

# Modelamiento y Demostración de Funcionamiento de Motor Stirling

*Cepeda Cuartas Diego Alejandro\* Cubillos Nicolas David\* \* IV Semestre\* Motores A Pistón\**

## 1. Resumen

En el presente informe se explicó por medio de un modelamiento y construcción, un motor tipo Stirling, y a su vez, se demostró el funcionamiento y aplicación de este en la vida cotidiana. También, se hicieron los determinados cálculos del diseño y se comprobó si este es factible bajo condiciones de aumento de temperatura, cambios de presión, vibración entre otros factores que arriesgan la vida útil del mecanismo; por otra parte, dicho diseño se expuso y se comprobó su función para así hacer práctica de lo aprendido en motores a pistón.

**Palabras Clave:** Motor, diseño, presión, temperatura, construcción, Stirling.

## 2. Introducción

Los motores a lo largo de su historia son, en su más amplio contexto, una de las invenciones más ingeniosas y sofisticadas del siglo XIX. Estos en general convierten la energía recibida por medio de la electricidad, combustibles o vapor de una fuente de calor en energía mecánica con la finalidad de realizar un trabajo en específico. Este mecanismo se da cuando la máquina de vapor marco el comienzo de la revolución industrial, siendo utilizada para impulsar trenes, barcos , automóviles, etc. Pero, uno de los problemas más importantes para de este tipo de máquinas era que para obtener su mayor potencia se necesitaba tener vapor a altas presiones, generando así explosiones que podrían ser desastrosas para las personas que manipulaban el dispositivo.

Robert Stirling(1790-1878), religioso e ingeniero Escoses nacido en Cloag , innovo en el campo mecánico al construir un diseño de motor que servía simplemente con energía de aire caliente (Gerardo Meiro, 2015), este con el fin de parar las explosiones de calderas y cilindros de los motores a vapor. En este artículo se recreará la invención de Robert Stirling con uno de los tres diseños básicos para este tipo de motor y se buscará manejar los conceptos básicos vistos en Motores a Pistón para obtener resultados eficaces de este dispositivo.

## 3. Planteamiento del problema

Uno de los mayores avances tecnológicos que ha desarrollado el ser humano ha sido la elaboración de distintos motores a lo largo del tiempo. El comienzo de la revolución industrial permitió que dichas maquinas tomaran una gran relevancia debido a la necesidad de progresar urbanamente que influía directamente con los medios de transporte generalmente. A pesar de que en ese entonces ya existían los motores a vapor, lo que realmente se buscaba en ese entonces era la eficiencia y la aplicación de una máquina que se le pudiera suministrar cualquier fuente de calor.

En 1816 Robert Stirling patento una máquina que recreaba el ciclo de Carnot, el proceso consistía en almacenar y liberar calor de manera que se utilizara la mayor parte de energía dándole una efectividad total al sistema. Además, estos sistemas tienen regeneradores los sirven para absorben y ceder calor. Aunque su uso no sea principalmente en coches, a sido de gran utilidad en cogeneradores, submarinos, yates, congeladores y demás.

Actualmente los científicos han seguido estudiando y mejorando el motor Stirling para construir un futuro más estable utilizando energías renovables. La principal característica de estos motores es que utilizan cualquier fuente de calor y optimizan la eficiencia los aparatos.

¿ Como lograr el funcionamiento óptimo de un motor Tipo Stirling?

## 4. Objetivos

### 4.1. Objetivo General

Lograr el funcionamiento óptimo durante un tiempo mínimo 3 minutos de un motor tipo Stirling diseñado y elaborado por los estudiantes.

### 4.2. Objetivos Específicos

- Aplicar los conceptos de estructura y automatización en el diseño y funcionamiento del motor.
- Aplicar conceptos claves sobre motores para la construcción del motor en general.

## 5. Estado Del Arte

El motor Stirling vuelve a aparecer en el año 1937 gracias a los aportes realizados por el laboratorio de Investigación de Philips en Eindhoven, Holanda. También se afirma que después de la Segunda Guerra Mundial este mecanismo volvió a llamar la atención ya que los avances que se habían producido en la ingeniería y el desarrollo de nuevas ciencias como el análisis y comportamiento de los fluidos y nuevos descubrimientos termodinámicos permitían mejorar el rendimiento de este dispositivo obteniendo mayor capacidad de potencia y reduciendo los costos y tamaño del mismo, (William Beale, 1985).

Thom Barea y Verma, en el año 2008, explican el ciclo del motor, diciendo que la zona de compresión del fluido es la que se sitúa a la derecha del regenerador (donde se encuentra el fluido al inicio) y la de expansión se encuentra a la izquierda. El fluido de aire caliente es el encargado de mantener la temperatura en la sección caliente durante la expansión y para ello recibirá energía externa a través de convección, esta ,transmitida por conducción por las paredes hasta llenar completamente el cilindro con dicho fluido, (Thom Barea y Verma, 2008).

Por medio de prácticas, Walker, logra confirmar que los motores tipo Stirling no trabajan con el ciclo Stirling ya que conseguir una compresión o expansión isotérmica sigue siendo muy complicado para la tecnología actual, aunque los calentadores y refrigeradores se acerquen lo máximo posible, tampoco trabajan con una eficiencia del 100%, (Walker, 1973).

## 6. Marco Teórico

El ingeniero Robert Stirling inventó su motor de combustión externa y lo patentó en 1816 con el fin de conseguir un motor menos peligroso que el motor de vapor. Su funcionamiento se genera por la expansión y compresión de cualquier tipo de gas como helio, nitrógeno, hidrógeno o aire, y a su vez , implementando una fuente de calor externa en alguno de los cilindros para que obligue al fluido a desplazarse cíclicamente entre los cilindros, también mencionando que entre la relación entre pistón y desplazador existe un desfase de  $90^\circ$ . Este motor se puede construir basado en tres distintos tipos de acomodación de cilindros como se muestran en la figura (1), cada uno de estos recibe el nombre de Gamma, Beta y Alfa.

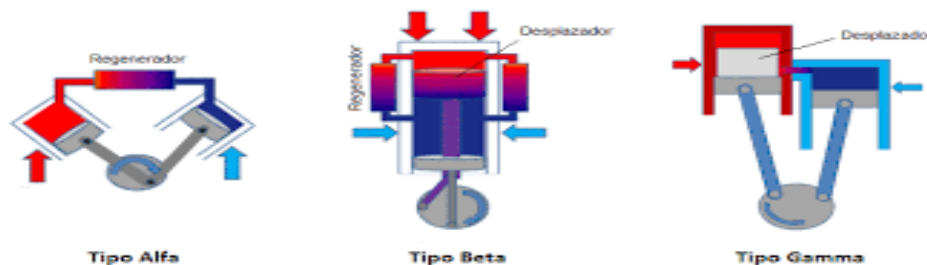


Figura (1) Tipos de Motor Stirling, Pablo Utrilla Noriega,(2019).

**Motores Tipo Alfa:** Diseñado por Rider, este tipo de motor se basa en dos tubos cilíndricos, colocados perpendicularmente cada uno, que están conectados por un tubo el cual tiene como función compartir el calor de la sección caliente a la sección

fría del motor; su movimiento es óptimo gracias a que el aire caliente se desplaza cíclicamente al cilindro frío, generando un trabajo que permite el funcionamiento de este tipo de dispositivo.

**Motores Tipo Beta:** Este es el primer diseño creado por Stirling, este consiste en dos pistones concéntricos entre sí en un mismo cilindro, este tipo de motor es el más semejante al ciclo de Carnot o ciclo ideal ya que en el ámbito termodinámico este motor presenta una gran eficiencia, este motor también consta de un cigüeñal el cual cumple la función de unir los desplazadores con un desfase de 90° entre los desplazadores que unen el pistón primario y el desplazador que une el pistón secundario que es el mismo que recibe el calor externo del mechero. Este es uno de los diseños más complejos de este tipo de motor ya que el pistón debe de tener dos bielas y a su vez permitir que el vástago logre moverse libremente junto con el el desplazador ( Ana Duato, 2016).

**Motor Tipo Gamma:** Este modelo es uno de los más sencillos a la hora de su construcción, es derivado del motor tipo beta ya que transmite el calor de la misma manera que el tipo beta, pero este diseño presenta dos cilindros distintos unidos por un tubo milimétrico, también con desfase de 90° entre el desplazador y el pistón. Este tipo de motor presenta menor eficacia que el tipo beta ya que su expansión de trabajo se genera siempre a menor temperatura.

Para analizar más a fondo el comportamiento del motor Stirling, se recurre a los conceptos de termodinámica y el análisis de sus ciclos en cada uno de los eventos que se presenta en este motor. En un motor a combustión existen 5 eventos en cada ciclo del pistón los cuales son: admisión, compresión, combustión, expansión y escape; En el caso del motor Stirling, ya que este no presente combustión por inyección interna, sus ciclos de potencia se basan simplemente, como se muestra en la figura (2), en una compresión y expansión isotérmica en 3-4 y 1-2, y un aumento y disminución de volumen constante en el ciclo 4-1 y 2-3.

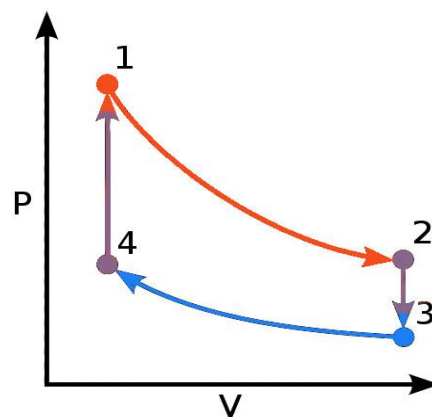


Figura (2) Ciclo de Potencia Motor Stirling, Rafael Helerbrock. (2019)

El volumen que varía entre cada ciclo dentro del pistón se le conoce como el volumen desplazado, este volumen va desde el punto muerto inferior del pistón hasta el punto muerto superior del mismo, este volumen se puede calcular con la Ecuación (1), la cual se expresa como:

$$V_d = z \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot B^2 \cdot S \quad (1)$$

Donde (z) es el número de cilindros del motor, (B) el diámetro del cilindro y (S) la carrera del motor.

El rendimiento térmico motor Stirling como se mencionaba antes es el que más se asemeja al ciclo ideal o de Carnot, este no tiene pérdidas, para calcular el primer factor el cual es el rendimiento térmico real, nos basamos en la ecuación (2), la cual nos describe el trabajo útil de nuestro motor dependiendo de la variación de temperaturas entre el fluido en la parte caliente del motor y la zona fría.

$$\eta_{stirling} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (2)$$

Donde(  $T_f$ ) es la temperatura en el foco frio del motor y (  $T_c$ ) el foco en el cual se aplica calor.

La relación entre el rendimiento térmico real y el teórico se da por la ecuación (5), mostrando así el rendimiento térmico del motor.

$$\eta_{termico} = \frac{\eta_{stirling}}{\eta_{teorico}} \quad (3)$$

Uno de los factores clave para lograr el movimiento eficaz del motor se debe a la fuerza que la biela logra aplicar al cigüeñal, esta fuerza se da gracias a los ángulos transmitidos en los puntos críticos de la biela como se muestra en la figura (3).

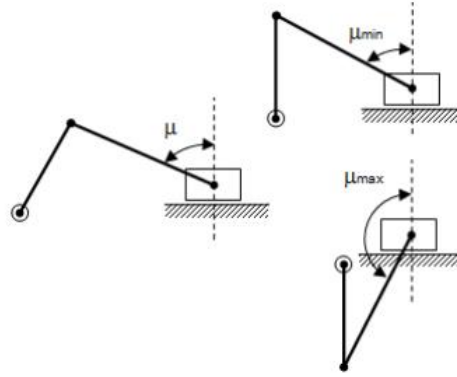


Figura (3). Diagrama de ángulos de transmisión, Itziar Torres. (2015).

Dichos ángulos se pueden hallar mediante la ley de cosenos que se describe en la ecuación (3) y (4).

$$\mu_{min} = \cos^{-1}\left(\frac{l_1}{l_2}\right) \quad (4)$$

$$\mu_{max} = \cos^{-1}\left(-\frac{l_1}{l_2}\right) \quad (5)$$

Donde  $l_1$  es el eslabón primario,  $l_2$  la biela y el deslizador la simulación del pistón.

## 7. Metodología

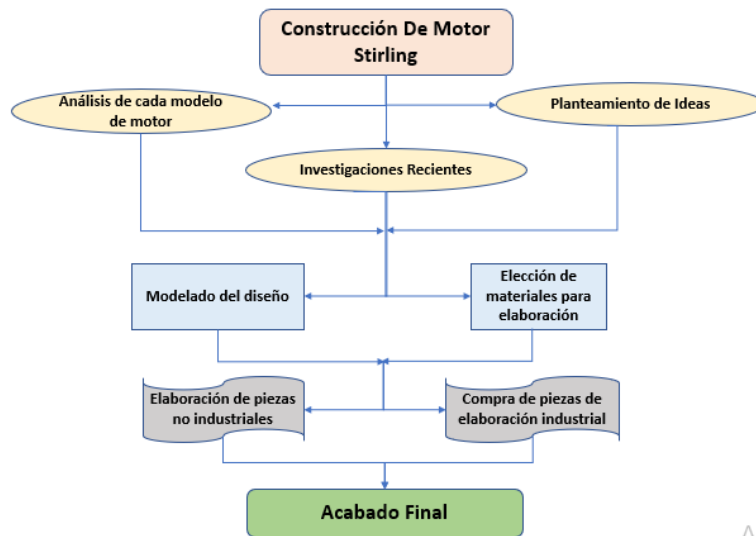
Se inicia con la investigación de varios diseños e investigaciones que hayan logrado la funcionalidad de su motor, este claramente tipo Alpha, y también, que se haya llevado a cabo un proceso claro y útil. Un ejemplo de esto podría basarse en el motor Stirling hecho por Armando Barlotti, figura (3), el cual consiste en un motor tipo alpha hecho con jeringas antiguas y una rueda de carro de compras.

Teniendo claros los conceptos de funcionamiento para dicho motor, se prosigue con el diseño propio del equipo teniendo en cuenta los costos máximos y analizando características de materiales como resistencia a alta temperatura, resistencia a la deformación, resistencia a la torsión, bajo peso y resistencia a la corrosión. La mejor opción es el vidrio industrial ya que este tiene alta resistencia a la temperatura y la termofluencia, para las partes solidas el aluminio puro puede jugar un papel muy importante ya que este tiene alta resistencia a la deformación y corrosión, lo que permite que no halla desgaste en el mecanismo.

También, el paso del fluido es de gran importancia ya que sin él no se logra el funcionamiento del motor, para ello se usa un tubo de silicona industrial, mostrado en el Anexo (1) el cual interconecta los 2 cilindros, a su vez en la parte de

interconexión se coloca cinta teflón gracias a que esta se encarga de evitar completamente las fugas que se intenten presentar por esta sección.

Una vez llevado a cabo esto, se procede a construir o comprar el tipo de piezas necesitadas asegurando que el material comprado si cumpla los requerimientos específicos que se buscan. Para darle forma a los materiales metálicos se usa un sistema de maquinado conocido como torno o fresadora, para así obtener las piezas físicas requeridas. Finalizando esto se procede al ensamble y retoques finales del motor asegurándonos que cumpla con el funcionamiento indicado y haciendo correcciones para lograr esto.



## 8. Descripción del Diseño

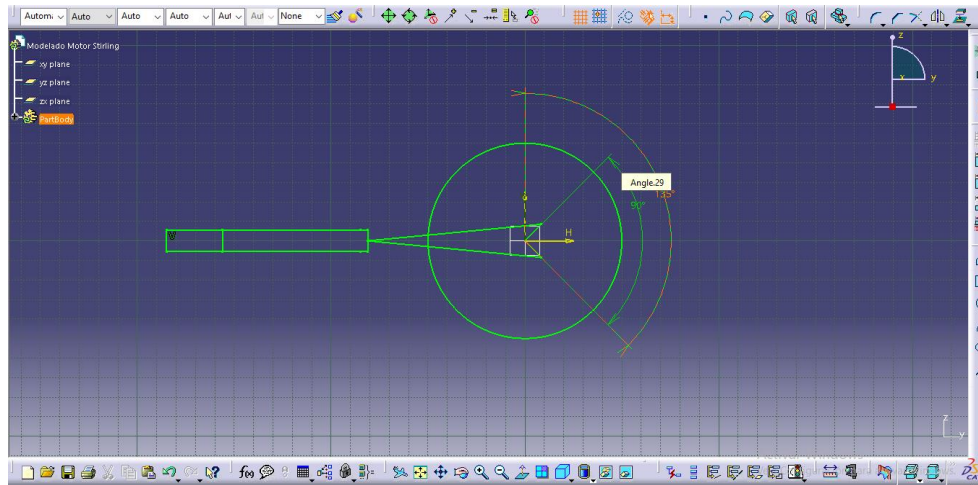
El diseño se basa en un motor tipo Stirling de combustión externa tipo Alpha, ya que este sencillo diseño podría facilitar su construcción y a su vez funcionar bajo un régimen indicado, este constara de 2 cilindros y pistones de vidrio, estos exactamente concéntricos para evitar alguna fuga y a su vez montados en un soporte que ayudara a mantener estáticos los cilindros ya que cuando el motor esté en funcionamiento, este genera altas vibraciones y dañaría el movimiento fluido de los pistones en caso de que los cilindros no se mantengan fijos.

También, se implementará un sistema de biela cigüeñal para que estos transmitan el movimiento giratorio a la rueda, estos también montados en unos soportes los cuales tendrán un rodamiento interno para que facilite un movimiento rotativo fluido. En el caso de este motor, el intercambio de gases se generará por un tubo pequeño que tenga el diámetro suficiente para desplazar el fluido al extremo en frio.

Por último, como se mencionó anteriormente, las vibraciones que genera el motor en funcionamiento podrían afectar el movimiento fluido del diseño, por lo cual para fijar este se usara una tabla con bastante grosor; La mayoría de las partes del motor se buscan ser sujetadas por medio de tornillos de deslizamiento y para madera, para así conseguir el ensamble que se requiere.

## 9. Diseño de Ingeniería

Para la construcción del motor Stirling tipo Alpha, se inicia con un análisis dinámico en 2D en el programa Catia V5 mostrado en la figura (4), y así conseguir unas medidas más precisas para el diseño del dispositivo.



Figura(4). Modelado Dinámico Motor Stirling

Luego de verificar el movimiento efectivo del motor, se prosiguió creando la simulación de las piezas en 3D para de nuevo simular el movimiento del diseño, así como se muestre en la figura (5). Esta simulación también se hace para generar los planos respectivos y tener una base de sustentación para la creación física de este.

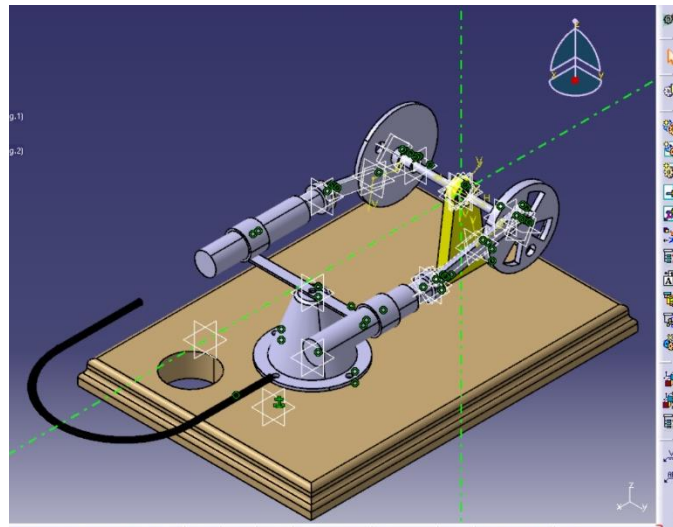


Figura (5). Modelado de Motor Stirling en 3D

Los planos respectivos de este motor se encuentran en el Anexo (2) del presente informe, las partes provenientes de manufactura industrial, como tornillos y arandelas, no se incluyen ya que no son partes creadas por el diseñador.

Para la construcción física del mecanismo, se usan materiales como aluminio, madera y teflón, a su vez, también se usaron algunos tipos de adhesivos como silicona líquida y pegante de resina epóxica. Para la creación de las bielas, los soportes entre biela y pistón, soporte de cilindros y lamina inferior de los soportes del cilindro, se usaron algunos tipos de máquinas

como fresadora y torno, ya que estas permiten dar un moldeado casi exacto de las medidas de cada pieza, en la figura (6) y (7) se presenta el acabado de las piezas de moldeado más sencillas construidas por el grupo



Figura (6). Acabado de piezas pequeñas como soporte de biela y pistón y separadores.



Figura (7). Acabado de piezas medianas no complejas como biela y lamina de cilindros.

Para el diseño de piezas complejas como las uniones del volante, soportes del mecanismo y el volante, se generaron con la ayuda y supervisión del técnico de maquinaria Pablo Párraga ya que el grupo no tiene el conocimiento suficiente del uso de torno para piezas tan complejas como las ya mencionadas, en la figura (8) se puede apreciar el acabado de dichas piezas.



Figura (8). Acabado de piezas complejas como soporte de mecanismo y volante.



Por otro lado, el implemento de piezas de manufactura también fue vital para la construcción del motor Stirling ya que estas son las encargadas de ensamblar cada parte de la máquina sin que está presente una apertura o un movimiento equivocado, una lámina de madera pulida es la encargada del apoyo del mecanismo para que sus soportes se mantengan estáticos.

Para la simulación de cilindro y pistón se compraron jeringas antiguas de vidrio marca Ruthe, las cuales se muestran en el Anexo (3), ya que este material presenta un bajo coeficiente de rozamiento y además es resistente a altas temperaturas. En la figura (9), se puede ver el acabado completo del motor ensamblado.



Figura (9). Acabado y ensamble del motor tipo Alpha

Se consiguió con éxito el funcionamiento de este con el mechero, este siendo activado con alcohol etílico industrial , que presenta un poder calorífico bastante eficaz.

## 10. Análisis de resultados

En esta parte se mostrarán los resultados obtenidos en las pruebas y medidas en 2D de cada parte móvil del motor como se muestra en la tabla (1), las medidas de partes inmóviles se pueden reflejar en el anexo de planos mencionado anteriormente.

Parte	Medida (mm)
Eje	68
Biela	103,5
Embolo	125
Rueda de pistón izquierdo	75
Cigüeñal	85,6

Tabla (1). Medidas en 2D de partes móviles motor Stirling

Cabe resaltar que, por carencia de implementos de medición, el análisis de este motor no presenta bastantes resultados, pero si presenta el análisis más importante para su diseño y funcionamiento óptimo como lo es el ángulo de transmisión óptimo para que la fuerza transmitida por la biela lograra el movimiento de los volantes.

$$\mu_{max} = 95,163$$

$$\mu_{min} = 84,84$$



Por otro lado, para el análisis del motor se encontró su volumen desplazado y su rendimiento térmico en funcionamiento por medio de las ecuaciones (1) y (2) expuestas anteriormente. Su volumen desplazado se da sabiendo que el motor presenta dos cilindros, con una carrera (S) de 3,4 centímetros y un diámetro (B) de 2,3 cm.

$$V_d = 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (0,023m)^2 \cdot 0,034m$$

$$V_d = 2,825 \times 10^{-5} m^3$$

Teniendo así un volumen bastante reducido para que la expansión y compresión en los cilindros sea bastante fuerte y eficaz. También, para el cálculo del rendimiento térmico real del motor se tomaron dos temperaturas las cuales fueron al inicio del arranque en cada cilindro obteniendo una temperatura en la zona fría del motor de 297,25 grados Kelvin y una temperatura en la parte caliente de 415,45 grados kelvin. Así, obteniendo el resultado del rendimiento.

$$\eta_{t_{Stirling}} = 1 - \frac{297,25K}{415,45K}$$

$$\eta_{t_{Stirling}} = 0,285 = 28,5\%$$

El rendimiento es regular, esto debido a que la llama y el fluido no permiten una temperatura mayor en la zona fría de expansión, haciendo que esta zona permanezca con un bajo índice de temperatura. Dicho rendimiento presenta un rendimiento posible comprándolo con su rendimiento teórico el cual se presenta con las temperaturas máximas halladas en la medición siendo la del foco caliente 488,25K y la del foco frío de 297,45K.

$$\eta_{teorico} = 1 - \frac{297,45K}{488,25K}$$

$$\eta_{teorico} = 0,3908 = 39,08\%$$

Haciendo la comparación entre el rendimiento teórico y el rendimiento térmico real podemos hallar el rendimiento térmico del motor, este dado por la ecuación (3) explicada anteriormente.

$$\eta_{termico} = \frac{0,285}{0,3908}$$

$$\eta_{termico} = 0,7293 = 72,93\%$$

## 11. Conclusiones

Se logro de manera práctica aplicar los conceptos de motores a pistón y estudiar los parámetros de un motor tipo Stirling.

Se consiguió el funcionamiento del motor bajo el régimen de temperatura en Bogotá, siendo factible su uso en condiciones de clima frío o cálido, sin embargo, este diseño complejo presenta muchos factores de falla que impiden un mejor régimen de giro al mecanismo los cuales indican que dicho motor debe seguir siendo trabajado y analizado para conseguir que dicho motor pueda ser implementado futuro en diseños de ingeniería.

Los motores en general son mecanismos magníficos los cuales han ayudado a la humanidad a crecer de forma significativa llevando prácticamente al hombre a la luna, pero estos presentan un diseño muy particular y difícil de hacer si no se tienen las herramientas necesarias para ello, también por sus costo a la hora de construcción se debe tener en cuenta parámetros

exactos de construcción y cálculos para que este funcione adecuadamente y no genere mayores costos por fallas continuas, siendo esto algo que estudiar y mejorar con el pasar del tiempo y así seguir dando nuevas ideas y modelos que permitan a humanidad cada vez llegar más lejos.

## **Bibliografías**

CEC. (1998, mayo 31). EL MOTOR STIRLING. 04 de septiembre de 2019, de CEC Sitio web: [https://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap\\_10/strlng1.htm](https://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/strlng1.htm)

Gerardo Meiro Martínez. (2015, mayo 12 ). Stirling, Robert (1790-1878). 27 de agosto de 2019, de mcnbibliografias.com Sitio web: <http://www.mcnbiografias.com/app-bio/do/show?key=stirling-robert>

History Channel. (2013, mayo 25). History Channel Historia del motor [Archivo de vídeo ]. Recuperado 26 agosto, 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=9V9t5p42hzU&t=731s>

Ana Duato. (03 de junio del 2016). Tipos de Motor Stirling. 16 de septiembre del 2019, de SEAS Sitio web: [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/tipos-de-motor-stirling/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/tipos-de-motor-stirling/)

Pablo Utrilla Noriega,(2019). Potencial De Mejora Del Refrigerador Del Motor Stirling Genoa 03 e Impacto Sobre Las Prestaciones Del Mismo, [Figura]. Recuperado de [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5335/fichero/1\\_Introducci%C3%B3n\\_al\\_motor\\_Stirling%252F1\\_Introducci%C3%B3n\\_al\\_motor\\_Stirling.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5335/fichero/1_Introducci%C3%B3n_al_motor_Stirling%252F1_Introducci%C3%B3n_al_motor_Stirling.pdf)

Rafael Helerbrock. (2019). Motor Stirling. 18 de septiembre del 2019, de mundo educacao Sitio web: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/motor-stirling.htm>

Armando Barlotti. (09 de febrero del 2013). Barlotti Motor Stirling 2. 23 de septiembre del 2019, de YouTube Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=oYXG0seBV7A>

Itziar Martija Torres. (2015). ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE MECANISMOS PLANOS. 22 de octubre del 2019, de EHU Sitio web: [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/13215/mod\\_resource/content/1/T3\\_Analisis%20estructural%20de%20mecanismos%20planos.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/13215/mod_resource/content/1/T3_Analisis%20estructural%20de%20mecanismos%20planos.pdf)

## Anexos

- **Anexo (1) Tubo de Silicona Industrial**

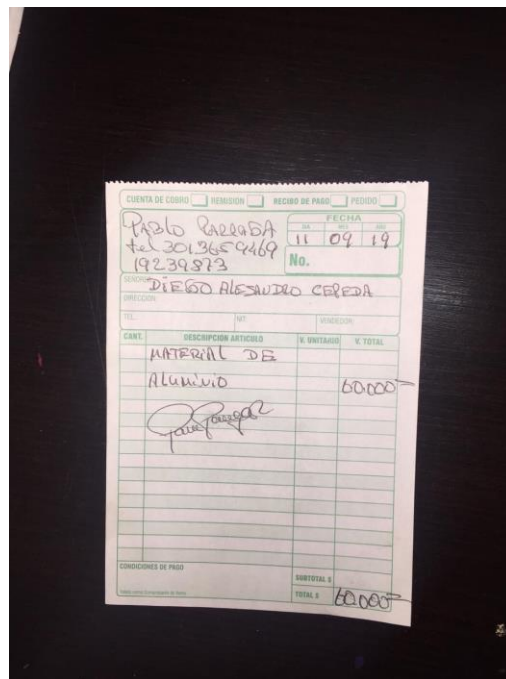


- **Anexo (2) Planos**
- **Anexo (3) Jeringas de Vidrio**



- **Anexo (4) Facturas y tabla de presupuesto**

El presupuesto máximo debía estar entre los 600.000 COP, teniendo un gasto menor a el indicado. En esta sección se adjunta las facturas de material y gasto total del proyecto.



**Anexo ( 4.1) Tabla de presupuesto**

Producto	Unidad	Valor (COP)
Jeringas de vidrio Ruthe	2	162.000
Metro de macizo cilíndrico de aluminio	1	60.000
Resina Epóxica	1	12.000
Tornillos tipo Bristol	4	2.000
Manguera de alta resistencia a la temperatura	1	2.500
Mechero de alcohol	1	14.900
Total		253.400