

ENSAYOS PRELIMINARES DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN MOTOR SOLAR DE CICLO STIRLING

Marcelo Eduardo Watkins, ICEN - Centro de Energía – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales –
UNCa - watkinsmarcelo@gmail.com

David Herman Lucero, ICEN - Centro de Energía – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales –
UNCa - davidhlucero@gmail.com

Martin Elias Castro, Citca, CONICET – ingaerocastro@gmail.com

Carlos Nicolas Kozameh, ICEN - Centro de Energía – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales –
UNCa - Citca, CONICET - ckozameh@gmail.com

Resumen— Se presentan resultados de los primeros ensayos de un banco de pruebas para un motor solar de ciclo Stirling, cuya potencia nominal de diseño está en el orden de los 3 HP, a 500 r.p.m. y que fuera diseñado para funcionar con radiación solar concentrada como fuente de energía. El dimensionamiento de la estructura y el diseño de la electrónica de medición y adquisición de datos se adecuan al motor MET 2 construido por técnicos e investigadores del Instituto Universitario Aeronáutico de Córdoba. El objetivo del banco de pruebas es determinar la potencia real de trabajo y la eficiencia de dicho motor en diferentes condiciones, con el fin de optimizar su funcionamiento. Se muestran algunos resultados de ensayos con el motor girando en vacío a fin de realizar el ajuste de los sensores electrónicos de los parámetros más relevantes del motor. Los resultados de las mediciones pueden verse en tiempo real mediante un enlace inalámbrico en la pantalla de una computadora empleando el software LabView. El proyecto se encuentra aún en etapa de desarrollo.

Palabras clave— *energía solar, motor Stirling, adquisición de datos.*

1. Introducción

Durante los últimos treinta años, la humanidad ha tomado conciencia de la degradación ambiental presente y futura que origina el consumo de combustibles fósiles. La investigación se orienta cada vez más a la sustitución de la energía fósil, la eficiencia energética y el uso de energías renovables. Los motores Stirling funcionando con radiación solar como fuente de calor, pueden ser una de las alternativas para el reemplazo de motores contaminantes.

Investigadores del Centro de Energía de la Universidad Nacional de Catamarca en colaboración con el Instituto Universitario Aeronáutico de la Universidad Nacional de Córdoba, trabajan en el desarrollo experimental de motores Stirling. Un estudio experimental completo de un motor Stirling, requiere de instrumental adecuado que permita la caracterización global de los parámetros del motor y de sus prestaciones. Se puede demostrar fácilmente que la potencia de salida del motor aumenta con la presión de carga inicial y con el flujo de agua de enfriamiento. Según lo expuesto por Ramla Gheith [1], “para altas presiones de carga, la potencia de salida aumenta con las rpm del motor hasta un valor máximo, después de lo cual, comienza a decaer. Esta disminución se debe especialmente a que se requiere una mayor rapidez de intercambio de calor y a que aumentan las pérdidas mecánicas por fricción en el motor” (Ramla Gheith, et al 2012).

La influencia del gas de trabajo sobre la potencia efectiva es también una condición a tener en cuenta. Los experimentos realizados por Bert [2] establecen que “el aire muestra un mayor potencial de salida a baja velocidad y el helio a altas velocidades de trabajo por lo que se debe elegir el gas que mejor se adapte a las condiciones de trabajo para las que se diseña el motor” (Bert J. et al, 2014).

Existen otros elementos que se pueden usar como variable durante el ensayo de un motor Stirling. El material del “regenerador” es objeto de estudio en muchos de los trabajos recientes. De acuerdo con los experimentos realizados por Ramla Gheith [3] “la potencia del motor es muy sensible a la naturaleza del material que constituye el regenerador. Matrices hechas de diferentes materiales tales como acero inoxidable, cobre, aluminio y Monel 400 muestran esta sensibilidad”. (Ramla Gheith et al, 2015).

El tratamiento superficial de algunas de las partes del motor para mejorar su resistencia térmica o para minimizar las pérdidas por fricción, también se emplea como recurso al momento de optimizar el diseño. Según lo expuesto por Karabulut [4] “el tratamiento del pistón desplazador con zirconio, muestra un aumento en la potencia del motor comparando con la que se obtiene con un desplazador no tratado”. Al emplear dicho material para formar una película aislante térmica se reducen las pérdidas conductivas de calor, incrementando de este modo la eficiencia (Karabulut H. et al, 2009).

El empleo de modelos matemáticos y el desarrollo de una técnica de simulación que permita obtener resultados rápidamente, es también muy empleado en los últimos años. Se han desarrollado herramientas de cálculo que pueden aplicarse posteriormente al ensayo de diferentes configuraciones del motor y que permitan optimizar el diseño antes de su fabricación. En este sentido, Watkins [5] [6] emplea el software Simusol, para realizar ensayos por simulación del motor Stirling, en diferentes condiciones de trabajo y con diferentes gases (Watkins et al, 2013-2014). Las curvas obtenidas proporcionan información que deberá ser validada en mediciones, para lo cual se desarrolla actualmente un banco de pruebas con un sistema automático de adquisición de datos.

2. Materiales y Métodos

2.1 Estructura mecánica del banco:

La estructura del banco se fabrica con caño cuadrado, de 5 x 5 cm, y 2 mm de espesor (caño pesado). Sobre esta base se apoya un plano de trabajo con un sistema de correderas para la ubicación del motor y del freno. Entre la base y el plano de trabajo se colocan elementos antivibratorios de goma. Con fines de seguridad, se agrega una jaula constituida por una estructura de caño estructural y malla de acero romboidal, ubicada sobre el motor y que además sirve de apoyo a la estufa de calefacción del banco de pruebas. (Figura 1)

2.2 Adquisición de datos:

Se desarrolla un sistema de adquisición de datos pensado para la caracterización y ensayos de un motor Stirling. El proyecto consta de dos fases: Caracterización del motor y Optimización, modificando parámetros de trabajo del motor. El presente trabajo corresponde a la primera fase, esto es la caracterización del motor. Se emplea LabVIEW como herramienta de programación para visualizar mediciones en tiempo real durante los ensayos. Los principales parámetros a medir durante los ensayos son: Presión del gas de trabajo, temperatura en diversos puntos del motor, torque o par de trabajo y régimen de revoluciones del motor. Con el torque y las r.p.m. se calcula luego la potencia real entregada por el dispositivo. Debido a que se emplea agua como fluido de enfriamiento del cilindro de trabajo, es necesario medir el caudal de agua circulante y las temperaturas de entrada y salida de la misma a fin de poder determinar la pérdida de calor que se produce en dicho circuito.

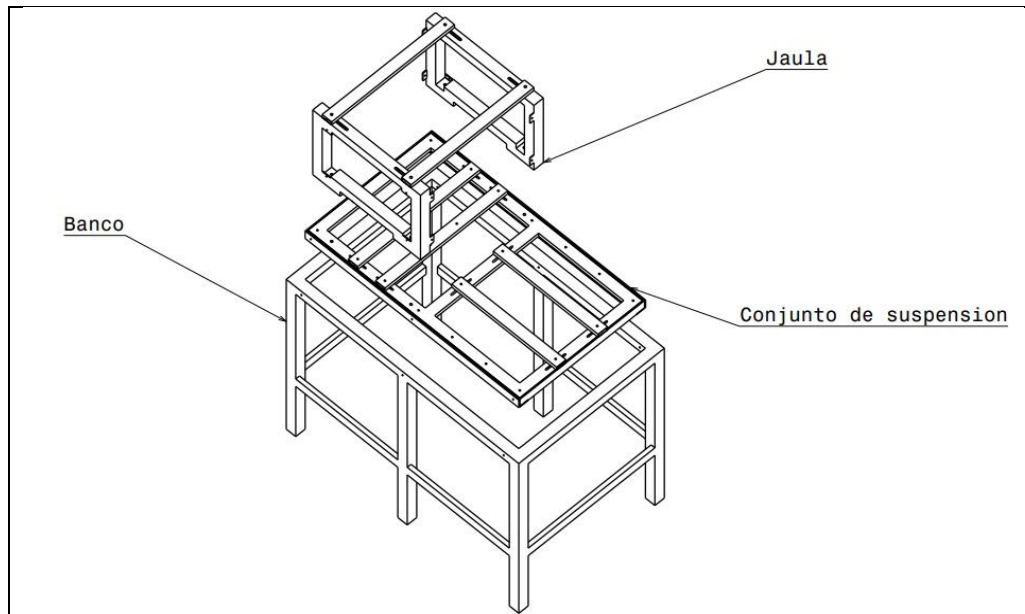


Figura 1- Vista en perspectiva del diseño de la estructura del banco
Fuente: Elaboración propia

Los sensores de presión, temperatura, torque y revoluciones por minuto, se conectan a un adquirente de datos marca Labjack Serie T7 que mediante los protocolos de comunicación Ethernet o USB logra una adquisición de alta performance, estabilidad y confiabilidad. El dispositivo se conecta a una PC mediante la red permitiendo el almacenamiento de grandes bases de datos y la visualización en tiempo real sobre la pantalla de la misma (Figura 2).

Para el sensado de la presión media de trabajo se emplea un sensor manométrico marca Nagano, tipo ADZ-S20, que puede medir en un rango de 0 a 25 bares.

Las temperaturas superiores a los 200 C, se miden con termocuplas tipo K conectadas mediante un módulo adaptador MAX6675, que amplifica, compensa y convierte a digital el voltaje generado por el termopar.

La velocidad de rotación del motor se determina mediante un módulo sensor de velocidad de giro con sensor infrarrojo asociado a una rueda dentada de 36 dientes que proporciona una precisión de 10° en la medición del ángulo girado por el eje del motor. La salida del sensor es un tren de pulsos fácilmente cuantificable por el adquirente de datos.

El torque o par de trabajo se mide utilizando un freno de disco magnético vinculado mecánicamente a una celda de carga. La salida de la celda de carga es un pequeño voltaje que se acondiciona mediante un módulo acondicionador para celda de carga tipo Hx711, el cual conforma y digitaliza la señal antes de ser introducida al adquirente.

Para determinar las pérdidas de calor en la fuente fría, se colocan dos sensores de temperatura tipo PT100 conectados en configuración diferencial a un amplificador operacional LM358, de modo que la salida del amplificador entrega una tensión proporcional a la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua. Se completa la medición con el sensado de caudal empleando un caudalímetro tipo YF-S201 que genera 450 pulsos por cada litro de agua circulante.



Figura 2- Imágenes de la pantalla de LabView y del tablero electrónico
Fuente: Elaboración propia

2.3 Freno de disco de Faraday

Con el fin de determinar la potencia efectiva del motor, es necesario generar una cupla antagónica sobre el eje de rotación, mediante un dispositivo que permita la medición del torque. La solución más apropiada resulta ser un disco de Faraday. Cuando un campo magnético actúa sobre un sector del disco, genera corrientes parásitas que se oponen al movimiento del mismo, provocando un efecto de frenado. El diseño del disco se muestra en la Figura 3. El disco gira sobre un eje solidario al eje del motor y es frenado mediante cuatro electroimanes adosados a una estructura que puede pivotar ejerciendo presión sobre una celda de carga. La presión sobre la celda es proporcional al torque del motor y a la inducción magnética que generan los electroimanes. Dependiendo de la corriente que pasa por las bobinas de los electroimanes, se puede frenar más o menos el motor y de esta manera medir la potencia de salida para diferentes velocidades de rotación.

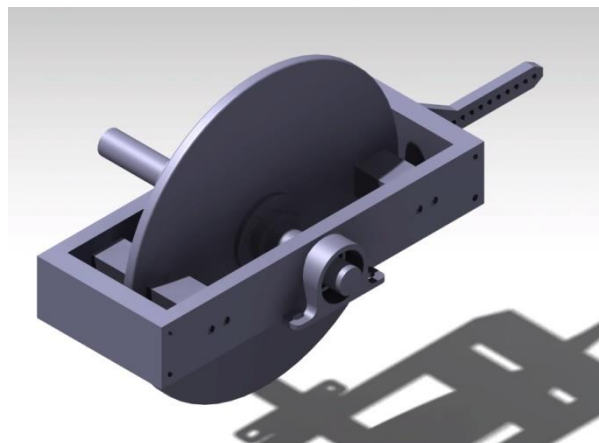
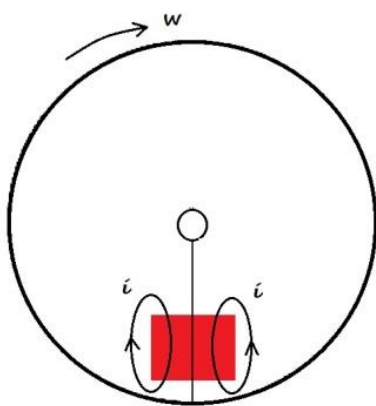


Figura 3 – Disco de freno magnético – Detalles de diseño
Fuente: Elaboración propia

2.4 Elementos adicionales:

Debido a que el motor Stirling requiere condiciones particulares para su funcionamiento se emplean como elementos adicionales al banco, una bomba de vacío, un tubo de gas

*Ensayos preliminares de un banco de pruebas
para motor solar de ciclo Stirling*

Nitrogeno y una estufa de 4kW con control electrónico de temperatura. La estufa de calefacción actúa sobre la toma de calor del motor, diseñada para recibir energía solar concentrada mediante una pantalla parabólica de 3 metros de diámetro. Debido a que los ensayos deben realizarse en el laboratorio, se emplea una estufa en reemplazo del espejo parabólico. El control de la temperatura de la estufa se realiza empleando un Pirómetro digital de control asociado a un relay de estado sólido que maneja corrientes de 18 a 20 Amp cuando se exige la máxima potencia de la estufa (Figura 4).

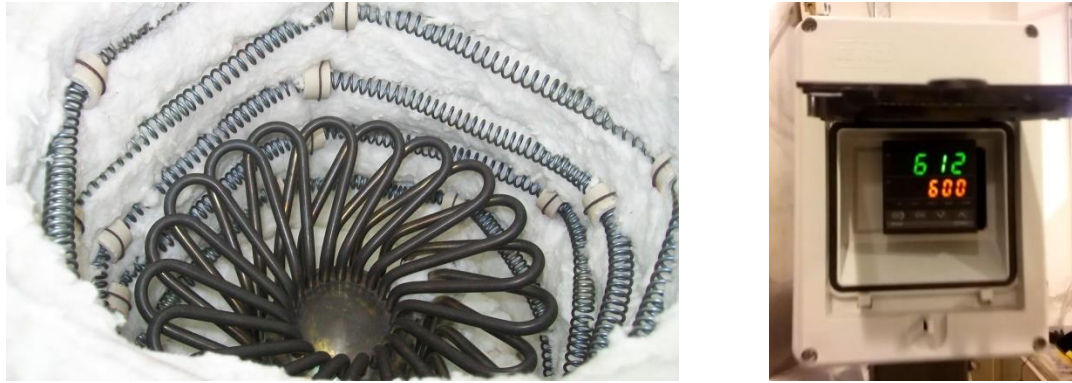


Figura 4 - Imágenes de estufa de 4kW y del Pirómetro digital de control de temperatura
Fuente: Elaboración propia

El gas Nitrógeno se inyecta en el interior del motor luego de haber extraído el aire con una bomba de vacío. La presión de carga del gas de trabajo se controla con un manómetro analógico instalado en el tubo de Nitrógeno y luego se corrobora la lectura con el sensor de presión electrónico conectado al sistema de adquisición de datos. Las presiones establecidas para los ensayos experimentales van desde 1 bar hasta 10 bares.



Figura 5. Imágenes del Banco de pruebas en diferentes estados de avance
Fuente: Elaboración propia

3. Resultados y Discusión

Los primeros ensayos se realizan con el motor girando en vacío, o sin cupla antagónica. Esto se debe principalmente a que el freno de disco de Faraday se encuentra en proceso de fabricación y a que se requieren ensayos del motor sin carga que permitan estimar las pérdidas totales del dispositivo y deducir posteriormente las pérdidas por fricción mecánica. Los ensayos sin carga nos permiten además realizar ajustes en los dispositivos de medición del banco.

Tabla 1. Primer ensayo – 2 bar

Primer ensayo (presión media de Nitrógeno 2 bar)			
Temperatura Estufa (°C) (programada)	Temperatura en Toma de Calor (°C)	Revoluciones por minuto (rpm)	Flujo de agua (l/m)
500	442	333.3	2
550	520	375.0	2
600	570	491.7	2
600	570	500.0	4
650	630	591.7	4
700	664	616.7	1.3

Fuente: Elaboración propia

El primer ensayo se realiza con una presión media de carga de Nitrógeno de 2 bares, y se varía la temperatura desde 500 C hasta 700 C, con intervalos de 50 C entre mediciones. Debido a que se trata del primer ensayo, se introducen también variaciones en el flujo de agua del circuito de enfriamiento. Se observa una muy baja incidencia de la variación del flujo de agua de enfriamiento en la salida, por lo que se infiere que el enfriamiento regulado en dos litros por minuto es suficiente para evacuar el calor a las presiones y temperaturas de trabajo ensayadas. Los resultados pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 2. Segundo ensayo – 2 bar

Segundo ensayo (presión media de Nitrógeno 2 bar)			
Temperatura Estufa (°C) (programada)	Temperatura en Toma de Calor (°C)	Revoluciones por minuto (rpm)	Flujo de agua (l/m)
500	422	400.0	2.13
550	498	443.3	2.13
600	550	516.7	2.13
650	605	575.0	2.13
700	675	636.7	2.13

Fuente: Elaboración propia

El segundo ensayo se realiza manteniendo el flujo de agua de enfriamiento en un valor constante y la presión media de carga de Nitrógeno se fija en 2 bares, a fin de tener una única variable en juego. La temperatura se establece como variable, arrancando en 500 C con incrementos de 50 C entre mediciones. Se programa el regulador electrónico de temperatura en el valor deseado y se espera hasta que se estabiliza la temperatura medida en la toma de calor del motor, que no necesariamente es igual a la programada. Esto se debe a que hay un espacio de aire entre la estufa y la toma de calor. De este modo se determina la influencia de la temperatura de la fuente caliente en la velocidad del motor. (Tabla 2)

Tabla 3. Tercer ensayo – 3 bar

Tercer ensayo (presión media de Nitrógeno 3 bar)			
Temperatura Estufa (°C) (programada)	Temperatura en Toma de Calor (°C)	Revoluciones por minuto (rpm)	Flujo de agua (l/m)
500	450	483.3	2.13
550	492	536.7	2.13
600	538	575.0	2.13
650	598	661.7	2.13
700	666	705.0	2.13

Fuente: Elaboración propia

En el tercer ensayo se decide incrementar la presión de carga del gas a tres bares. Se repite el mismo esquema de mediciones del segundo ensayo empleando como variable la temperatura y midiendo la velocidad final de rotación del motor. Se puede notar que la velocidad de rotación comparada con la que se tenía en el segundo ensayo es un poco mas alta. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

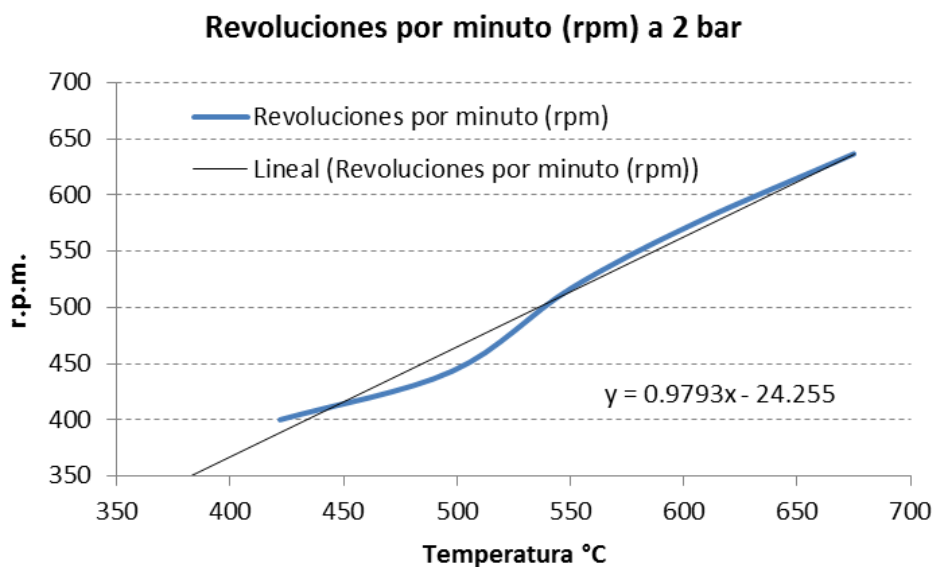


Figura 6. Variación de la velocidad de rotación con la temperatura a 2 bares

Fuente: Elaboración propia

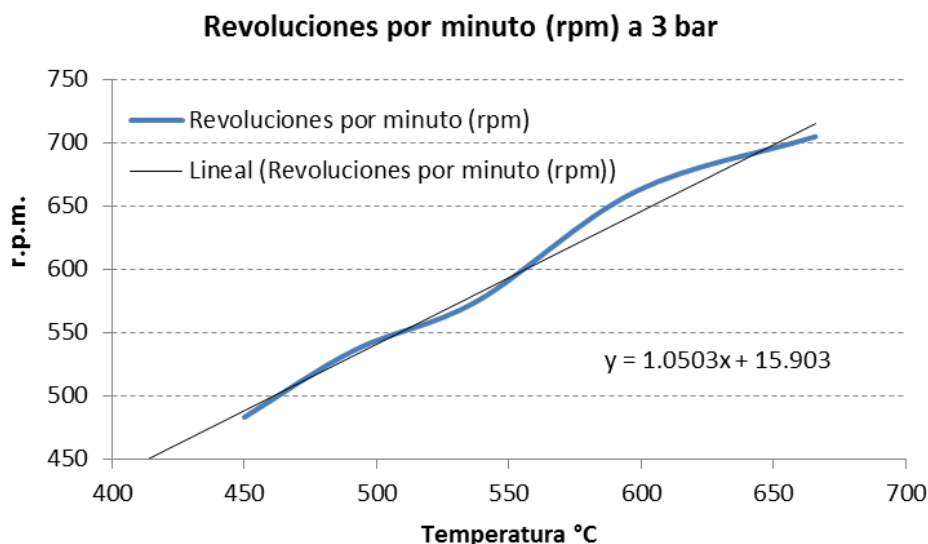


Figura 7. Variación de la velocidad de rotación con la temperatura a 3 bares
Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de las curvas de velocidad, respecto de la temperatura se muestran en las Figuras 6 y 7. Puede apreciarse la cuasi linealidad de la respuesta a las variaciones de temperatura con las presiones indicadas. Vemos además que la velocidad del motor es levemente más alta cuando se carga con una presión mayor. El aumento promedio de la velocidad está en el orden del 15% mientras que el aumento de la presión es de 50%. Se agrega en ambos gráficos la línea de tendencia lineal que mejor aproxima los valores medidos. El punto en que esta línea corta el eje de las temperaturas, se puede interpretar como la temperatura mínima de arranque del motor. (aproximadamente 380 C para 2 bares y 420 C para 3 bares).

4. Conclusiones

El trabajo muestra mediciones preliminares de ajuste. Durante el primer ensayo, se observa una muy baja incidencia de la variación del flujo de agua de enfriamiento en la salida, por lo que se infiere que el enfriamiento regulado en dos litros por minuto es suficiente para evacuar el calor a las presiones y temperaturas de trabajo ensayadas. Por otro lado se determina que a las presiones indicadas, la velocidad de respuesta del motor aumenta casi linealmente con la temperatura y que el incremento de la velocidad es muy leve cuando se aumenta la presión del gas de trabajo de dos a tres bares.

No es posible determinar aún la potencia efectiva y la eficiencia del motor, objetivo principal del banco de ensayos, dado que esto requiere de la medición del torque y no contamos todavía con un freno o par antagonico instalado. Sin embargo, los ajustes y verificaciones realizadas nos aproximan a dichos objetivos.

Resta aún realizar mediciones con presiones más altas y luego, con el freno magnético , funcionando, determinar la curva de potencia del motor a distintas velocidades de marcha. En el proceso descrito se realizan mediciones paralelas con otros instrumentos (voltímetro, frecuencímetro, osciloscopio) para validar las lecturas que se obtienen con el sistema de adquisición de datos resultando ambas técnicas de medición coincidentes en un alto porcentaje luego de los ajustes.

5. Referencias

- [1] RAMLA GHEITH, FETHI ALOUI, MOHAND TAZEROUT AND SASSI BEN NASRALLAH (2012). Experimental investigations of a gamma Stirling engine. *International Journal of Energy Research*. n.36, p.1179
- [2] JULIETTE BERT, DANIELA CHRENKO, TONINO SOPHY, LUIS LE MOYNE, FREDERIC SIROT (2014) Simulation, experimental validation and kinematic optimization of a Stirling engine using air and helium. – *Energy* 78 – p. 711
- [3] RAMLA GHEITH A ,FETHI ALOUI B, SASSI BEN NASRALLAH (2015) Determination of adequate regenerator for a Gamma-type Stirling engine - *Applied Energy* 139 – p. 279
- [4] HALIT KARABULUT, CAN CINAR, FATIH AKSOY, SERDAR YÜCESU (2009) - Improved Stirling engine performance through displacer surface treatment *International Journal of Energy Research* 34 – p.272
- [5] WATKINS M., MARCHETTI C., KOZAMEH C. (2013) Modelo matemático y simulación de un motor de ciclo Stirling empleando el software Simusol - *Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA*. Argentina ISSN N° 1853-7871 – v.31 – p.1-8
- [6] WATKINS M., ARAMBURU V., KOZAMEH C., SOLA MARIMON C. (2014) - Estudio de sensibilidad de un motor de ciclo Stirling empleando simulaciones. *Revista Aportes Científicos en Phymath* – Argentina – ISSN 2313-9455 – v.3 – p.53-70