



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Desarrollo, diseño y construcción de un motor Stirling solar utilizando concentrador parabólico.

Zambrano Daniel A. ⁽¹⁾ ⁽²⁾, Pisani Leandro ⁽¹⁾, Vitali Osvaldo ⁽²⁾

Instituto de Industria (IDEI)
Universidad Nacional de General Sarmiento
J. M. Gutierrez 1150. Los polvorines. Buenos Aires-Argentina
Tel/Fax: +54-11-4469-7500 - E-mail: dzambran@ungs.edu.ar

Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas
Universidad Argentina de la Empresa (UADE)
Lima 717. Buenos Aires-Argentina
Tel/Fax: +54-11-4000-7325 - E-mail: dzambrano@uade.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se describe la metodología utilizada para el desarrollo de un motor de ciclo Stirling que utiliza como fuente caliente la energía solar. Para mejorar el aprovechamiento de este recurso se ha utilizado una parábola concentradora con el fin de aumentar la temperatura en el foco hasta 430°C, utilizando esto como fuente de energía para el desarrollo del ciclo Stirling. En primer término se realizó un cálculo teórico de los parámetros del ciclo y su optimización mediante el agregado de un regenerador. En segundo término se desarrollaron los cálculos necesarios para generar la geometría del motor. Para ello se partió de la comparación de diferentes geometrías posibles, optándose por simplicidad el formato que corresponde a un motor Stirling tipo GAMMA con desplazador y pistón. Esta configuración permite un máximo aprovechamiento con el mínimo de complicación constructiva. En primer término se desarrollaron las partes del motor y se realizó el cálculo mediante técnicas computacionales del regenerador, elemento fundamental para la mejora en el rendimiento termodinámico del ciclo y consecuentemente de un aumento de potencia, ya que la energía suministrada es constante (energía solar). Por otra parte para la construcción de la parábola concentradora fue utilizada como base, una antena parabólica de comunicaciones que fue revestida con diversos materiales reflectivos de bajo costo. Como resultado de ello se logró el dimensionamiento, desarrollo y construcción de un prototipo de motor funcional y se realizaron mediciones que permiten confrontar los resultados obtenidos de una simulación realizada mediante la utilización de MATLAB[®]. El motor permitirá su acoplamiento a un generador compacto con el cual se obtendrá una potencia aproximada de 300W.

Palabras Claves: Stirling, energía solar, concentradores solares.

1. INTRODUCCIÓN

Ante el panorama mundial en cuanto a necesidad de energía, es imprescindible desarrollar todas aquellas alternativas que sean factibles a fin de encontrar soluciones a nivel local o global. Entre estas actividades se encuentra el desarrollo de energías basadas en recursos inagotables y sustentables como el viento, las mareas o la energía solar.

Sin embargo debemos tener en cuenta que ninguna de ellas por si sola podrá ocupar el lugar de las energías tradicionales basadas en los hidrocarburos., pero evidentemente aportaran soluciones particulares sobre todo a nivel local.

Teniendo en cuenta estas condiciones, la energía solar, pese a tener niveles de eficiencia bajos y fluctuantes, puede ser utilizada sobre todo en desarrollos en comunidades donde otras fuentes de energía son prácticamente inaccesibles o de muy alto costo.

En este trabajo se ha desarrollado una máquina Stirling que utiliza un concentrador solar como fuente de energía. La máquina Stirling [8] permite utilizar el calor entregado por la fuente solar concentrada en un área determinada por el foco correspondiente al concentrador parabólico, y mediante un ciclo termodinámico cerrado regenerativo con compresión y expansión cíclicas del fluido, acoplar esta máquina a un generador eléctrico.

El fluido es controlado por la variación del volumen de los cilindros, eliminando la necesidad de válvulas. Esta sencillez, sumada a la ventaja de la utilización del sol como fuente de calor, permite su uso en áreas alejadas, y utilización puntual para uso de viviendas unifamiliares.

Para el desarrollo de un sistema de concentrador solar con motor Stirling es necesario en primera instancia definir la configuración geométrica y cinemática del motor.

Para ello es necesario recordar que existen dos categorías del motor Stirling según los métodos de accionamiento.

El primero de ellos consiste en una serie de elementos mecánicos (cigüeñal, ruedas) que se mueven juntos de modo de variar los espacios de trabajo de una manera prescrita provocando el adecuado desfase entre pistones. Regula el sincronismo del ciclo al mismo tiempo que transmite la energía al volante. Hay 3 variantes: alfa, beta y gamma.

El segundo denominado de pistón libre (Fig. 1) [9] donde el pistón realiza una oscilación armónica, que produce la compresión y expansión del gas, mientras que un desplazador sirve para mover el gas entre los intercambiadores frío y caliente (al igual que en las disposiciones beta o gamma). La diferencia radica en la forma de conseguir el sincronismo ya que usan las variaciones de la presión del gas de trabajo para ejecutar un movimiento alternativo sobre el émbolo y el desplazador utilizando un juego de resortes planos.

Este método de accionamiento surgió como una solución al problema de sellado que presentaban estos motores. Además se consigue disminuir la fricción y el desgaste mecánico, dando como resultado motores de muy bajo mantenimiento.

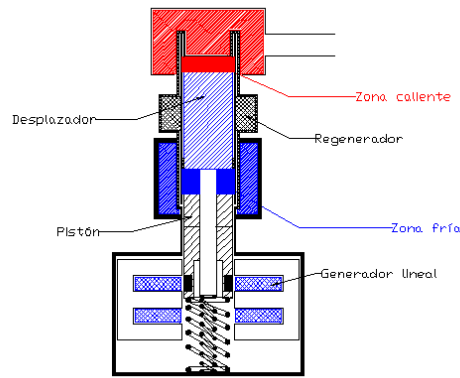


Figura 1 Esquema configuración pistón libre

Para el caso en estudio luego de algunas consideraciones y basados en la sencillez de construcción se selecciono la configuración cinemática conocida como Gamma (Fig. 2)

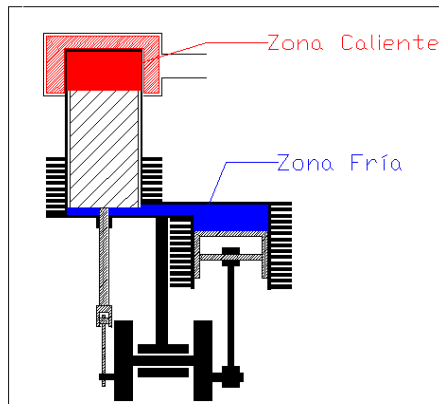


Figura 2 Esquema configuración Gamma

En este caso nos concentraremos en el diseño del motor Stirling y el sistema de regeneración que permite una mayor eficiencia del ciclo. En el caso del diseño del concentrador parabólico, se han realizado algunos consideraciones y diseño previo y construcción del mismo basándonos en trabajos publicados [1] [2].

Previo al análisis y desarrollo constructivo se desarrollo un proyecto de prefactibilidad y viabilidad del sistema colector solar-Stirling [3], así como también un estudio para su localización dentro del territorio de la República Argentina.

2. DESARROLLO

Para este estudio se realizó en primera instancia una evaluación del ciclo para determinar sus posibilidades como ciclo termodinámico capaz de generar trabajo. Dentro del motor se halla un compartimiento estanco lleno de un gas (aire, helio o hidrógeno) dividido en dos zonas: una caliente y una fría que se corresponden con los dos ciclos de cada revolución [4]. Los procesos de transferencia de fluidos de una cámara a otra son a volumen constante mientras que los procesos de compresión y expansión son isotérmicos. Los procesos, ya mencionados, son cuatro: compresión isotérmica a temperatura baja (1-2), una aportación de calor a volumen constante (2-3), una expansión isotérmica a temperatura alta (3-4) y una extracción de calor a volumen constante (4-1), obteniéndose un ciclo Ideal (Fig. 3).

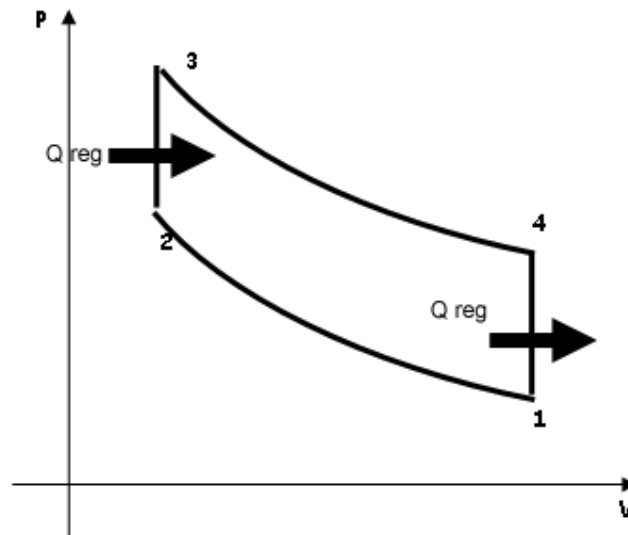


Figura 3 Esquema configuración Gamma

El calor extraído entre 4 y 1 se aprovecha como calor aportado en 2 y 3 mediante el regenerador. Si en el ciclo, el regenerador tiene una eficiencia $e=1$, tiene como rendimiento térmico el de Carnot, dado que los dos procesos a volumen constante absorben y ceden el mismo calor. Las variables usadas en este ciclo son la relación de compresión, presión máxima del ciclo [bar], características del gas (C_p y C_v) [J/mol.K], cilindrada [cm^3], temperaturas máximas y mínimas [K] y regeneración (en porcentaje). Con todas estas variables podremos calcular tanto el rendimiento como el trabajo del ciclo. Definimos los volúmenes máximos y mínimos, a partir de la cilindrada y la relación de compresión.

$$V_{\min} = \frac{\text{Cilindrada}}{\text{Rel. de compresión} - 1} \quad (1)$$

$$V_{\max} = V_{\min} + \text{Cilindrada} \quad (2)$$

Determinamos el número de moles del gas, imponiendo presión máxima y volumen mínimo (punto 3 del diagrama)

$$n = \frac{P_{\max} V_{\min}}{R T_{\max}} \quad (3)$$

A partir de allí podremos calcular los valores que corresponde a cada punto característico del diagrama ideal. Para ello a continuación realizamos un resumen en la tabla 1, donde expresamos las características termodinámicas de cada punto.

Tabla 1: Presión, Temperatura y Volumen de los 4 puntos del ciclo Stirling .

Punto	Temperatura	Volumen	Presión
1	Mínima	Máximo	nRT_1/V_1
2	Mínima	Mínimo	nRT_2/V_2
2'	Mínima + (Max- Min)	Mínimo	$nRT_{2'}/V_{2'}$
3	Máxima	Mínimo	nRT_3/V_3
4	Máxima	Máximo	nRT_4/V_4
4'	Máxima+(Max-Min)	Máximo	$nRT_{4'}/V_{4'}$

Calculamos los valores de calor transferido en cada transformación del ciclo:

Compresión isotérmica a temperatura baja (1-2):

$$Q_{12} = P_1 V_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (4)$$

El trabajo obtenido es negativo dado que se trata de una compresión, es decir trabajo entregado al sistema:

$$L_{12} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (5)$$

Aporte de calor a volumen constante (2-3), asumiendo que el regenerador no tiene volumen muerto y es 100% efectivo:

$$Q_{23} = nC_V(T_3 - T_2) \quad (6)$$

$$Q_{2'3} = nC_V(T_3 - T_{2'}) \quad (7)$$

Expansión isotérmica a temperatura alta (3-4):

$$Q_{34} = P_3 V_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (8)$$

Este trabajo tendrá signo positivo debido a que la cantidad de calor que ingresa al sistema:

$$L_{34} = nRT_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (9)$$

Extracción de calor a volumen constante (4-1), finalmente el gas expandido retorna al estado 1, atravesando el regenerador y finalizando el ciclo. Por lo tanto el calor que cede al regenerador queda determinado:

$$Q_{41} = nC_V(T_4 - T_1) \quad (10)$$

$$Q_{4'1} = nC_V(T_{4'} - T_1) \quad (11)$$

Este último calor tendrá signo negativo ya que es una cantidad de calor extraída al sistema que absorbe el regenerador. Cabe aclarar que la capacidad calorífica del gas es independiente de la presión mientras que el promedio de temperaturas sea el mismo, por lo tanto los calores transferidos en el regenerador se cancelan.

El trabajo neto generado por el ciclo es:

$$L_{neto} = L_{12} + L_{34} + L_{in} + L_{out} \quad (12)$$

El rendimiento del ciclo es:

$$\eta = \frac{L_{neto}}{L_{out}} = \frac{L_{neto}}{L_2} \quad (13)$$

La eficiencia se calcula considerando la formula de eficiencia de Carnot:

$$\eta = \frac{T_3 - T_1}{T_3} \quad (14)$$

Ahora analizaremos, sólo a modo introductorio, el trabajo del fluido si se desplazara en una curva adiabática y no una isoterma. En los procesos 1-2 y 3-4 resulta:

$$Q_{adiabatica\ 34} = nC_V(T_{max} - T_{adiabatica\ 34}) \quad (15)$$

$$Q_{adiabatica\ 12} = nC_V(T_{adiabatica\ 12} - T_{min}) \quad (16)$$

$$T_{adiabatica\ 34} = T^{k-1} \max\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right) \quad (17)$$

$$T_{adiabatica\ 12} = T^{k-1} \min\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (18)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (19)$$

El trabajo mediante la forma adiabática será mayor al isotérmico en 1-2 y menor en 3-4, por ende afecta al rendimiento y al trabajo, ya que se modifica el calor aportado y extraído.

Como conclusión, el ciclo aumenta su rendimiento con la relación de compresión. Cuando sustituimos las transformaciones isotérmicas (compresión e expansión) por adiabáticas, el rendimiento presenta un máximo que dependerá del fluido de trabajo utilizado. El trabajo, en el caso isotérmico, disminuye al aumentar la relación de compresión y no depende de la compresión y expansión. En cambio, en el caso adiabático, el trabajo disminuye, y las características del fluido juegan un papel importante.

2.1. Modelo Isotérmico

Como introducción en el análisis, puede establecerse una aproximación al ciclo real, mediante un análisis de tipo isotérmico. La primera consideración de este modelo es que el fluido de trabajo (gas) en la cámara de expansión (cámara caliente) y calentador se encuentra a temperatura constante (alta temperatura) como así también en la cámara de compresión (cámara fría) y en el enfriador respectivamente (baja temperatura). Esta consideración de tipo isotérmico permite encontrar una simple expresión que vincula la presión del gas de trabajo con las variaciones volumétricas del motor y en consecuencia conocer el diagrama P-V y la performance del mismo. Considerando como modelo de motor Stirling una sucesión de 5 etapas fácilmente identificables (cámara compresión, enfriador, regenerador, calentador, cámara de expansión) podemos ejemplificar claramente las distintas temperaturas que aparecen. Cada etapa se considera como una

entidad homogénea que contiene una determinada masa de gas m , a una temperatura T , volumen V y presión P , denotada por los sufijos c , k , r , h , e respectivamente. La condición supuesta anteriormente implica además, que los intercambiadores de calor incluyendo el regenerador, sean perfectamente efectivos. Los resultado obtenidos a partir de estas hipótesis arrojan una paradoja ya que concluimos que los intercambiadores en un motor Stirling ideal, son redundantes siempre y cuando la transferencia de calor ocurra en los bordes de las cámaras de compresión y expansión respectivamente. Esta paradoja es la conclusión del modelo isotérmico ideal adoptado, donde ambas cámaras se mantienen a sus respectivas temperaturas constantes. Obviamente esto no es correcto, dado que las paredes de los cilindros no están diseñadas para la transferencia de calor. En las máquinas reales dichos procesos tienden a ser adiabáticos, lo que implica que el calor deba ser provisto mediante los intercambiadores.

2.2. Modelo adiabático

En las máquinas reales, la transmisión de calor a las cámaras de expansión y compresión se produce mediante los intercambiadores de calor, tendiendo las mismas a ser adiabáticas; es decir sin necesidad de transmisión de calor a través de sus bordes, ya que los mismos no son diseñados para tal fin. El trabajo W se genera por la variación de los volúmenes V_c y V_e para lo cual los calores Q_k y Q_h se transfieren al gas, desde sus respectivos intercambiadores, desde el medio ambiente circundante. El regenerador se considera totalmente adiabático y su calor Q_r se transfiere internamente, desde su propia matriz regenerativa al gas que fluye, a través de todo su volumen

Basándonos en el set de ecuaciones derivadas del análisis del modelo se realizó una aproximación al modelo de resolución [4] aplicando las ecuaciones de energía y estado en cada etapa de nuestro motor. En consecuencia, la aplicación de dichas ecuaciones queda generalizada por la ecuación de continuidad aplicada al sistema entero. En primer lugar, se aplica la ecuación de energía a una etapa general ya se trate de una etapa de transferencia de calor o de trabajo (Fig. 4). La entalpía es transferida a la etapa en términos de flujo másico m_i' y temperatura T_i' y desde la etapa m_o' y T_o' .

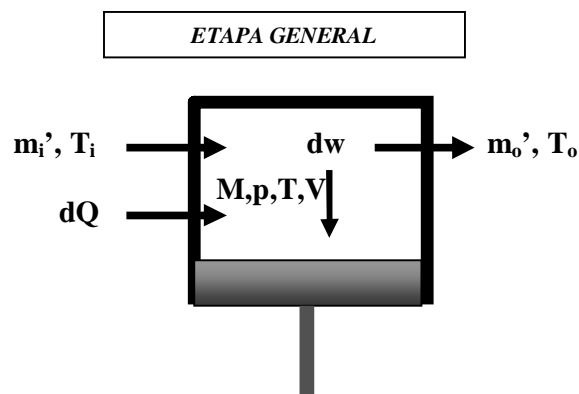


Figura 4 Aplicación del modelo a una etapa general.

Podemos plantear entonces la siguiente sumatoria de energías para el gas contenido en dicha etapa:

$$dQ + (c_p T_i' m_i' - c_p T_o' m_o') = dW + c_p d(mT) \quad (20)$$

Donde m' es flujo másico (dm), C_p y C_v son las capacidades caloríficas del gas a presión y volumen constante respectivamente. Esta es la típica ecuación energética empleada en cálculo de flujos no estacionarios también conocida como ecuación de primer principio aplicada a un sistema abierto, en donde se han despreciado los términos de energía potencial y cinética. Partiendo de esta ecuación y considerando algunas simplificaciones se resuelve el modelo, pudiendo de esta manera establecerse los volúmenes correspondientes para el diseño del motor. Las ecuaciones así resueltas permiten la simulación del motor estableciéndose así la potencia que debería suministrar.

2.3. Desarrollo del sistema parabólico Stirling.

El concentrador fue diseñado partiendo de una parábola de telecomunicaciones de 1.8m de diámetro revestida con aluminio de alta reflectividad [2]. Esta capa fue adherida cortando tiras de 100mm y un espesor de $40\mu\text{m}$ de film de aluminio, cubriendo la superficie de la parábola de aproximadamente 2540mm^2 . (Fotos 1 y 2)



Foto 1. Reflector con film



Foto 1. Reflector con film



Foto 2. Trabajo sobre superficie del reflector

Para que esta parábola pueda optimizar su desempeño esta debería realizar el seguimiento solar. En este caso este movimiento se realiza en forma manual aunque esta previsto su automatización en la segunda fase del proyecto. El seguimiento solar se basa en dos ejes uno de rotación sobre el eje perpendicular al suelo y el segundo la elevación. El movimiento de elevación tiene una velocidad de aproximadamente 15° por hora, mientras que el de rotación se desplaza $\pm 23,5^\circ$ en todo el año. Debido a la lentitud de estos

movimientos se tomo la decisión de realizarlos en forma manual en esta primera etapa, pero concibiéndose un sistema de control de lazo cerrado a implementar en el futuro.

En cuanto a la configuración mecánica del motor, y luego de evaluar algunas alternativas, se determino que por su sencillez y factibilidad fue elegida la configuración de tipo Gamma con los volúmenes calculados mediante las fórmulas desarrolladas mediante la simulación utilizando MATLAB[®]. Según estas simulaciones se obtendrán aproximadamente 15W a 200rpm, utilizando aire [9]. Si bien esto es inferior al valor objetivo (300W) en posteriores versiones se introducirán las mejoras necesarias para cumplir con el objetivo.

Para mejorar e impedir fenómenos de convección entre el aire atmosférico y la superficie del cilindro expuesta a la radiación, se esta implementando una cámara de vidrio que permita mantener el calor en la zona caliente del cilindro. Se prevé además una refrigeración de la zona fría mediante circulación de agua en la zona fría del sistema aunque esto se realizará en una segunda etapa. Se desarrollaron los planos de detalle y se utilizó para su construcción como base un pistón de serie utilizado por Peugeot en un motor de 2000cm³. Se realizarán varias evaluaciones donde se comprobaran para distintos materiales la eficiencia del regenerador.

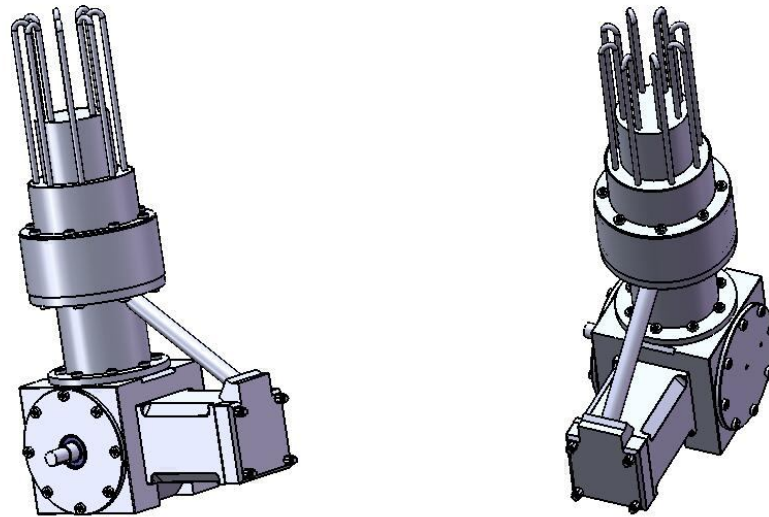


Figura 5. Diseño de motor Stirling

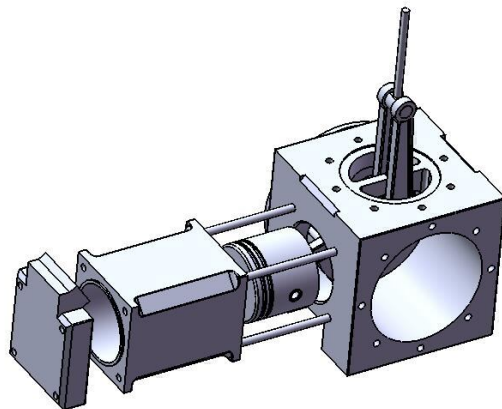


Figura 6. Despiece pistón y carter

3. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo se desarrollaron las herramientas necesarias para el dimensionamiento y desarrollo de un sistema solar Stirling que permitirá la generación eléctrica para uso domiciliario.

Se introdujo el ciclo termodinámico del motor y se desarrollaron los distintos modelos que se han presentado, es decir, el isotérmico, el adiabático. Dichos modelos se analizaron mediante los MATLAB® para determinar los comportamientos y resultados de cada uno, comparándolos y obteniendo la mejor aproximación al modelo real [6] [4]. En la comparación de los dos casos sometidos a una presión de trabajo de 1 bar (presión atmosférica), con aire como fluido de trabajo, se demuestra cómo desde el modelo isotérmico, pasando por el adiabático y culminando con el agregado de pérdidas de carga en los intercambiadores en el modelo de optimización, decae la eficiencia y la potencia resultante del motor. Analizando los resultados obtenidos en los modelos se puede concluir que:

Las temperaturas de pared siempre son superiores en el caso de la cámara caliente o inferiores en el caso de la fría con respecto a la temperatura real del gas.

La presión generada en la cámara caliente es superior a la presión generada en la cámara fría; si bien la diferencia de presión entre ambas caras del desplazador es pequeña debido a la vinculación que proporciona el conducto regenerador junto a los intercambiadores.

Las pérdidas de carga más importantes se provocan en el regenerador.

Estos lineamientos sirven para saber qué puntos trabajar para lograr un aumento de las prestaciones del motor.

Al duplicar la presión media de trabajo, podemos observar un gran aumento de potencia en el modelo adiabático en un 100%, conservando la eficiencia térmica del motor. En cambio, en el modelo de optimización, la potencia aumenta pero el rendimiento baja debido a que se incrementan las pérdidas en consecuencia.

En el trabajo se realizaron otras simulaciones cambiando de fluido de trabajo (aire por Hidrógeno) y se analizaron los resultados de dicho cambio. Se observó que para la misma presión de trabajo, cambiando el fluido de trabajo, podemos incrementar tanto la potencia como el rendimiento del motor.

La utilización de un motor de ciclo Stirling con el aporte de un concentrador solar [8] permite la utilización eficiente de este ciclo sin provocar emisiones al medio ambiente y sin la necesidad de una infraestructura para su funcionamiento. Este proyecto seguirá desarrollándose hasta obtener un generador que permita satisfacer las necesidades de una vivienda (2kW)

4. REFERENCIAS

- [1] Grijalva, J., Estudio teórico y experimental de colector solar parabólico para generación de energía eléctrica, Universidad de Chile, 2008.
- [2] Bornes, Wladimir Gutiérrez, Implementación de equipo concentrador solar parabólico tipo Scheffler, Universidad Técnica Federico Santa María, 2005.
- [3] Zambrano, D., Desarrollo de motor Stirling con concentrador solar para uso en áreas aisladas, IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Las Palmas de Gran Canaria, España, 2009.
- [4] Urieli, I., Berchowitz, DM, Stirling Cycle Engine Analysis, 1st Edition, Adam Hilger Ltd., 1993.
- [5] Finkelstein, T., Organ, A.J., Air Engines, Ed. Professional Engineering Publishing U.K., 2001H. Autor, N.

- [6] Organ, A.J., The regenerator and the Stirling engine, Ed. Mechanical Engineering Publications Limited London and Bury St. Edmunds UK, 1997
- [7] Álvarez Flores, J.A., Máquinas térmicas motoras 1, Ed. Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.
- [8] G. Walker., Stirling Engines, Oxford Univ. Press, 1980.
- [9] Beale W.T., Free-piston Stirling Engines Some Model Tests and Simulations, SAE Cong., Detroit. MI, SAE paper 690230, 1969.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Nacional de General Sarmiento especialmente al Instituto de tecnología Industrial y a la Universidad Argentina de la Empresa en especial a la Facultad de Ingeniería y Ciencias exactas, por la colaboración y la provisión de material bibliográfico y la utilización de sus laboratorios. Agradecemos también la desinteresada colaboración de Telefónica de Argentina.