

CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO STIRLING DE BAJA POTENCIA PARA SU EMPLEO EN ÁMBITOS RURALES A PARTIR DE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Silvina Manrique¹, Judith Franco², Virgilio Núñez³

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

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

Consejo de Investigaciones de la UNSa. (CIUNSA)

Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A 4408 FVY Salta, Argentina

Tel.: 0387-4255533 – E-mail: silmagda@unsa.edu.ar

RESUMEN

Se presentan resultados preliminares experimentales y teóricos de la construcción y puesta en funcionamiento de un prototipo de motor Stirling de configuración beta, para generación de energía eléctrica. El prototipo construido tiene una potencia de salida de 30 W, girando a una velocidad de 180 r.p.m. y a partir de una temperatura en el foco caliente de alrededor de 400 °C. El fluido de trabajo, como así el sistema de refrigeración, es mediante aire. El volumen barrido por el desplazador es de 392 cm³. La fuente de calor se obtiene de la combustión de biomasa, realizada en una caldera de ladrillo refractario confeccionada para tal fin. Asimismo, otras fuentes de energía renovable pueden ser utilizadas. Se considera necesaria mayor experimentación y ajustes del motor, para alcanzar una potencia superior, en la búsqueda de viabilizar su aplicación en viviendas rurales.

PALABRAS CLAVES: Stirling, construcción, energía renovable, biomasa, configuración beta, motor de combustión externa.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, hay una fuerte presión por desarrollar sistemas de producción y transformación de energía descentralizados y a partir de fuentes renovables, como la biomasa. Por otra parte, la demanda mundial en aumento por tecnologías menos contaminantes de energía ha guiado a un renovado interés en el uso del motor Stirling, entre otros. El motor Stirling, inventado en 1816 por Robert Stirling, es un motor de combustión externa, con un ciclo termodinámico cerrado con secuencias de expansión y compresión del fluido de trabajo a diferentes temperaturas. Por sus ventajas específicas de alta eficiencia, bajas emisiones, flexibilidad de combustibles, bajo ruido, baja contaminación y larga vida, el motor Stirling ha ido atrayendo más y más atención en el mundo. En principio, el motor Stirling es simple en diseño y construcción, y puede ser operado fácilmente (Cinar et al., 2005). Calefacción, refrigeración y generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, son nuevos campos donde los Stirling pueden ser competitivos respecto a otros sistemas (Flórez y Agramunt, 2002).

Numerosas empresas (STM Corporation, SOLO Kleinmotoren GMBH, Stirling Energy Systems Inc., Kockums Sweden, etc.), particulares y departamentos científicos (Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universidad de Kebangsaan Malaysia; Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Dinamarca; Universidad de EAFIT, Colombia; Instituto FEMTO-ST del Departamento de Tecnología de La Universidad de Belfort, Francia, entre otros) están desarrollando programas de diseño y experimentación de motores Stirling. Se han emprendido trabajos en aspectos de simulación de funcionamiento y diseño de estos motores, en sus diferentes configuraciones, mayormente a partir de energía solar. Entre otros, Abdullah et al. (2005) y Tlili et al. (2008) presentan consideraciones de diseño para motores tipo alfa, con base en la Teoría de Schmidt y el análisis de tercer orden y a través del uso de modelos dinámicos con pérdidas de energía y caídas de presión en los intercambiadores de calor. Aspectos de optimización de funcionamiento han sido estudiados por Timoumi et al. (2008 a y b) y Saravia et al. (2007) a partir de simulaciones numéricas y computacionales. También Parlak et al. (2009) y Obara et al. (2008) realizan análisis termodinámicos y exergéticos para la optimización del funcionamiento de estos motores. Más aún, estos motores han sido estudiados en sistemas de cogeneración y trigeneración, en la búsqueda de lograr la máxima eficiencia en el aprovechamiento de la energía (Palsson y Carlsen, 2003; Onovwiona et al., 2007; Nishiyama et al., 2007; Wang et al., 2008).

Asimismo algunos prototipos funcionales a nivel experimental han sido construidos a partir de diferentes métodos de diseño. Tavakolpour et al. (2008) en Irán, utilizan principios de termodinámica y la Teoría de Schmidt, adaptándola para el modelado del motor tipo gamma a partir de energía solar, y realizando simulaciones de funcionamiento para optimizar los parámetros del diseño del motor. Scollo et al. (2008), en Argentina, construyeron un prototipo funcional, diseñado a partir de principios de similitud energética y escalamiento. Sin embargo, pocos ejemplos existen de prototipos funcionales a partir de biomasa. Quizás la experiencia de Prodeser (1999) sea la más mencionada, quien desarrolló un motor Stirling tipo alfa, en Austria, calentado por los gases de combustión de un horno de biomasa. Con una presión del gas de trabajo de 33 bar a 600 r.p.m. y

¹ Becaria Doctoral del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)

² Investigador Adjunto CONICET. Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO)

³ Director Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)

una potencia de salida de 3,2 kW, y eficiencia de 25% se ensayó para aplicaciones rurales. El rendimiento de motores Stirling reales, bien diseñados y ajustados, trabajando con una temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) de 600 °C (límite metalúrgico habitual) y una temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$) de 20 °C (temperatura del agua corriente), llega a 33%. 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). Por otra parte, existen contadas experiencias de construcción y ensayos con motores en su configuración beta, -diseño original de su creador- y cuya fuente de calor sea suministrada por biomasa. Motores tipo beta han sido construidos por Lira Cacho y Zamora (2007) y Karabulut et al. (2009a) de baja potencia y bajo-moderado diferencial de temperatura. En ambos casos, si bien mencionan la posibilidad de su empleo a partir de biomasa, no existen resultados de tales ensayos, ya que los mismos fueron testeados a partir de GLP (gas licuado de petróleo).

Algunos autores mencionan que el conocimiento disponible sobre diseño y construcción de estos motores, es todavía escaso e insuficiente (Zmudzki y Lipa, 2000). Por tanto, como en muchos otros campos de la tecnología, es de fundamental importancia la construcción y experimentación de este tipo de motores. Este es el objetivo del presente trabajo: ensayar la construcción de un prototipo de motor Stirling tipo beta, completamente manufacturado a partir de piezas disponibles en el mercado local, y funcional a partir de una caldera de doble cámara de combustión de residuos de biomasa. La disponibilidad de este recurso en áreas rurales del Valle de Lerma, donde se encuentra la capital de la provincia de Salta, otorgan una alta potencialidad energética a la zona, que carece actualmente de tecnologías poco contaminantes y construidas localmente, que permitan su adecuado aprovechamiento, principalmente para generación de energía eléctrica. Para el dimensionamiento y testeo de temperaturas, fue construida y ensayada una caldera de combustión de biomasa, registrando las máximas temperaturas a lograrse, a partir de diferentes fuentes de calor y tipos de biomasa. Con este proyecto se busca aportar información experimental a partir de un ensayo de construcción local, que permita futuras mejoras para su aplicación en áreas rurales. Aspectos de diseño y dimensionamiento de este prototipo fueron descritos en un trabajo previo (Manrique et al., 2009).

DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

El motor Stirling es un motor de combustión externa, que opera con un fluido motor en un ciclo cerrado, obteniendo trabajo a partir de cuatro procesos cíclicos consecutivos: aporte de calor, expansión con el aporte de calor de la fuente de calor, extracción de calor hacia un acumulador de calor térmico regenerativo, y compresión con extracción de calor hacia el foco frío. El esquema conceptual de un motor Stirling se muestra en la Figura 1, donde el fluido está confinado en un cilindro entre dos pistones opuestos. En medio, dividiendo el espacio, se encuentra al regenerador, que atravesado por el fluido de trabajo, lo condiciona para adecuarlo a la temperatura de la cámara en la que se encuentra. A un lado se dispone la cámara de compresión, a temperatura baja, y en el otro la cámara de expansión, a temperatura alta (Andersen et al., 2006b).

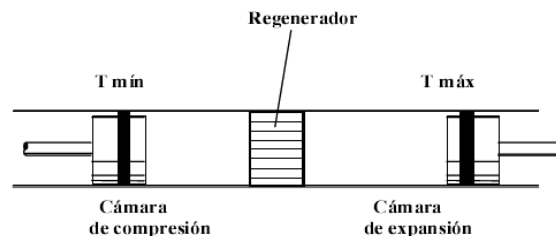


Figura 1. Esquema ideal de una máquina Stirling isotérmica.

La configuración tipo beta, es una configuración de cilindro único que reduce el espacio muerto al mínimo y da al motor la máxima compacidad. El cilindro es la materialización de la cámara de volumen variable. Un extremo está abierto hacia los intercambiadores de calor y el otro extremo está cerrado por el émbolo, el cual determina las variaciones de volumen.

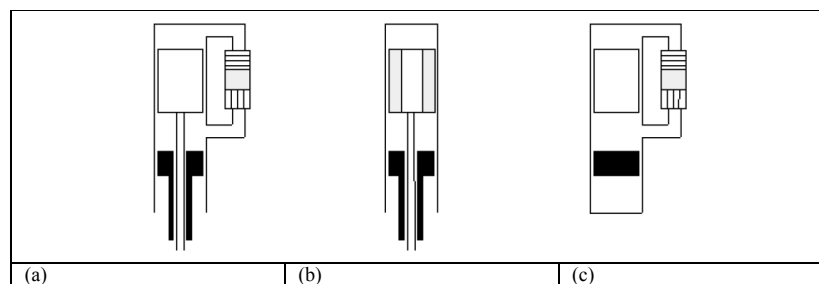


Figura 2. Motores Stirling tipo beta: a) con regenerador externo (Rankine-Napier), b) con desplazador regenerativo (Stirling), c) de pistones libres (Beale)

Los motores pequeños no suelen llevar regenerador, sino únicamente un espacio de algunas décimas de milímetro entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del aire. El pistón de trabajo y el desplazador están desfasados 90° y tienen dos bielas. Diferentes variantes de la configuración beta pueden observarse en la Figura 2.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

a) Del prototipo construido

La Figura 3 y la Tabla 1, muestran la foto del prototipo construido y sus especificaciones. Este prototipo es de configuración beta y utiliza aire como fluido de trabajo. Se corresponde con el esquema (b) de la Figura 2, con un desplazador regenerativo, que en este caso se encuentra reducido a su mínima expresión por la baja potencia ensayada.

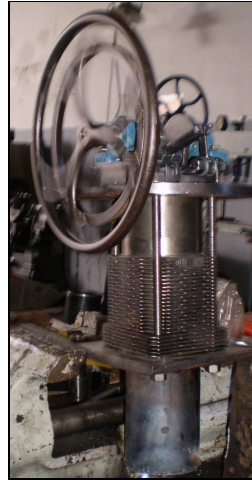


Figura 3. El prototipo de prueba.

El motor consiste de:

- Cilindro con aletas refrigerantes de un motor Deutz de cuatro aros modelo diesel 913. Las aletas refrigerantes ocupan 103 mm de longitud (foco frío).
- Cilindro quemador, confeccionado en acero común de 1330 cm³ (foco caliente).
- Pistón correspondiente al cilindro Deutz, de hierro fundido.
- Desplazador situado en un ángulo de 90° con respecto al pistón, confeccionado en lámina de bronce de 1mm. Tanto pistón como desplazador se mueven en el mismo cilindro.
- Cigüeñal y bielas.
- Volante de inercia.
- Estructura externa con 4 espigas y bulones, la que permite asegurar la firmeza del ensamble de las diferentes partes.

Características del prototipo	
Configuración del motor	Beta
Fluido de trabajo	Aire
Volumen de desplazamiento	392 cm ³
Sistema de refrigeración	Aire
Presión de trabajo	atmosférica
Carrera del pistón	5 cm
Diámetro del pistón	10 cm
Velocidad nominal	180 r.p.m.
Máxima potencia	30 W

Tabla 1. Especificaciones del prototipo Stirling construido.

Entre el pistón y el cilindro se dejó aproximadamente 0,05 mm de luz. El pistón fue conectado al cigüeñal por dos barras de duraluminio. Entre el desplazador y el cilindro se dejó un espacio de 0,5 mm para la transferencia del fluido de trabajo. El interior del cilindro se hizo con un acabado de calidad por rectificado y lapeado⁴. El cilindro quemador se soldó a la base del cilindro refrigerante, colocando una junta de amianto para evitar fuga del gas. El movimiento de los émbolos se alineó a partir de una varilla central de acero inoxidable en cuyo punto final se ensambló el desplazador por un mecanismo de rosca. Los cigüeñales se obtuvieron de un ciclomotor pequeño.

b) De la caldera de quema de biomasa

Para la quema eficiente de los recursos biomásicos que serán aprovechados, se ha diseñado una caldera con dos cámaras de combustión independientes revestidas en material refractario e inyección múltiple de aire. En la cámara de combustión primaria, revestida de material refractario, existe una puerta frontal provista de un visor de vidrio cerámico y entradas regulables de aire para combustión primaria. Otros múltiples inyectores de aire se ubican en las paredes laterales y posteriores

⁴ Es el proceso de acabado de una superficie por abrasión muy fina, con objeto de conseguir mucha precisión en el acabado superficial, conocida como rugosidad.

de dicha cámara de combustión. La separación de las cámaras es de material refractario y las paredes de ambas también están revestidas con este material. La caldera se muestra en la Figura 4a. Los gases quemados son evacuados al exterior por un conducto de humo que posee un regulador de tiraje.

Se evaluaron dos alternativas de aprovechamiento de calor a partir de esta caldera: i) a partir del mismo foco de combustión, y ii) a partir del calor de los gases de escape. Se optó por esta última, en la medida en que se estimó lograría mayor temperatura (superior a los 400 °C), mínimos y necesarios para el funcionamiento del motor.

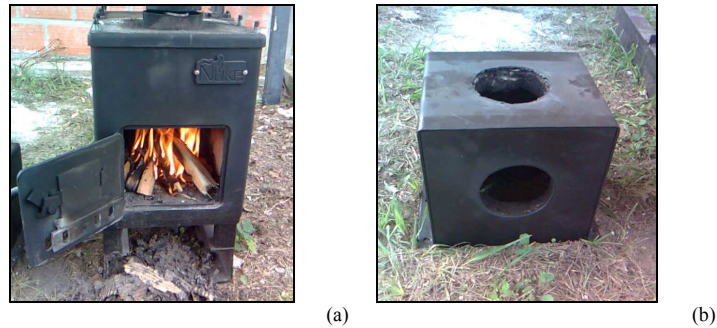


Figura 4. La caldera de quema de biomasa (a) y el receptáculo de acople (b).

La Figura 4 (b) muestra el receptáculo desmontable confeccionado en fibra cerámica, que se acopló a la caldera por la parte superior para ensamblar el prototipo Stirling construido a la misma. En la Figura 5 se muestra el sistema completo.

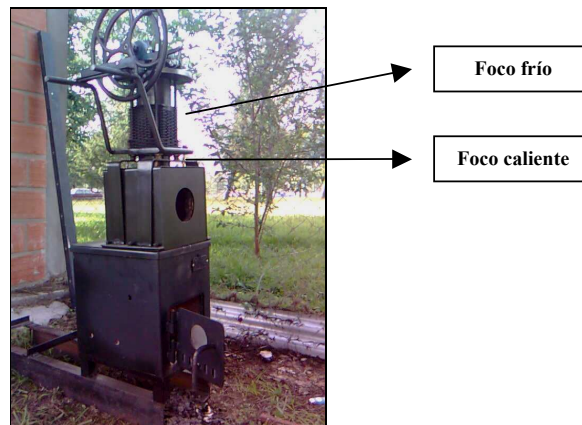


Figura 5. Prototipo ensamblado por medio del receptáculo a la caldera.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a) Del prototipo Stirling

Los pruebas experimentales se acompañaron de simulaciones teóricas a partir del software SNAP2002® (Stirling Numerical Analysis Program) de Altman (2002) (Kuosla et al., 2007) puesto a disposición por el INENCO, lo que permitió obtener salidas visuales de las respuestas del motor frente a diferentes situaciones empíricas. Interesó fundamentalmente evaluar la temperatura, como uno de los parámetros principales (Cinar et al., 2005). La búsqueda de un buen rendimiento energético exige que las temperaturas máxima y mínima entre las que trabaja el motor sean tan distantes como se pueda (Hsu et al., 2003). Como generalmente la temperatura mínima es la temperatura ambiente, se busca que $T_{m\acute{a}x}$ sea lo más alta posible. Pero en este caso, $T_{m\acute{a}x}$ tendrá un límite dado por un lado, por el tipo de combustible a utilizar y el máximo calor alcanzado en la estufa, y por otro -y como límite superior-, a la resistencia de los materiales generalmente metales, que son buenos conductores térmicos.

Así, se realizaron ensayos de temperaturas de foco frío y caliente, registrados con el termómetro infrarrojo OAKTON Infra Pro5, con un rango de lectura de 32-760°C y una resolución de 0,2°C, a partir de diferentes fuentes de calor: gas envasado (butano-propano), gas natural (metano-etano), soplete autógeno (oxígeno-acetileno) y biomasa. Por otra parte, se registraron datos de velocidad y potencia máxima lograda en el motor. 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 Wongwiset, 2007). Sin embargo, puede registrarse fácilmente luego de construido, lo que se realizó con el empleo de un estroboscopio digital PHYWE Systeme GmbH, operando en un rango de frecuencias de 1-60 Hz, y el torque⁵

⁵ Torque: momento o par motor producido por eje en rotación.

del motor se obtuvo a partir de un dinamómetro tipo Prony. La potencia (W) se calcula como el producto del trabajo (Wo) por la frecuencia de giro (Hz), con la siguiente fórmula: $W = Wo \times Hz$ (ec.1).

Mediante las simulaciones del ordenador, pudo calcularse el trabajo efectuado por el motor. Los ciclos termodinámicos son descritos frecuentemente como curvas cerradas en un diagrama P-V (P: presión, V: volumen). El trabajo realizado sobre el sistema o el trabajo hecho por el sistema según el sentido del recorrido corresponde a la superficie encerrada por la curva. El trabajo mecánico disponible en el eje de la rueda es considerablemente menor que el trabajo termodinámico entregado en cada ciclo, ya que el motor debe vencer el rozamiento interno. Por otra parte, también se obtuvieron las variaciones de volúmenes frío y caliente para diferentes ángulos de rotación del motor; la variación de potencia de salida en función de la velocidad y la eficiencia teórica del motor en función de la velocidad. Como resultado adicional, se obtuvieron las pérdidas térmicas teóricas del prototipo que plantean pautas para mejora de la geometría del motor.

b) De la caldera de combustión

Las pruebas se realizaron durante cinco horas diarias con repeticiones en diferentes días. Los registros se obtuvieron por observación personal y la temperatura se midió con el instrumental ya mencionado. Se registraron las siguientes variables:

- Tiempo de preparación –calentamiento- de la caldera.
- Comportamiento de diferentes tipos de materiales de biomasa.
- Tiempo de consumo de los materiales.
- Cantidad de material por carga.
- Proceso de combustión con diferentes caudales de aire.
- Temperatura máxima alcanzada. Se ensayó con materiales de diferente poder calorífico, algunos de los cuales se encuentran en la zona de aplicación propuesta para este proyecto.

c) Consideraciones Mecánicas

Los ensayos a partir del motor permitieron detectar aspectos mecánicos y geométricos que debían ser corregidos. Entre los ajustes realizados que mejoraron el funcionamiento del motor, se mencionan: evitar que el desplazador toque la cara superior o inferior del motor; reducir volúmenes muertos y roces al mínimo posible; ensayar diferentes carreras del pistón de trabajo; equilibrar componentes móviles, ya que la fuerza de gravedad sobre el desplazador es más o menos similar a la fuerza que origina el pistón, y hasta lograr un buen equilibrio, cuesta que el motor arranque; ajustar el mecanismo rotativo; lograr la independencia de lubricación de sistema; reemplazar algunos materiales empleados en búsqueda de mejor transferencia de calor; realizar soldaduras especiales para evitar filtraciones y pérdidas de compresión; aumentar la inercia mediante el ensayo con diferentes volantes.

RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES

1. Temperatura con diferentes tipos de biomasa

En primer lugar interesó realizar las pruebas de temperatura con el sistema completo (caldera-acople-motor). Las estimaciones preliminares de temperaturas máximas a lograr a partir de biomasa sugerían que se podría lograr alrededor de 400 °C a más (Borrazás, com. pers.). Sin embargo, en ninguna de las pruebas, a partir de diferentes tipos de biomasa, se logró tal temperatura. Los valores medios obtenidos son los que figuran en la Tabla 2. La Figura 5 permite observar los sitios de registro de temperatura en el sistema construido (foco frío y caliente, receptáculo, caldera) y la Figura 6c muestra un ensayo de temperatura.

Medición	Rango promedio de temperaturas (°C)	Descripción
1	58-72	Foco frío: aletas de refrigeración
2	270-300 (tres horas)	Foco caliente
3	310-350	Interior de receptáculo de acople
4	160-180	Paredes exteriores de la caldera

Tabla 2. Valores promedio de temperaturas registrados en focos frío y caliente, a partir de biomasa.

Las diferencias observadas para foco frío y caliente obedecieron a dos aspectos: tipo de material –biomasa- empleado y condición del tiempo atmosférico, ya que los días de lluvia o vientos, colaboraban en la disipación del calor en las aletas, aunque también en el cilindro quemador. El motor sólo logra dar un par de giros a partir de esta temperatura, con un empuje manual inicial.

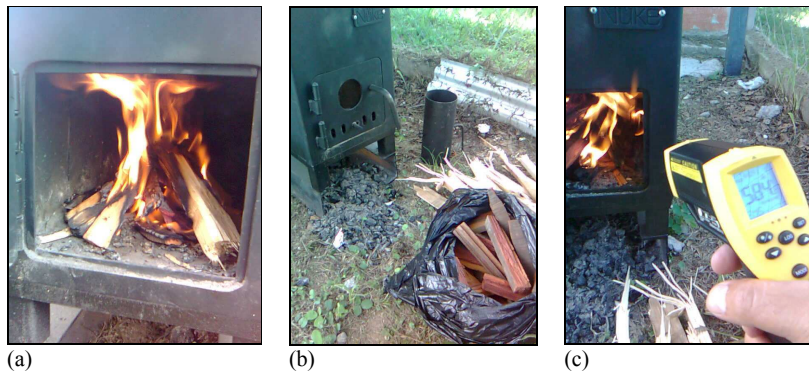


Figura 6. Quema de biomasa (a); diferentes materiales dispuestos para la caldera (b); pruebas de temperatura (c).

2. Temperatura máxima y mínima con otras fuentes de calor

Los resultados obtenidos a partir de las otras fuentes de calor se muestran en la Tabla 3, considerando valores promedio de todos los ensayos. El valor que figura entre paréntesis al lado de este valor, Los valores del foco frío se mantuvieron más bajos que en las pruebas con biomasa, pero también, el sistema de calentamiento fue diferente, ya que casi todo el cilindro quemador se encontraba expuesto al aire libre, favoreciendo menores temperaturas.

Extremo	Fuente de calor		
	Butano-propano	Metano-etano	Oxígeno-acetileno
Frío	55°C	60°C	65°C
Caliente	270°C (hora y media aprox.)	310°C (dos horas aprox.)	462°C (5-10 minutos)

Tabla 3. Temperaturas alcanzadas en focos frío y caliente. Entre paréntesis se expone el tiempo necesario para lograr el registro máximo en el foco caliente.

Los valores del foco caliente fueron superiores, tal y como podía suponerse por la diferencia de poder calorífico de las fuentes de calor empleadas (Karabulut et al., 2009a). La Figura 7 muestra los ensayos realizados. Por otra parte, los tiempos para llegar a la máxima temperatura posible con cada fuente de calor también fueron diferentes, en el siguiente orden decreciente: biomasa, gas natural, gas envasado, soplete oxiacetilénico. Sólo en el caso del empleo del soplete, la respuesta de arranque del motor es casi inmediata, y se mantiene funcionando correctamente. En los otros dos casos, da un par de vueltas con mucha dificultad y se siente pesado.

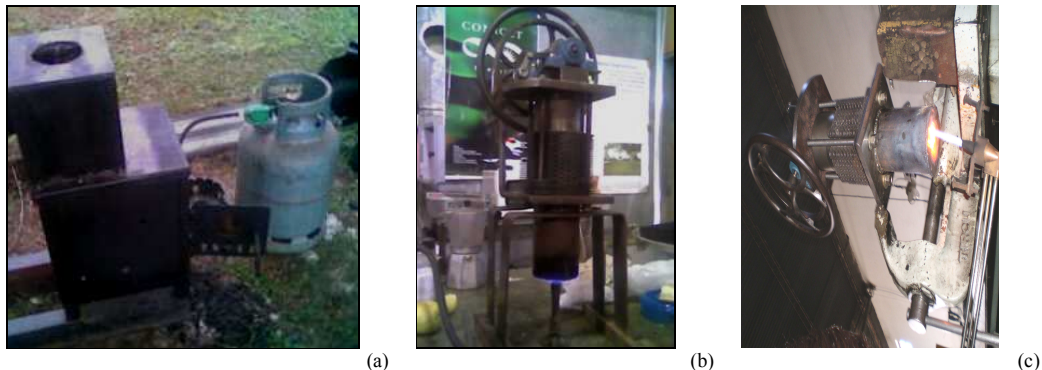


Figura 7. Pruebas con gas envasado (a), gas natural (b) y soplete (c).

Las principales diferencias del empleo de biomasa con otras fuentes de calor son:

- el tiempo necesario para lograr altas temperaturas;
- los valores máximos alcanzados quemando biomasa, son inferiores a los registrados con las otras fuentes de calor, en una diferencia de hasta 160°C (soplete de alta presión);
- el calor de la biomasa se obtuvo por intermedio de la caldera de combustión, que produce una gran dispersión del calor, mientras que en los otros casos, prácticamente se calentó la misma base del cilindro quemador, focalizando la temperatura en un solo punto. Por tanto, el modo de obtención de calor es diferente, lo que explica también parte de las diferencias de temperaturas registradas -descontando el poder calorífico del material-.
- El funcionamiento del motor, según las simulaciones realizadas y la observación experimental, muestran que es necesario lograr una temperatura inicial de alrededor de 400°C.

3. Comportamiento de la biomasa

Con respecto a las demás pruebas realizadas, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Tiempo de preparación –calentamiento- de la caldera:** Es necesario un tiempo inicial de 3 (tres) horas aproximadamente para que el ladrillo refractario alcance temperatura y comience a estabilizarse.

- **Diferentes tipos de materiales de biomasa:** Es necesario que el material arda con llama alta para alcanzar la base del cilindro quemador y las mayores temperaturas. Los materiales de mayor densidad de madera, son más lentos en consumirse, pero no logran llamas tan altas. Los materiales más livianos se comportan de manera inversa. Las mezclas de materiales son las que dieron los mejores resultados.
- **Tiempo de consumo de los materiales y cantidad de material:** Se observa que la carga admitida por la caldera es de aproximadamente 6-7 kg de material seco a temperatura ambiente, y éste se consume en un tiempo de aproximadamente 1½ hora-2 horas (hora y media a dos horas). Para mantener la llama alta, es necesario ir manteniendo la carga de la caldera, por lo que es necesario contar con material ya dispuesto al lado de la estufa.
- **Proceso de combustión con diferentes caudales de aire:** Colocado el sistema al aire libre, si las condiciones del tiempo local son ventosas, la caldera puede cerrarse sin problemas de asfixia en la combustión, ya que el aire ingresa por el sistema de inyección lateral. Caso contrario, el visor frontal debe permanecer abierto para evitar que el fuego se apague. La chimenea ha resultado poco práctica, ya que la combustión se produce mejor sin ella. Quizás deba rediseñarse. Se han realizado pruebas añadiendo un pequeño ventilador portátil y mejora el proceso de combustión, aunque sin mayores diferencias a lo observado con brisas naturales.

4. Velocidad del motor

En este caso, la máxima velocidad alcanzada con el prototipo en los ensayos fue de 180 r.p.m. (alrededor de 3 Hz). Las simulaciones realizadas incorporando parámetros como: presión media de trabajo (MPa), velocidad (r.p.m.) y potencia (W), permitieron encontrar funciones del tipo lineal como se observan a continuación. En todos los casos, la variable x implica revoluciones por minuto.

– Para presión atmosférica (0,1 MPa), $W = 162,98x + 33,269$ (ec.2)

– Para presión 0,5 MPa, $W = 219,72x + 62,832$ (ec.3)

– Para presión de 1 MPa, $W = 299,94x + 103,3$ (ec.4)

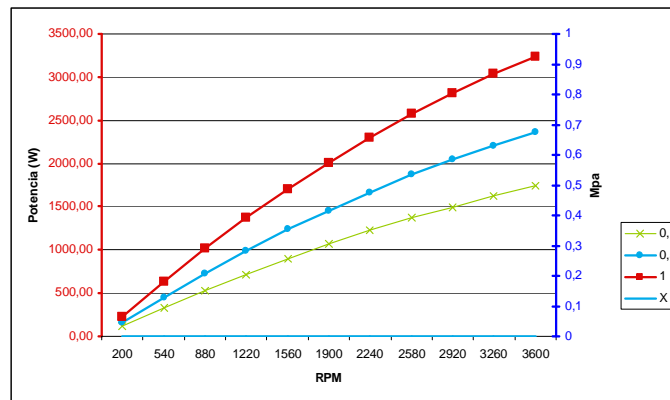


Figura 8. Potencia estimada (W) en función de la velocidad (r.p.m.), a diferentes presiones.

5. Trabajo y potencia

El trabajo realizado durante las fases de expansión y compresión se muestran en forma de un diagrama P-V. Este diagrama considera el volumen de compresión (frío), el de expansión (caliente) y el total, obtenidos a presión atmosférica (Figura 9). Se estima un trabajo realizado de 12,1 J, con un calor cedido (Qc) de -13,1J y un calor absorbido (Qabs) de 24,9 J. Si bien los valores observados son muy inferiores a los proyectados para el prototipo, es interesante obtener estos primeros resultados. La potencia del motor estimada es de 30 W, sin considerar las pérdidas del sistema.

El trabajo se puede incrementar de varias maneras:

- Aumentando la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío, mediante el empleo de materiales más sofisticados para conducción del calor en el foco caliente o la búsqueda de mecanismos que permitan mayor aislación y refrigeración en el foco frío (como una camisa de agua) (Kongtragool y Wongwises, 2006).
- Aumentando la relación de compresión del gas. Si bien no se han realizado mediciones en el equipo, Flórez y Agramunt (2002) mencionan que la relación de compresión óptima para estos sistemas es de alrededor de 2.
- Eligiendo un gas cuyo peso molecular sea pequeño. Una misma masa produce mayor trabajo si el gas tiene menor peso molecular, lo que podría lograrse empleando Helio o Hidrógeno, lo cual implica otras complicaciones que deben ser evaluadas (Altman, 2000).

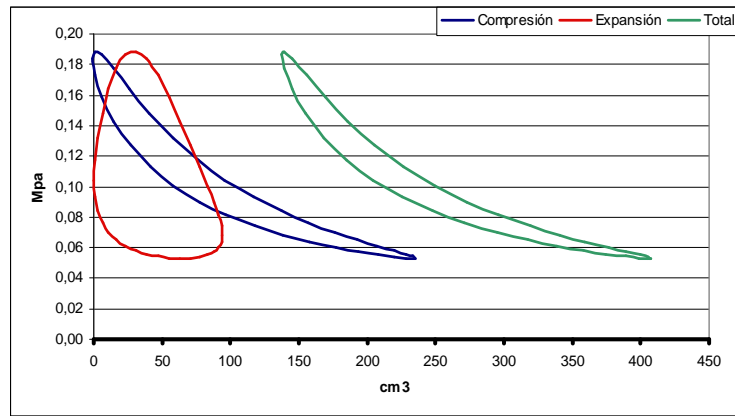


Figura 9. Diagrama P-V para el ciclo Stirling del prototipo, trabajando a presión atmosférica.

6. Eficiencia del motor

La máxima eficiencia para máquinas térmicas funcionando a partir de ciclos sub-críticos (menos de 540°C), alcanzan eficiencias de alrededor de 33% (Puigdevall y Galindez, 2007), marcado por el rendimiento de Carnot (Hsieh et al., 2008). Las curvas obtenidas, de tipo polinomial, se muestran en la Figura 10 y obedecen a las ecuaciones 5, 6 y 7. En todos los casos, x representa r.p.m.

- $E = -0,0135x^4 + 0,4102x^3 - 4,613x^2 + 22,709x - 1,7725$ (Para 0,1 Mpa) (ec.5)
- $E = -0,0168x^4 + 0,4938x^3 - 5,296x^2 + 24,174x + 1,0592$ (Para 0,5 Mpa) (ec.6)
- $E = -0,0188x^4 + 0,5389x^3 - 5,5646x^2 + 23,812x + 5,4884$ (Para 1 Mpa) (ec.7)

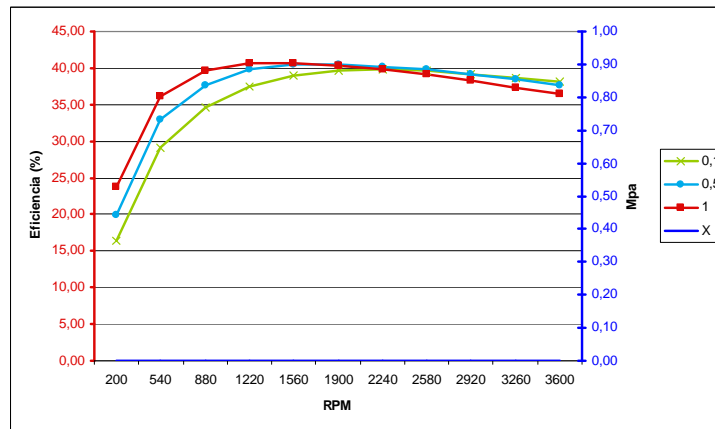


Figura 10. Eficiencia estimada (%) en función de la velocidad potencial (r.p.m.) a diferentes presiones.

PAUTAS DE MEJORA DEL SISTEMA

La presión de trabajo del sistema es la atmosférica. Si bien existen prototipos construidos operando con esta presión (Cinar et al., 2005), mayormente se trata de prototipos experimentales. Los motores que producen una potencia de trabajo útil, generalmente operan con una presión de más de 1 MPa (Flórez y Agramunt, 2002) aunque si el fluido de trabajo es diferente al aire, puede ser menor (Barros et al., 2004). Este aspecto de mejora se ha proyectado para el motor a partir de la implementación de un pequeño compresor con válvulas de control, que permita compensar la pérdida de presión durante el funcionamiento del motor. Las simulaciones muestran que para una presión de 1 MPa la potencia podría rondar los 450W.

Con respecto al fluido de trabajo, Altman (2000) muestra elocuentemente la diferencia del aire con respecto a otros gases de menor peso molecular, mayor conductividad térmica y mayor capacidad de calor. Sin embargo, esto plantea restricciones frente al objetivo último de este proyecto que es viabilizar el sistema para la generación de energía en ámbitos rurales, a partir de fuentes renovables disponibles. Por tanto, esta opción no será considerada, ya que implicaría limitantes a su aplicación, mientras que el aire está mundialmente disponible.

En cuanto a las temperaturas logradas con biomasa, se observa que el salto térmico es todavía pequeño. Es necesario lograr aproximadamente 400°C en el foco caliente y disminuir la temperatura del foco frío hasta alrededor de 30°C. Este último punto puede lograrse mejorando el sistema de refrigeración, con el planteo de una camisa de agua que refrigere las aletas. (Karabulut et al., 2009b). Se estima que podría pensarse un sistema tipo sifón con bajo consumo de agua. Por otra parte, la máxima temperatura alcanzada en el interior del motor posiblemente sea menor a la registrada externamente, por lo que el

motor arranca a partir de biomasa sólo con un empuje inicial. Deben revisarse los materiales empleados y la distancia del foco caliente al quemador del prototipo para lograr una mayor transferencia de calor y alcanzar los 400°C o más.

Siguiendo la teoría, uno de los elementos importantes es el regenerador (Andersen et al., 2006a; Kuosa et al., 2007; Parlack et al., 2009). Andersen et al. (2006b) mencionan que la cantidad de calor que debe ser agregada en el foco caliente, puede ser reducida al disminuir el flujo neto promedio de energía que es trasferida desde el calentador al enfriador por el fluido de trabajo del motor, lo cual puede realizarse al menguar las pérdidas del regenerador. Por otra parte, Abdullah et al. (2005) refieren que la caída de presión en el regenerador de un motor de bajo diferencial de temperatura, es muy importante ya que ésta puede disminuir la eficiencia total del motor. Puede suponerse por tanto, que si en el prototipo propuesto el desplazador cumple asimismo la función del regenerador, la eficiencia térmica podría ser aumentada. Barros et al. (2004) mencionan que un regenerador ideal con 100% de eficiencia, tendrá todo el calor suministrado al fluido de trabajo de fuentes externas en el proceso isotérmico de expansión de volumen y todo el calor rechazado por las proximidades en el proceso isotérmico inverso. Por lo tanto, la eficiencia térmica del ciclo Stirling en este caso estará dada por la misma expresión del ciclo de Carnot.

CONCLUSIONES

Si bien la potencia y eficiencia alcanzada por el prototipo construido es muy baja, se pudieron obtener resultados concretos y aceptables a partir de una metodología de diseño y construcción propia, desarrollada localmente, y empleando recursos locales. Estos ensayos permitieron relevar parámetros fundamentales de funcionamiento del motor, que pueden ser mejorados con vistas a lograr una potencia cercana a los 500 W.

La construcción y ensayos teóricos y experimentales realizados en el presente permiten afirmar que el motor Stirling constituye una alternativa importante y factible para ser utilizada por usuarios dispersos geográficamente de muchas regiones en el país. Principalmente, en zonas rurales y urbanas marginales, que carecen de energía eléctrica y de sus ventajas, y que difícilmente podrán acceder a la red eléctrica nacional, por lo que se considera que la aplicación de este tipo de tecnología, que no requiere de combustibles con propiedades específicas, puede ayudar a elevar el índice de electrificación y mejorar la calidad de vida de estas poblaciones.

El motor Stirling funciona, y presenta una serie de ventajas con respecto a sus pares de combustión interna: el diseño es sencillo, y el motor puede ser totalmente desarmado y rearmado con la ayuda de simples herramientas en menos de una hora por cualquier persona con conocimientos básicos en mecánica; es versátil, y puede ser usado a partir de cualquier fuente de energía renovables y poco contaminante del medio ambiente; es prácticamente silencioso y las únicas emisiones de gases provienen de la fuente de calor; puede funcionar sin lubricación; el aire como gas de trabajo permitirá su uso en cualquier lado, incluyendo las localidades más inhóspitas; puede construirse con piezas y materiales disponibles localmente, considerando, por supuesto, que a mayor calidad de materiales empleados, mayor rendimiento del motor.

ABSTRACT

This study present preliminary experimental and theoretical results of the construction and putting in functioning of a prototype Stirling of configuration beta, for generation of electric power. The constructed prototype has a power of exit of 30 W, running to a speed of 180 r.p.m. and from a temperature in the warm area of about 400 °C. The fluid of work, as this way the system of refrigeration, is by means of air. The volume swept by the desplazador is of 392 cm³. The heat source is obtained of the combustion of biomass, realized in a boiler of refractory brick made for such purpose. Likewise, other sources of renewable energy can be used. Are considered to be necessary major experimentation and adjustments of the engine, to reach a high power, in the search of viabilizar it application in rural housings.

KEYWORDS: Stirling, construction, renewable energy, biomass, b-type Stirling Engine, external combustion 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 colaboración al 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 directivos de la empresa Ñuke, por su participación en el proyecto; a los auxiliares de investigación por sus aportes 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.
- ALTMAN, A. 2000. SNAP©- A Stirling Numerical Analysis Program with User Viewable and Modifiable Code. 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Proceedings of IECEC'01. July 29-August 2, 2001, 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 Manage. 47 (2006) 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.
- BARROS, R.W.; ARADAS, M.E.C.; COBAS, V.R.M. Y E.E.SILVA LORA. 2004. Uso De Biomassa Como Combustível Para Aconionamento De Motores Stirling. In: Agrener, Campinas. <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%2032.pdf>.

- CINAR, C.; S. YUCESU; T. TOPGUL; M. OKUR. 2005. Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure. *Applied Energy* 81, 351–357.
- 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.
- 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. CHIOU. 2008. Integration of a free-piston Stirling engine and a moving grate incinerator. *Renewable Energy* 33, 48–54.
- HSU, S.T.; F.Y. LIN Y J.S. CHIOU. 2003. Heat-transfer aspects of Stirling power generation using incinerator waste energy. *Renewable Energy* 28 (2003) 59–69.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 Ingeniería Mecánica. Cusco, 23 a 25 de Octubre de 2007.
- MANRIQUE, S.; FRANCO, J.; NUÑEZ, V. 2009. Diseño y dimensionamiento de un prototipo de combustión externa funcional a partir de biomasa. Aceptado para su inclusión en la Revista AVERMA y presentación oral en la XXXII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente y XVIII Reunión de la Sección Argentina de la Asociación Internacional para la Educación en Energía Solar, noviembre de 2009.
- 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.
- ONOVWIONA, H.I.; UGURSAL, V.I. Y A.S.FUNG. 2007. Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. *Applied Thermal Engineering* 27, 848–861.
- PALSSON, M. Y H. CARLSEN. 2003. Development of de wood powder fuelled 35 kW Stirling 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. 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.
- PRODESSER, E. 1999. Electricity production in rural villages with biomass Stirling-engines. *Renew Energy* 1999;16:1049–52.
- ROMAN, R. 2007. Conceptos Básicos para Diseño de motor Stirling con baja diferencia de temperatura. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile.
- 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. *International Journal Of Hydrogen Energy* 33, 3506 – 3510.
- 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.
- WANG, J.J.; JING, Y.Y.; ZHANG, C.F.; SHI, G.H. Y X.T. ZHANG. 2008. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy* 36, 3823–3832.
- 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.