

Manufactura y puesta en marcha de un motor Stirling tipo gamma para su uso en sistemas de generación distribuida

Andrés Felipe Álvarez Restrepo, José Mario López Hincapié

Resumen

El escenario energético mundial avanza hacia el mejoramiento de la eficiencia energética que esté al alcance de toda la población acompañado de la disminución de los efectos negativos al medio ambiente, en este orden de ideas los sistemas de generación distribuida son necesarios de implementar en la actualidad y los motores Stirling son una alternativa de estudio para atender a este llamado.

En el presente trabajo se realizó la manufactura del motor Stirling tipo gamma con base en los planos del profesor Andrés Sanzol, se abordan en detalle aspectos de fabricación y ensamble. Una vez puesto en funcionamiento, se caracterizó dicho motor para hallar las variables de operación que permitieran calcular la potencia y eficiencia eléctrica.

Palabras claves: Ciclo Stirling, Generación Distribuida, Eficiencia, Energía térmica, Motor Stirling

Introducción

Existe una gran probabilidad que las fuentes de energía, principalmente petróleo, gas natural y carbón, se agoten en el futuro; ni siquiera las estimaciones más optimistas de reservas adicionales pueden justificar su uso continuo (Terrasa, 2021). La producción, distribución y consumo racional de energía eléctrica son necesidades técnicas, ecológicas y sociales urgentes. Por tanto, integrar recursos de generación alternativos es el desafío tecnológico actual. Además, es indispensable que el desarrollo industrial y socioeconómico de un país depende en gran medida de la solución del problema del suministro de energía. En Colombia el 3% de la población nacional no tiene acceso a la energía (García Callejas, 2016), pero por otro lado el sector energético está viviendo una transformación que trae oportunidades para la generación distribuida. Por estas razones, han comenzado a surgir varias alternativas de energía renovable para satisfacer las necesidades energéticas nacionales.

En este contexto, surge la necesidad de buscar mecanismos eficientes y competitivos para el uso de dichas fuentes de energía renovables, promoviendo el desarrollo y mejora de las tecnologías utilizadas. La energía solar es una de las soluciones energéticas a nivel mundial, además de ser una fuente inagotable de energía limpia, también promueve la protección del medio ambiente. Una de las alternativas renovables y con alta eficiencia energética son los motores Stirling, los cuales actualmente son objetos de muchas investigaciones debido a su alto potencial para alcanzar altas eficiencias. Los niveles de desempeño del motor Stirling "alcanza un rendimiento superior a cualquier otro motor real teórico, acercándose hasta el máximo posible del motor ideal de Carnot" (LEGAJO & LEGAJO, 2017), con ayuda del desarrollo de diferentes materiales que soportan altas temperaturas reduciendo y evitando el desgaste operacional y de nuevas tecnologías. El motor Stirling es considerado como un motor de combustión externa el cuál no requiere quemar combustible en su interior, se basa en la expansión y la contracción cíclica de un gas sellado en su interior, dicha expansión y contracción se consigue exponiendo el gas a una fuente de alta temperatura y a un sumidero de baja temperatura. En este trabajo se desarrollará un motor Stirling tipo Gamma el cuál es una variante del tipo Beta,

compuesto por dos cilindros separados, uno es el pistón y otro es el desplazador, ambos están conectados por un conducto que permite el paso del gas entre ellos.

A nivel nacional e internacional se evidencian estudios relacionados con el diseño, la construcción, puesta en marcha y rendimiento de los motores Stirling, entre estos estudios se destacan los siguientes: Construcción de un motor Stirling como solución energética a zonas interconectadas (Universidad Nacional de Colombia, 2016); Validación de prototipo de Motor Stirling Solar para la generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas (Murillo Valencia & Usa Ordoñez, 2018) y Proyección de un Sistema Stirling/Dish para Generación Distribuida (Mendoza, Vidal, Cobas, Silva, & López, 2014); Mejoramiento de la eficiencia y ampliación del sistema eléctrico usando motores de combustión externa tipo Stirling (Suarez Gerke, Viera Arzamendia, Valeria, Cano Coscia, & Riveros Saavedra, 2017) e Integración de varios conjuntos de tecnologías de refrigeración utilizando motores Stirling para Microtrigeneradores Distribuidos (San Martín, y otros, 2013)

Contexto

El acceso a la energía eléctrica desempeña un papel crucial en el desarrollo de la sociedad, es indispensable para la comunicación, salud, desarrollo agrícola, implementaciones tecnológicas, acceso a servicios básicos, entre otros factores sociales que sin duda alguna conllevan a la mejora en la calidad de vida de las personas. “En Colombia la electrificación en zonas urbanas es considerablemente buena, corresponde al 99% de la población y en zonas rurales cae al 86%, lo cual representa un aproximado de 2 millones de personas que no tienen en la actualidad acceso a la electricidad en Colombia” (Garces, Tomei, & Franco, 2021). Esta problemática se ve reflejada por la ausencia en la implementación de sistemas de generación distribuida, estos sistemas son idóneos y necesarios ya que tienen como objetivo abastecer energéticamente a las poblaciones ubicadas en zonas rurales de difícil acceso. El gobierno de Colombia a través de la ley 1715 del 2014 busca la integración de energías alternativas principalmente en las zonas no interconectadas del país, energías como por ejemplo la eólica, solar, biomasa, geotérmica, biogás, entre otras, buscando no solo la interconexión eléctrica de los territorios sino también la disminución del impacto negativo al medio ambiente.

En este orden de ideas, los motores Stirling responden al llamado de las energías alternativas, el motor Stirling es un motor de combustión externa que convierte la energía en forma de calor en trabajo mecánico, lo cual posteriormente se convierte en energía eléctrica. Lo que resulta llamativo es que la fuente de calor puede ser la radiación solar, la combustión de biogás, biomasa o calor residual proveniente de algún sitio. Sin embargo, los motores Stirling enfrentan desafíos en su construcción ya que el rendimiento del motor depende en gran medida de una correcta hermeticidad a través del mecanizado de precisión, seleccionar los materiales pertinentes y evitar fricción dentro del sistema. Además, la operación del motor respecto al control de las temperaturas y almacenamiento de energía son factores importantes a tener en cuenta.

Funcionamiento de un motor Stirling y ciclo ideal de Stirling

El ciclo Stirling ilustrado en la **Figura 1** es similar al ciclo de Carnot. Consideremos un cilindro que contiene dos pistones opuestos, con un regenerador entre ellos. Uno de los dos volúmenes entre el regenerador y los pistones se llama espacio de expansión y se mantiene a una alta temperatura T_{max} . El otro volumen se llama espacio de compresión y se mantiene a una baja temperatura T_{min} . Hay un gradiente de temperatura ($T_{max} - T_{min}$) en las caras transversales del regenerador y se supone que no hay conducción térmica en la dirección longitudinal. Se asume que los pistones se mueven sin fricción ni fugas del fluido de trabajo que los encierra.

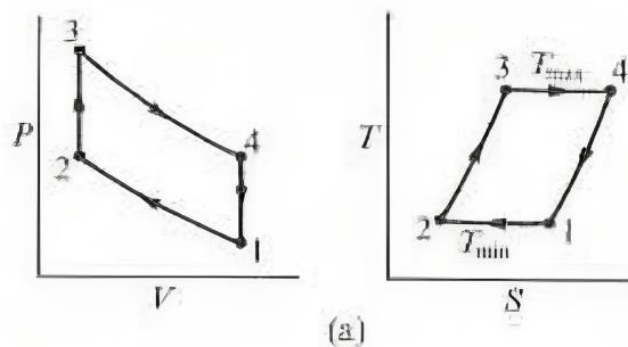


Figura 1. Graficas Volumen (V) vs Presión (P) y Entropía (S) vs Temperatura (T) del ciclo Stirling ideal. Fuente: (Walker, 1980)

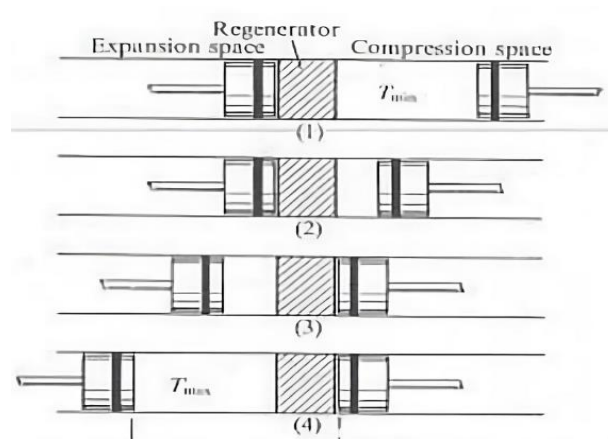


Figura 2. Momentos del ciclo Stirling ideal. Fuente: (Walker, 1980)

Supongamos que el pistón del espacio de compresión está en el punto muerto exterior y el pistón del espacio de expansión está en el punto muerto interior, cerca de la cara del regenerador. Todo el fluido de trabajo se encuentra entonces en el espacio de compresión. El volumen es máximo y la presión y la temperatura se representan por un (1) en los diagramas P-V y T-S, que se muestran en la **Figura 1**. Durante la compresión, proceso (1-2), el pistón de compresión se mueve hacia el punto muerto interior y el pistón del espacio de expansión permanece estacionario. El fluido de trabajo se comprime en el espacio de compresión y la presión aumenta. La temperatura se mantiene constante porque se extrae calor (Q_c) del cilindro del espacio de compresión hacia los alrededores.

En el proceso de transferencia (2-3), ambos pistones se mueven simultáneamente, el pistón de compresión hacia el regenerador y el pistón de expansión lejos del regenerador. El volumen entre ellos permanece constante. El fluido de trabajo se transfiere a través del regenerador desde el espacio de compresión al espacio de expansión. Al pasar a través del regenerador, el fluido de trabajo se calienta desde T_{min} hasta T_{max} , mediante la transferencia de calor desde la matriz, y emerge del regenerador hacia el espacio de expansión a temperatura T_{max} . El aumento de temperatura al pasar por la matriz a volumen constante provoca un aumento de presión.

En el proceso de expansión (3-4), el pistón de expansión se mueve hacia el punto muerto exterior y el pistón de compresión permanece estacionario en el punto muerto interior, adyacente al regenerador. A medida que la expansión avanza,

la presión disminuye a medida que el volumen aumenta. La temperatura se mantiene constante porque se añade calor (Q_e) al cilindro desde una fuente externa. Finalmente, ambos pistones se mueven simultáneamente para transferir el fluido de trabajo (a volumen constante) de vuelta, a través del regenerador y el espacio de expansión, al espacio de compresión. Al pasar por el regenerador se transfiere calor del fluido de trabajo a la matriz, de modo que el fluido de trabajo disminuye su temperatura y entra a T_{min} en el espacio de compresión. El calor transferido en el proceso se contiene en la matriz, para ser transferido al gas en el proceso 2-3 del ciclo siguiente.

Con base en los anterior, el ciclo Stirling busca aprovechar la diferencia de temperatura entre una fuente caliente y una fuente fría para realizar trabajo mecánico. La eficiencia del ciclo ideal es afectada significativamente por esta diferencia de temperatura, siendo mayor cuanto mayor es la diferencia. La expresión matemática que rige este concepto es la siguiente:

$$Et = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Metodología

El proceso de manufactura del motor Stirling tipo gamma desarrollado en el presente trabajo fue hecho en gran medida en maquinaria convencional, los elementos como la base, columnas y volante de inercia fueron elaborados en el centro de mecanizado CNC marca HASS UMC-750 de la I.U.P.B. Por otro lado, la caracterización del motor fue hecha con componentes electrónicos de bajo costo ya fácil aplicabilidad.

Diseño, construcción y puesta a punto del motor Stirling

Los planos originales del motor Stirling tipo gamma son autoría del profesor Andrés Sanzol Moriones (Politecnico salesianos pamplona, 2010), integrante de la comunidad educativa Salesianos Pamplona de la ciudad de Pamplona al norte de España. En cuatro páginas el profesor Andrés, diseñó en detalle cada uno de los elementos que componen dicho motor, acotando las dimensiones y geometrías respectivas. La **Figura 3** corresponde al plano de ensamble del motor Stirling y la lista de los elementos para su construcción.

Inicialmente los planos fueron llevados a un modelo CAD haciendo uso del software *Autodesk Inventor Professional*, teniendo como resultado el siguiente ensamble.

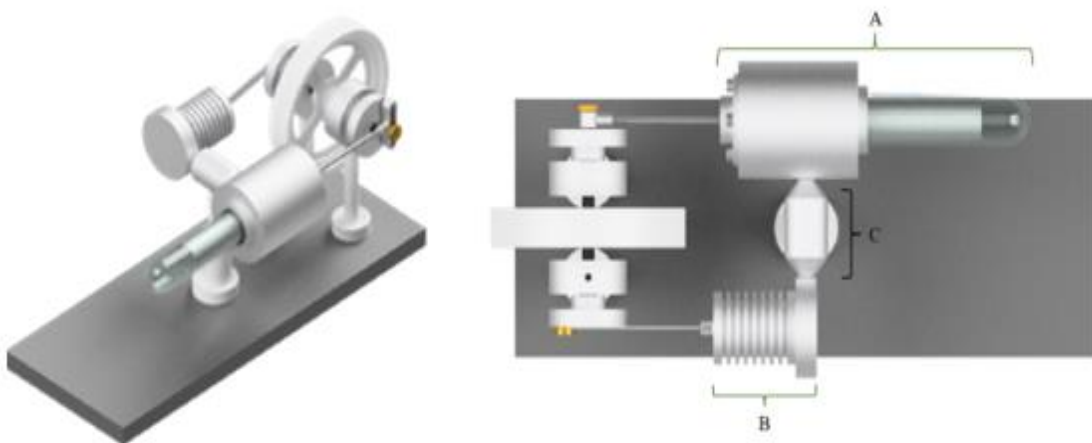


Figura 3. Motor Stirling Modelo CAD. Fuente: Profesor Andrés Sanzol

Previo al proceso de manufactura del motor, se estudió en detalle los principales parámetros de diseño, los cuales son función de la geometría interna de los siguientes elementos: Foco frío (B), Foco caliente(A), regenerador(C), como se muestra en la **Figura 3**.

- Volumen de compresión (V_c)

$$V_c = 3975,68 \text{ mm}^3$$

- Volumen de expansión (V_e)

$$V_e = 7125,13 \text{ mm}^3$$

- Volumen muerto (V_D). El volumen muerto es el espacio interno del motor en el cual el fluido de trabajo, en este caso el aire, no realiza ningún tipo de trabajo mecánico, es un volumen constante. Con base en lo anterior el volumen corresponde a las regiones de color verde señaladas en la **Figura 4**.

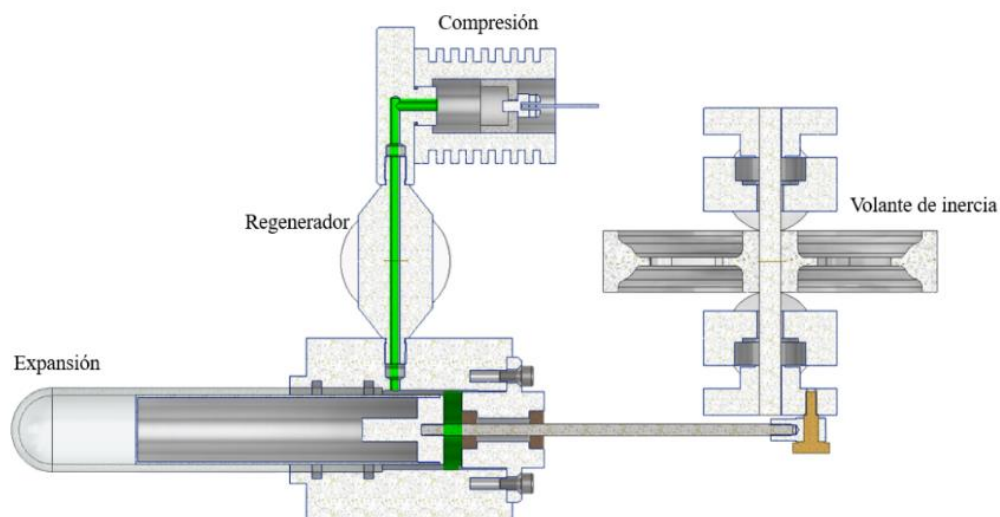


Figura 4. Volumen Muerto Motor Stirling.

Cada región es un cilindro con diferente longitud y radio por lo que el cálculo del volumen fue la sumatoria de estos y el resultado fue:

$$VD = 2072.47 \text{ mm}^3$$

- Relación del volumen muerto (X). Es la proporción del volumen de expansión con respecto al volumen muerto, esta relación afecta la eficiencia del motor, cuanto menor sea la proporción mayor será la eficiencia del motor.

$$X = \frac{VD}{Ve}$$

$$X = 0.29$$

- Relación de volumen de barrido (K). Es la relación entre el volumen del fluido desplazado durante el ciclo (volumen de expansión) y el volumen de compresión, se busca que sea cercana a 1 con el fin de maximizar la eficiencia volumétrica del motor.

$$K = \frac{Vc}{Ve}$$

$$K = 0.56$$

Adicionalmente, la relación de temperatura es un parámetro de diseño relevante, ya que entre mayor sea la diferencia de temperaturas mejor será la eficiencia del motor, tal como se mostró anteriormente, al definir la eficiencia teórica del ciclo Stirling.

$$\tau = \frac{TC}{TE}$$

Cabe mencionar que estas temperaturas se obtienen con las medidas tomadas durante las diferentes pruebas realizadas con el motor en operación.

Por otro lado, el desplazador y el pistón de potencia deben de estar desfasados a 90° uno con respecto al otro como se ve en la **Figura 5** del modelo CAD.

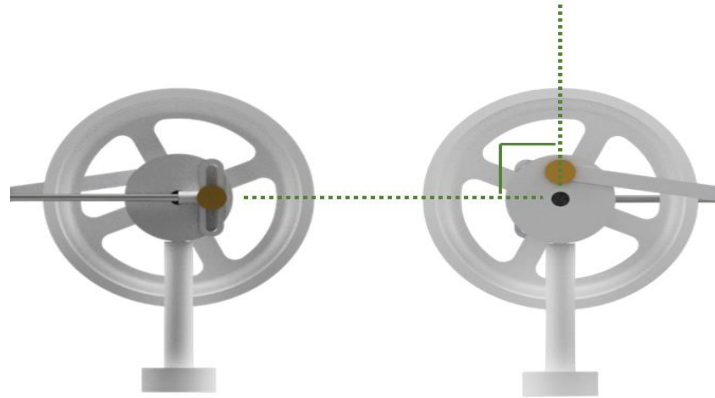


Figura 5. Desfase entre Pistón y Desplazador 90°.

Aspectos relevantes de fabricación y ensamble

En este apartado se da una explicación sencilla respecto a las tolerancias dimensionales de los elementos más críticos del motor como lo son el foco frío y caliente. También se detalla algunos consejos respecto al ensamble que sin duda alguna se deben tener muy en cuenta si se desea un motor Stirling tipo gamma funcional.

Foco frío.

El foco frío consta del cilindro y el pistón de potencia, el funcionamiento del motor en gran medida depende del correcto ajuste entre estos dos elementos. El cilindro fue mecanizado en torno convencional y la medida interna final fue dada con la herramienta escariador de 14.00 mm de diámetro, de este modo se garantizó uniformidad diametral ($\varnothing A=14\text{mm}$) a lo largo del cilindro y además el acabado superficial es muy bueno. El pistón de potencia por su parte fue elaborado en torno convencional y su diámetro exterior fue ajustado en $\varnothing B=13.97\text{mm}$. Es muy importante manejar una adecuada limpieza en el mecanizado principalmente cuando se está dando la medida final para que partículas no deseadas vayan a provocar errores de lectura en la medición con el micrómetro.

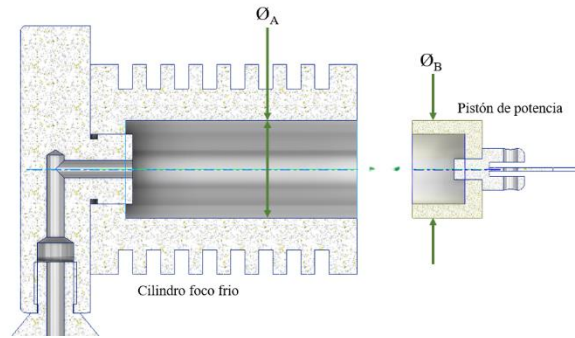


Figura 6. Foco Frio y Pistón Motor Stirling.

En este orden de ideas, el ajuste entre el cilindro y el pistón debe de ser deslizante, con una holgura tal que permita el desplazamiento libre del pistón, pero manteniendo hermética la cámara de compresión. Por otra parte, el aluminio fue el material seleccionado para la fabricación del cilindro y para el pistón de potencia fue utilizado politetrafluoroetileno o también conocido como teflón.

Foco caliente.

El desplazador y el cilindro caliente (tubo de cristal) dan sentido al foco caliente. El desplazador es un cilindro de aluminio el cual está vaciado internamente con la finalidad de eliminar peso. El cilindro caliente es una probeta de vidrio con su extremo en forma de cúpula. La **Figura 7.** corresponde a una vista seccionada del foco caliente en la cual se deja en evidencia la disposición interna de los elementos para dar un mejor entendimiento de los mismos.

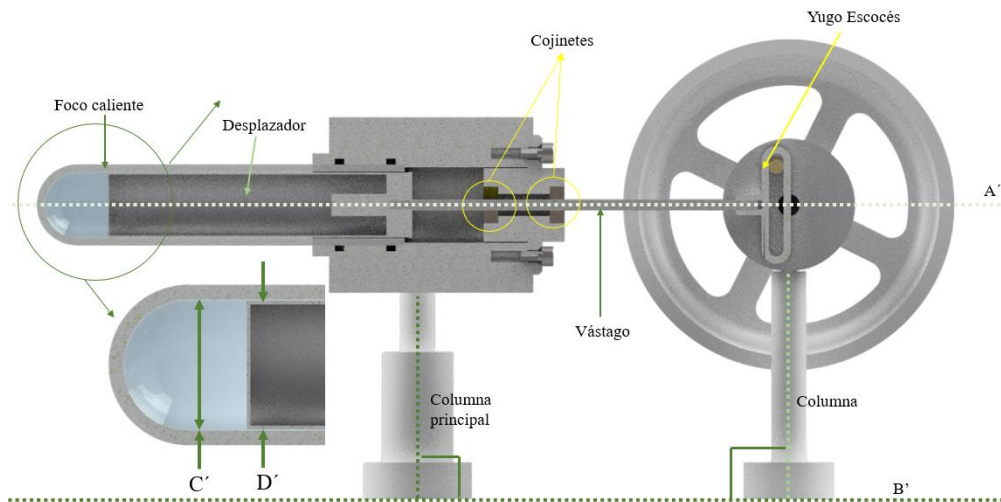


Figura 7. Foco caliente Motor Stirling.

A continuación, se mencionan los aspectos más relevantes e influyentes en la operación del motor:

La línea punteada A' representa el eje de movimiento del elemento desplazador, esta línea debe de ser siempre paralela a la línea punteada B' correspondiente a la base del motor. Además, las columnas deben de estar en un ángulo de 90° con respecto a las líneas horizontales. Por su parte, el yugo escocés es un mecanismo que convierte el movimiento circular en lineal uniforme, se conecta por medio de una rosca al vástago y este a su vez se conecta el desplazador por medio de una rosca adicional en su otro extremo, de este modo se logra transmitir el giro de la volante al desplazador de manera lineal. El vástago fue rectificadado a un diámetro de 3.00 mm y se apoya en los cojinetes señalados en la **Figura 7**. Los cojinetes son de bronce y tienen un diámetro interior de 3.03mm, lo cual permite que el vástago deslice libremente a través de ellos manteniendo hermético el sistema.

Algo de suma importancia es la holgura entre el desplazador y el cilindro caliente, por ser un motor Stirling tipo gamma dicha holgura es del 1% al 2% del diámetro interno del tubo de cristal. En este caso el diámetro C' = 18.00 mm y el diámetro D' = 17.60 mm. Hay una holgura de 0.4 mm a lo largo del desplazador, el desplazador en ningún punto hace contacto con el diámetro interno del tubo de cristal, si éste hace contacto con el cilindro va a provocar fricción entre las dos partes y por ende el motor puede no llegar a funcionar.

Otro aspecto a tener en cuenta es el correcto giro de la volante de inercia, esta debe girar concéntricamente con el eje sobre el cual está montada para que su giro sea uniforme. También hay que garantizar la correcta alineación de cada componente, garantizar perpendicularidad con respecto a la base, paralelismo y colinealidad con los elementos que lo requieran, siguiendo esto se tendrá un correcto funcionamiento de la máquina

Metodología de caracterización del motor Stirling

A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para la medición de variables de operación del motor. Los elementos electrónicos utilizados se presentan en la **Tabla 1** y se presentan de una manera ilustrativa en la **Figura 8**.

	Componente	Función
1	Microcontrolador Arduino uno	Captar y monitorear las variables medidas
2	Condensador 470uF	Filtrar los picos de tensión
3	Resistencias de 100kΩ y 10kΩ	Censar de voltaje
4	Encoder LM393	Censar de revoluciones
5	Generador eléctrico (5v-100mA)	Transformar la energía mecánica transmitida por el motor en energía eléctrica
6	Pantalla LCD 16x2	Visualizar los datos medidos
7	Protoboard	Soportar el montaje electrónico
8	Cables	Conectar los componentes
9	Leds	Carga eléctrica para el motor

Tabla 1. Componentes y Función Sistema Electrónico de Caracterización.

En la **Figura 8**, podemos observar el motor Stirling y los sistemas electrónicos y de generación con las cuales se tomaron los datos de las diferentes pruebas realizadas:

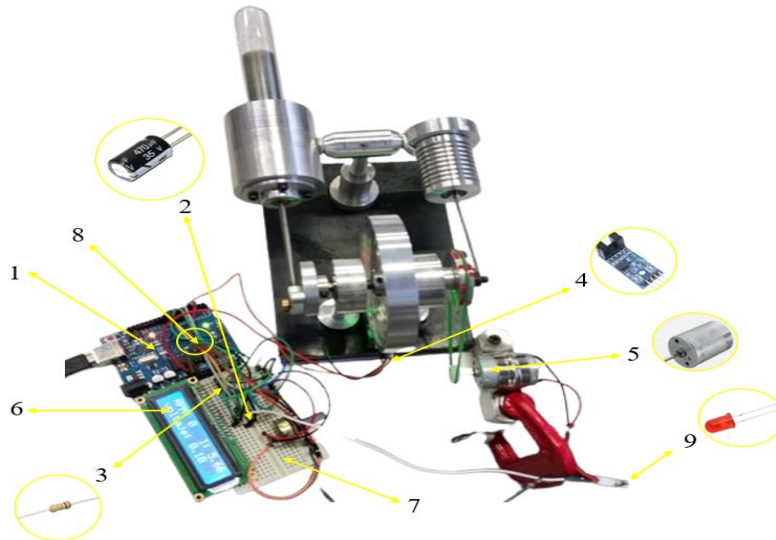


Figura 8. Motor Stirling y sistemas electrónicos y de generación.

Principios de funcionamiento y conexiones

Para medir las variables eléctricas producidas por el motor se utilizó un divisor de tensión el cual está conformado por dos resistencias en serie de 100kΩ y 10kΩ respectivamente, permitiendo así un rango de medición bastante amplio de 0 a 55V. El funcionamiento de este sistema de medición esta dado por la siguiente ecuación:

$$V_{out} = \frac{(R2 \cdot V_{int})}{(R1 + R2)}$$

Del rango de medición determinado por las resistencias y la ecuación, se obtiene que el voltaje de salida leído por el puerto análogo del *Arduino* es igual a una onceava parte del voltaje de entrada, esto debido a que el microcontrolador solo puede leer hasta 5V, adicional a esto se implementó un condensador de 470uF en paralelo con el generador para filtrar los picos de voltaje y tener una curva de datos más suavizada y sin desfases. En cuanto a la corriente, como se tenía una resistencia ya conocida se pudo determinar fácilmente mediante ley de ohm, obteniendo como resultado el cociente entre el voltaje y la resistencia del circuito tal y como se muestra a continuación:

$$I = \frac{V}{R}$$

La metodología de medición utilizada para las revoluciones (*RPM*) se basó en un sensor *LM393* que corresponde a un módulo en forma de herradura, el cual consta de dos componentes principales que son el emisor y el receptor, entre estas dos partes hay una constante interacción de una señal infrarroja, cuando esta señal es interrumpida por un accesorio (generalmente un disco con aperturas) se produce un flanco que puede ser de subida o de bajada, esto es determinado durante la programación y se almacena en una variable contador cuando el módulo envía la señal digital al microcontrolador.

Adicionalmente a los componentes electrónicos mencionados anteriormente, también se implementó un generador eléctrico el cual era inducido por el movimiento rotatorio del motor mediante una transmisión flexible (correa). Además, se hicieron pruebas con 1 y 2 leds conectados en serie para medir la capacidad de generación eléctrica del sistema, teniendo como referencia la potencia eléctrica producida por el generador. También se utilizó una pantalla *LCD 16x2* para visualizar las diferentes variables del sistema mientras se realizaban las pruebas simultáneamente. Todo el circuito estuvo montado en dos *protoboard*, una para el divisor de tensión, el capacitor, la pantalla y sus respectivas resistencias para la iluminación, por otro lado, la segunda *protoboard* se utilizó para el montaje de los leds y la polarización de los mismos.

Metodología para la toma de datos.

La **Figura 9** representa la metodología implementada para los ensayos, la cual consistió en dos tipos de pruebas, en la primera se identificó el tiempo que tarda el motor llegar a la temperatura de funcionamiento y la segunda se dividió en tres con diferentes condiciones de prueba operacional.

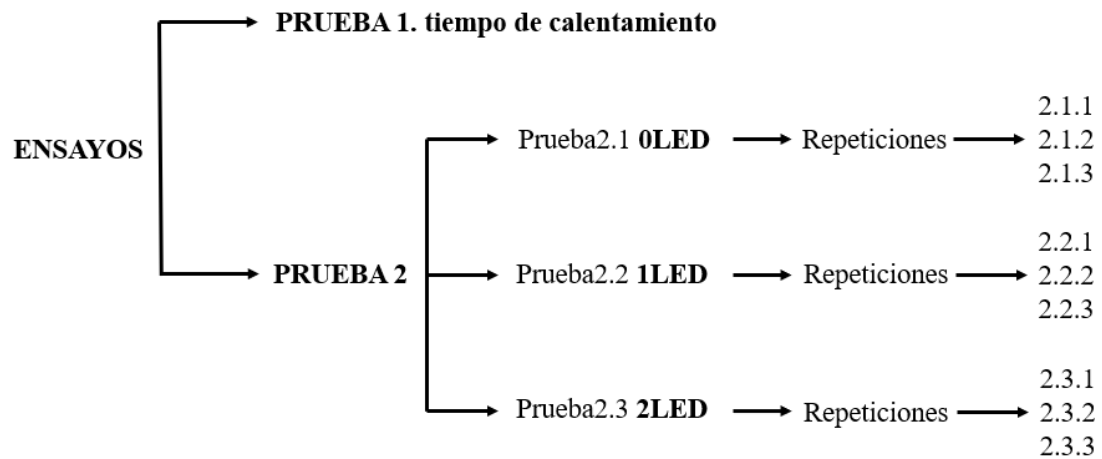


Figura 9. Esquema Pruebas Realizadas

Resultados

La **Figura 10** corresponde a las temperaturas de operación del motor Stirling, durante una de las pruebas la cual fue tomada por una cámara termográfica y configurada para una emisividad de 0.83 que corresponde para el aluminio. La temperatura máxima en el foco caliente fue de **$T_{max}=205^{\circ}\text{C}$** , por otro lado, la temperatura del foco frío de **$T_{min}=26.6^{\circ}\text{C}$** .



Figura 10. Foto Cámara Termográfica

Para esta condición de temperaturas, la eficiencia máxima del ciclo Stirling es de:

$$E_t = 87\%$$

En un caso ideal para las condiciones de temperatura establecida, esta es la eficiencia más alta a la que podría llegar el motor.

Eficiencia real

Dadas las variables obtenidas en la caracterización podemos estimar la potencia eléctrica que suministra el sistema, el flujo másico del combustible y el poder calorífico inferior del mismo. La expresión matemática que relaciona estas variables para hallar la eficiencia real es la siguiente:

$$E_r = \frac{V \cdot I}{PCI \cdot m}$$

Donde:

$$V = \text{Voltaje (V)}$$

$$I = \text{Corriente (A)}$$

$$PCI = PoderCalorificoInferior \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$m = flujo\ masico \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$m = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Donde:

$$\Delta p = pesoAlcohol1 (g) - pesoAlcohol2 (g)$$

$$\Delta t = tiempo1 (s) - tiempo2 (s)$$

El poder calorífico inferior (PCI) es propiedad del combustible, en este caso alcohol al 96%, se calcula de la siguiente manera:

$$PCS \left[\frac{kJ}{kg} \right] = -\frac{Q}{m}$$

Donde:

$$-Q = calor\ de\ reaccion\ (^{\circ}C)$$

$$PCI = PCS - \frac{NH2O \cdot MH2O \cdot hfg}{m}$$

Donde:

$$NH2O = numero\ de\ moles\ de\ agua$$

$$MH2O = masa\ molar\ del\ agua$$

$$hfg = entalpia\ del\ cambio\ de\ fase$$

Según Graham Walker, en su libro "Stirling Engines" (Walker, 1980), donde enseña dos graficas en particular que están relacionadas con el ciclo Schmidt y que resultan ser de gran interés para el presente estudio. En la gráfica número 1, asocia el parámetro de potencia adimensional del ciclo Schmidt con la relación de volumen de barrido (volumen de expansión) en función de la relación de temperaturas. En la gráfica de la **Figura 11**, relaciona el parámetro de potencia con la relación de volumen muerto en función también de la relación de temperaturas del foco frio y del foco caliente. Ambas graficas comparten dos curvas correspondientes a la relación de temperaturas, ambas relaciones son de $t=0.5$ y $t=0.25$ respectivamente. Es importante tener en cuenta que entre mayor sea la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frio mayor será el rendimiento del motor, esto se evidencia en dichas graficas ya que si tenemos

por ejemplo un $t=0.1$ se obtiene una curva en una posición superior a las dos presentes de $t=0.5$ y $t=0.25$,

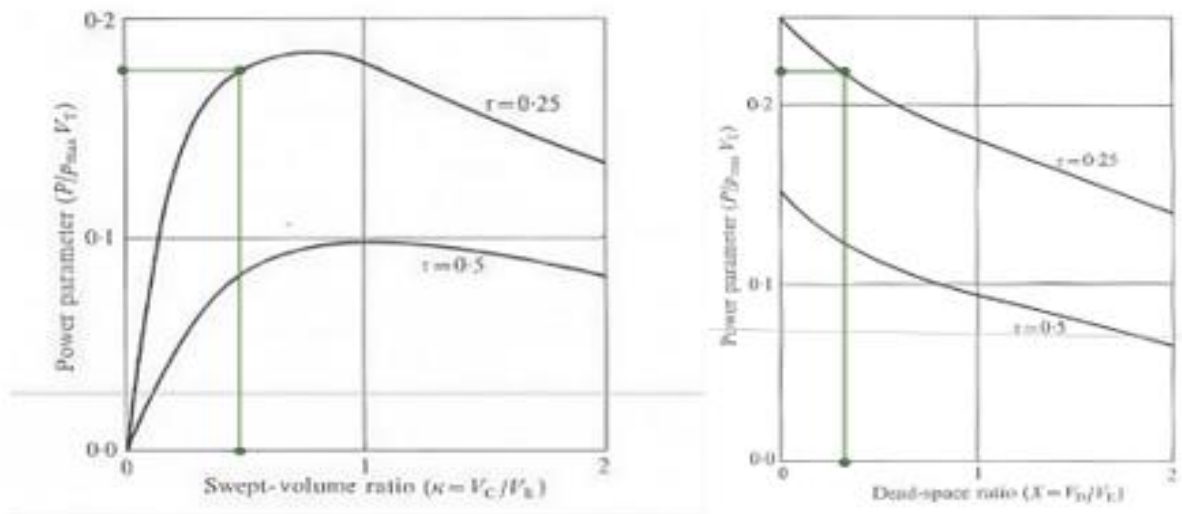


Figura 11. Graficas Ciclo Smith

Fuente: (Walker, 1980)

Según el modelo CAD la relación de volumen de barrido y muerto es de $K=0.56$ y $X=0.29$ y según la **Figura 11** el parámetro de potencia es de aproximadamente 0.18 para la primera gráfica y de 0.22 para la segunda, estos valores son adimensionales y considerando la escala de la gráfica se puede afirmar que el diseño del motor por parte del profesor Andrés Sanzol es confiable.

Pruebas Realizadas

El tiempo establecido para cada prueba fue de $t=120$ segundos, el combustible utilizado fue alcohol al **96%**.

Prueba 1. Prueba de calentamiento

El motor Stirling tipo gamma no comienza su funcionamiento por sí solo. Luego de calentar el foco caliente por un tiempo determinado hay que darle manualmente un giro a la volante de inercia para que el motor inicie su funcionamiento cíclico. La prueba 1 tiempo de calentamiento consistió en determinar el tiempo que le lleva al motor calentarse hasta la temperatura mínima de funcionamiento donde T_c =temperatura foco caliente, T_f =temperatura foco frío, la **Tabla 2** resume los datos de dicho ensayo.

	Combustible consumido (g)	Tc (°C)	Tf (°C)	Tiempo(s)
Prueba 1	1	170	30	40

Tabla 2. Datos Prueba de Calentamiento

Se encontró que el motor llega a la temperatura de operación en 40 segundos y se consume 1g de alcohol en este tiempo.

Prueba 2. En este grupo de ensayos se determinó tres condiciones para los ensayos y se realizaron tres pruebas para cada condición, en la **Tabla 3** se evidencia el promedio de los datos recopilados a lo largo de las 9 pruebas.

- **0LED**, es decir que únicamente se aplicó energía en forma de calor al motor y se observó el comportamiento de las *RPM* en función del tiempo y de la temperatura.
- **1LED**, Se conecto un alternador al giro de la volante para convertir la energía mecánica en eléctrica y así lograr encender un diodo emisor de luz (*LED*).
- **2LEDs**, Se realizo lo mismo que en la condición 2 solo que en este caso se conectó en paralelo un *LED* adicional

Combustible: Alcohol al 96%			PCI [KJ/Kg] =25357.04118
Tiempo=120 s			
Variable	Condición de la prueba		
	0LED	1 LED	2 LED
RPM	379.99	215.47	217.69
Voltaje[V]	--	2.22	2.20
Corriente[mA]	--	5.50×10^{-4}	5.50×10^{-4}
Temperatura Foco Caliente	160.3	160.3	195.3

[°C]			
Temperatura Foco Frio [°C]	26.3	26.7	32.5
ΔCombustible[g]	2.3	2.7	2.0
Flujo masico combustible \dot{m} [kg/s]	1.92×10^{-5}	2.25×10^{-5}	1.67×10^{-5}
Potencia eléctrica[W]	--	1.22×10^{-3}	1.21×10^{-3}
Potencia térmica[W]	0.49	0.57	0.42
Eficiencia eléctrica [%]	--	0.21	0.29

Tabla 3. Promedios de Datos y Resultados de los Cálculos realizados

En la **Tabla 3** se evidencia los promedios de los datos obtenidos durante las pruebas y los resultados de los cálculos realizados.

La **Figura 12** deja en evidencia el incremento de las *RPM* a medida que pasa el tiempo, esto tiene que ver directamente con la temperatura de operación del motor, a medida que pasa el tiempo la temperatura se incrementa haciendo que la diferencia de temperatura entre el foco frio y el foco caliente sea más amplio. Las *RPM* máxima del motor en vacío fue de 460RPM y con carga fue de 280RPM esto se debe a que el generador eléctrico al estar conectado al giro de la volante de inercia y la tensión generada por la banda representa una carga mecánica para el motor lo que en consecuencia lleva a que la velocidad de giro se reduzca.

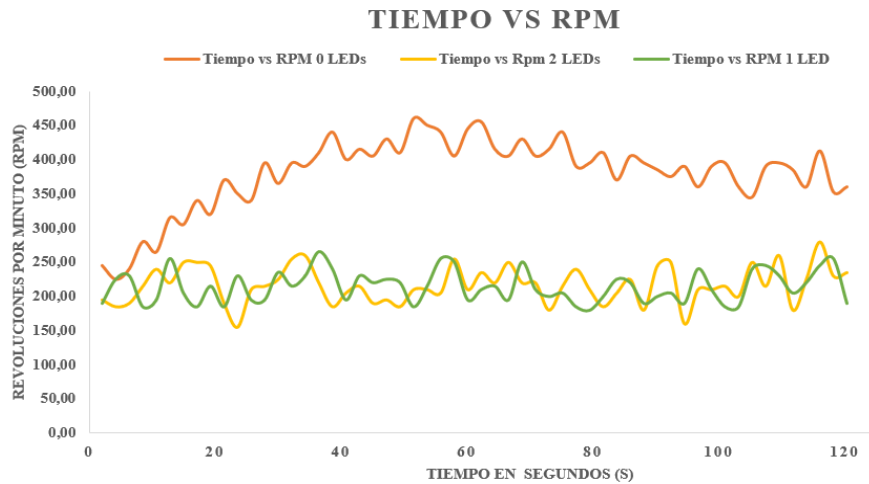


Figura 12. Grafica Tiempo vs RPM Promedio de las 3 pruebas realizadas

Conclusiones

En consideración, el motor representa desafíos técnicos de fabricación los cuales se deben abordar acertadamente para lograr un motor funcional, estos desafíos los podemos resumir en fricción y fugas del fluido de trabajo, en este caso aire. En el desarrollo de la fabricación nos dimos cuenta de que las tolerancias dimensionales de cada uno de los elementos deben ser excelentes en precisión y acabado superficial, especialmente los elementos que trabajan bajo fricción como lo es el cilindro del foco frío y el pistón de potencia, de esta manera se evitara reprocesos. También cada perforación de los elementos del motor debe ser perpendicular al plano donde se apoye el elemento, esto con el fin de que a la hora de ensamblar cada pieza quede correctamente alineada. Adicionalmente, es importante manejar una constante limpieza en la manufactura y ensamble. En este orden de ideas, seguir estos lineamientos llevaran a un motor Stirling funcional.

Los sistemas de generación distribuidas con motores *Stirling* serian de gran ayuda para la generación de energías limpias y renovables utilizando energías como el biogás y la radiación solar, disminuyendo la contaminación en nuestro planeta, el reto radica en optimizar el motor y que alcance eficiencias mas cercanas a la teórica con ayuda de nuevas investigaciones.

En la caracterización y cálculos realizados para nuestro motor Stirling tipo gamma encontramos que el motor todavía no llega a un valor adecuado de eficiencia real la cual estuvo en un valor entre 0.21 y 0.29 % y esto no es un valor aproximado a la eficiencia teórica el cual arrojó el 87%, esto debido a diferentes factores como la transferencia de calor, fricción entre algunos componentes y la llama generada por el mechero de alcohol al 96%, ya que no, nos garantiza una temperatura constante en el foco caliente lo cual hace que el motor funcione de una manera menos optimizada provocando un bajo nivel de funcionamiento.

Bibliografía

- Garces , E., Tomei, J., & Franco , C. (2021). Lessons from last mile electrification in Colombia: Examining the policy framework and outcomes for sustainability.
- García Callejas, D. (2016). *El 97% de la población colombiana tiene acceso a energía eléctrica, según datos del Sistema de Información Minero Energético Colombiano, una proporción mayor a la mundial que alcanza el 83%, según la Agencia Internacional de Energía.*
- LEGAJO, F., & LEGAJO, C. (2017). *OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE SISTEMA DISCO PARABÓLICO – MOTOR STIRLING.*
- Mendoza, S., Vidal, J., Cobas, V., Silva, E., & López, Y. (2014). Proyección de un Sistema Dish/Stirling para Generación Distribuida.
- Murillo Valencia, D., & Usa Ordoñez, J. C. (2018). *Validacion de un prototipo de motor Stirling solar para la generacion de energia electrica en zonas no interconectadas.* Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10146/T07808.pdf?sequence=5>
- Politecnico salesianos pamplona. (2010). *salesianos pamplona.* Obtenido de <https://salesianospamplona.es/maquinas/index.htm>
- San Martín, J. I., Zamora, I., San Martín, J. J., Aperribay, V., Asensio, F. J., & García, J. (2013). *Tecnologías para Microgeneración Distribuida.*
- Suarez Gerke, G. M., Viera Arzamendia, N. F., Valeria , C. F., Cano Coscia, J., & Riveros Saavedra, W. A. (2017). *Construcción, análisis teórico y experimental de.*
- Terrasa, D. (03 de 10 de 2021). *EL FIN DE LA ERA DE LA GASOLINA ¿CUÁNTO PETRÓLEO QUEDA EN EL MUNDO?* Obtenido de <https://www.bolsamania.com/kmph/cuanto-petroleo-queda-en-el-mundo/>
- Universidad Nacional de Colombia. (2016). *Construyen motor Stirling como solución energética a zonas no interconectadas.*
- Walker, G. (1980). *Stirling Engines.* New York: Oxford University Press.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Javier De Jesús Mejía Sierra por su valiosa orientación a lo largo de la fabricación y puesta en marcha del motor. A nuestro asesor Andrés David Morales Rojas quien nos acompañó y puso a nuestra disposición su conocimiento. A Julián Foronda Duque por su gran aporte en la caracterización del motor. A Jesús Antonio Salas Cardona y Yenny Alexandra Sucerquia García, por su apoyo en los cálculos del combustible utilizado.