILVA LORA. 2006. Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil. Energy Policy 34 (2006) 3402–3408.
- DHAR, M. 1999. Stirling Space Engine Program. Volume ImFinal Report. Mechanical Technology Inc., Latham, New York. Prepared under Contract NAS3-25463. National Aeronautics and Space Administration. Glenn Research Center. NASA / CR--1999-209164/Vol1.
- DYSON, R.W.; S.D. WILSON Y R.C. TEW. 2004. Review of Computational Stirling Analysis Methods. NASA/TM—2004-213300.AIAA–2004–5582. Prepared for the Second International Energy Conversion Engineering Conference sponsored by the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Providence, Rhode Island. National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center. Available electronically at <http://gltrs.grc.nasa.gov>.
- DYSON RW; WILSON SD; TEW RC; R. DEMKO. 2005. Fast Whole-Engine Stirling Analysis. Glenn Research Center, NASA.Prepared for the Third International Energy Conversion Engineering Conference sponsored by the American Institute of Aeronautics and Astronautics San Francisco, California. Available electronically at <http://gltrs.grc.nasa.gov>.
- FIORE, I. 2004. El cultivo del tabaco en el Valle de Lerma, Salta. Hoja informativa N°22. INTA EEA Valle de Lerma. Salta.
- FLÓREZ, J.A. Y I.C. AGRAMUNT, Ed. 2002. Motor Stirling, cap. 8. En: Máquinas térmicas motoras 1. Ediciones UPC. Barcelona.260 p.
- HSIEH, Y.C.; HSU, T.C. Y J.S.CHIU. 2008. Integration of a free-piston Stirling engine and a moving grate incinerator. Renewable Energy 33, 48–54.
- ISHIGURO, Y. Y L. GUIMARÃES. 2007. Missões Espaciais E A Energia Nuclear. Parte VIII. Outras Áreas de Pesquisas Atuais. Ministério Da Defesa Comando Da Aeronáutica. Comando-Geral De Tecnologia Aeroespacial Instituto De Estudos Avançados. Divisão De Energia Nuclear. P08/08 – 14 de março de 2007.
- KARABULUT, H., YUCESU, H.S.; CINAR, C. Y F. AKSOY. 2009. a. An experimental study on the development of a b-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources. Applied Energy 86, 68–73.
- KARABULUT, H.; AKSOY, F. Y E.OZTURK. 2009. b. Thermodynamic analysis of a b type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever. Renewable Energy 34, 202–208.
- KARABULUT, H.; YUCESU, H.S. Y C. CINAR. 2006. Nodal analysis of a Stirling engine with concentric piston and displacer. Technical Note. Renewable Energy 31 (2006) 2188–2197.
- KONG, X.Q.; R.Z. WANG Y X.H. HUANG. 2004. Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine. Energy Conversion and Management 45: 1433–1442.
- KONGTRAGOOL, B.Y S.WONGWISES. 2006. Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. Technical note. Renewable Energy 31, 345–359.

- KONGTRAGOOL, B.Y S.WONGWISES. 2007. Performance of low-temperature differential Stirling engines. *Renewable Energy* 32, 547–566.
- KUHN,V.; J. KLEMES Y I. BULATOV. 2008. MicroCHP: Overview of selected technologies, products and field test results. *Applied Thermal Engineering* 28: 2039–2048.
- KUOSA, M.; KAIKKO, J. Y L. KOSKELAINEN. 2007. The impact of heat exchanger fouling on the optimum operation and maintenance of the Stirling engine. *Applied Thermal Engineering* 27, 1671–1676.
- KYEI-MANU, F. y A. OBODOAKO. 2006. Design and Development of a Liquid Piston Stirling Engine. E90 Senior Design Project Report. Advisor: Professor Carr Everbach. Available in [www.engin.swarthmore.edu/.../e90/.../E90Reports/FK\\_AO\\_Final.pdf](http://www.engin.swarthmore.edu/.../e90/.../E90Reports/FK_AO_Final.pdf)
- LE'AN, S.; YUANYANG, Z.; LIANSHENG, L. Y S.PENGCHENG. 2009. Performance of a prototype Stirling domestic refrigerator. *Applied Thermal Engineering* 29, 210–215.
- LIRA CACHO, J.G. Y V.R. AGUERO ZAMORA. 2007. Generación de energía eléctrica con un motor Stirling empleando un combustible gaseoso. 8º Congreso Iberoamericano De Engenharia Mecanica. Cusco, 23 a 25 de Octubre de 2007.
- MACHACEK, J. 2005. ANALYSIS OF STIRLING ENGINE CHARACTERISTICS BY SCHMIDT'S THEORY. Doctoral Degree Programme (2). Dept. of Electrical Power Engineering, FEEC, BUT. Available in [www.feec.vutbr.cz/EEICT/2005/sbornik/.../08-machys.pdf](http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2005/sbornik/.../08-machys.pdf).
- MANRIQUE, S.; FRANCO, J.; NÚÑEZ, V. Y L. SEGHEZZO. 2008. Potencial Energético De Biomasa Residual De Tabaco Y Aji En El Municipio De Coronel Moldes (Salta – Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA* Vol. 12, 06.87 a 06.94. Impreso en Argentina. ISSN 0329-5184.
- MARTINI, W.R. 1983. Stirling Engine Design Manual. Second Edition. DOE/NASA/3194--INASA. Martini Engineering. Prepared for National Aeronautics and Space admisnitration. Lewis Research Center Under Grant NSG-3194 for U.S. Department of energy. Conservation and Renewable Energy Office of Vehicle and Engine R&D.
- MCDOWALL Y M. EAMES. 2007. Towards a sustainable hydrogen economy:Amulti-criteria sustainability appraisal of competing hydrogen futures. *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 4611 – 4626
- MC-KENNA, J., 2003. Game changer: Stirling engines at landfills, Landfill Methane Outreach Program. 6th Annual Conference and Project Expo. Disponible en [www.p2pays.org/ref/05/04566.pdf](http://www.p2pays.org/ref/05/04566.pdf).
- NISHIYAMA, A.; SHIMOJIMA, H.; ISHIKAWA, A.; ITAYA, Y.; KAMBARA, S.; MORITOMI, H. Y S. MORI. 2007. Fuel and emissions properties of Stirling engine operated with wood powder. *Fuel* 86, 2333–2342.
- OBARA, S.; TANNO, I.; KITO, S.; HOSHI, A. Y S. SASAKI. 2008. Exergy analysis of the woody biomass Stirling engine and PEM-FC combined system with exhaust heat reforming. *International Journal Of Hydrogen Energy* 33, 2289 – 2299.
- PALSSON, M. Y H. CARLSEN. 2003. Development of de wood powder fuelled 35 kW Striling CHP unit. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Energy Engineering. In book: Proceedings of the 11th International Stirling Engine Conference, pages: 7pp, 2003. Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Rome. Available in [http://www.vok.lth.se/~ce/Research/stirling/papers/ST\\_TA2\\_5.pdf](http://www.vok.lth.se/~ce/Research/stirling/papers/ST_TA2_5.pdf).
- PARLAK, N., WAGNER, A.; ELSNER, M. Y H.S. SOYHAN. 2009. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in non-ideal adiabatic conditions. *Renewable Energy* 34, 266–273.
- PLAZA, G.; PACHECO, O. y P. ROBREDO. 1996. Residuos En El Valle De Lerma (Salta - Argentina). In: Asociación Argentina de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Trabajos presentados al congreso. Buenos Aires, AIDIS, 1996. p.263-81, ID. 51583. Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, 9, Córdoba, 2-6 jun. 1996.
- PODESSER, E. 1999. Electricity production in rural villages with biomass Stirling-engines. *Renew Energy* 1999;16:1049–52.
- ROGDAKIS,E.D.; N.A. BORMPILAS Y I.K. KONIAKOS. 2004. A thermodynamic study for the optimization of stable operation of free piston Stirling engines. *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 575–593.
- ROMAN, R. 2007. Conceptos Básicos para Diseño de motor Stirling con baja diferencia de temperatura. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile.
- SANTOS CASTILLA, F.J. Y A.J. MARTINEZ FERNANDEZ. 2007.El poder de la Concentración: Generador Termovoltaiico GT-SPS 1,1 Kw. Instituto de Investigaciones Ecológicas (INIEC). Available in <http://www.ask-eu.net/default.asp?Menu=144&Bereich=6&SubBereich=24&ArtikelPPV=9994>.
- SARAVIA, L.; DE SARAVIA, D.A.;R.ECHAZÚ Y G. ALCORTA. 2007. La simulación de sistemas termomecánicos solares con el programa SIMUSOL, el motor Stirling: simulación y construcción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- SCOLLO, L.; VALDEZ, P. Y J. BARON. 2008. Design and construction of a Stirling engine prototype. *Internati Onal Journal Of Hydrogen Energy* 33, 3506 – 3510.
- SMITH, P.F. 2007. Sustainability at the Cutting Edge: Emerging Technologies for Low Energy Buildings. Jordan Hill, Oxford, England: Architectural Press.
- SOLO Stirling Engine. 2002. Technical Documentacion. CD. Best.No:990416102. Sindelfingen, Germany.
- STARR, F. 2001. "Power for the People: Stirling Engines for Domestic CHP". *Ingenia* (8): 27–32. <http://www.ingenia.org.uk/ingenia/issues/issue8/Starr.pdf>. Retrieved on 2009-01-18.
- STIRLING ADVANTAGES Inc., 2000. [www.stirlingadvantage.com](http://www.stirlingadvantage.com). OR, USA.
- STM POWER corporation. <http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/usa/new2.html>.
- TAVAKOLPOUR, A.R.; ZOMORODIAN, A. Y A.A.GOLNESHAN. 2008. Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator. *Renewable Energy* 33, 77–87.
- TIMOUMI, Y.; TLILI, I. Y S.B. NASRALLAH. 2008.a. Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines. *Review Energy* 33, 1100–1114.
- TIMOUMI, Y.; TLILI, I. Y S.B. NASRALLAH. 2008.b. Performance optimization of Stirling engines. Technical Note. *Renewable Energy* 33 (2008) 2134–2144.
- TLILI, I.; TIMOUMI, Y. Y S.B. NASRALLAH. 2008. Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application. *Renewable Energy* 33, 1911–1921.
- URIELI, I. Y D.M. BERCHOWITZ. 1984. Stirling Cycle Engine Analysis, British library cataloguing in publication Data, ISBN: 0-85274-435-8.
- WEST, C.D. 1987. Stirling Engines And Irrigation Pumping. Prepared for the Office of Energy. Bureau for Science and Technology. United States Agency for International Development under Interagency Agreement No. DOE 1690-1690-AI. Prepared by the Oak Ridge National Laboratory. Operated By Martin Marietta Energy Systems, Inc. For The U.S. Department Of Energy Under Contract De-Ac05-840r21400. ORNL/Tm-10475.
- WILKE, H. Y E.E. SILVA LORA. 2004. Desenvolvimento De Um Módulo Combustor Biomassa-Motor Stirling Aplicado A Sistemas De Geração Isolada E Baseados Em Gerador De Indução. [www.feaagri.unicamp.br/energia/agre2004/.../Agrener\\_TITULO.pdf](http://www.feaagri.unicamp.br/energia/agre2004/.../Agrener_TITULO.pdf)
- ZMUDZKI, S. Y K. LIPA. 2000. Design and preliminary results of investigations of the experimental Stirling Engine SEPS-1. *Journal of KONES, International Combustion Engines*, 7, 1 y 2.