

DISEÑO DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA GENERADOR DE 40 WATTIOS DE  
POTENCIA ELÉCTRICA

FREDY ALBERTO OCAMPO GARCIA

RAMIRO OCHOA GARCIA

JAIME ALBERTO BEDOYA RAMIRES

FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERIA MECANICA

INSTITUCION UNIVERSITARIA

PASCUAL BRAVO

MEDELLIN

2018

DISEÑO DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA GENERADOR DE 40 WATTIOS DE  
POTENCIA ELÉCTRICA

FREDY ALBERTO OCAMPO GARCIA

RAMIRO OCHOA GARCIA

JAIME ALBERTO BEDOYA RAMIRES

Tesis para optar al titulo de Ingeniera Mecanica industrial

Jefe del departameneto Mecanico  
OSCAR ALBERTO ARROYAVE

Asesor

CHRISTIAN ANDRES GONZALEZ SALAZAR

FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERIA MECANICA

INSTITUCION UNIVERSITARIA

PASCUAL BRAVO

MEDELLIN

2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresa sus agradecimientos a:

**Nuestra familia** por su apoyo incondicional

**La institucion universitaria PASCUAL BRAVO**, ejemplo de libertad para expresar ideas y conocimientos, por su labor formadora de profesionales intelectuales y consientes de la realidad social.

**CHRISTIAN ANDRES GONZALEZ SALAZAR** Por brindarnos su asesoría en todas las etapas de esta investigación, por su humildad en compartir el conocimiento y ser pieza clave en nuestra formación profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	9
1. OBJETIVOS .....	10
<b>1.1. General</b> .....	10
<b>1.2 Específicos</b> .....	10
2. PROBLEMÁTICA .....	11
<b>2.1 Situación Problemática</b> .....	11
<b>2.2 Problema general de investigación</b> .....	12
3. JUSTIFICACIÓN .....	13
<b>3.1 Justificación</b> .....	13
4. MARCO TEÓRICO .....	14
<b>4.1 Características particulares del proyecto</b> .....	14
<b>4.2 Aplicación práctica.</b> .....	14
<b>4.3 Principales ventajas y desventajas del motor Stirling tipo alfa:</b> .....	14
<b>4.3.1 Ventajas:</b> .....	14
<b>4.3.2 Desventajas:</b> .....	15
<b>4.4. Elementos del motor Stirling tipo alfa</b> .....	16
<b>4.4.1. Bloque de cilindros</b> .....	16
<b>4.4.2. Cilindro</b> .....	16
<b>4.4.3. Sistema biela manivela</b> .....	17
<b>4.4.3.1. La Biela</b> .....	18
<b>4.4.3.2. Material de la biela</b> .....	18
<b>4.4.4. Cigüeñal</b> .....	19
<b>4.4.5. El volante de inercia</b> .....	19
<b>4.5. Particularidades de los elementos mecánicos de un motor Stirling</b> .....	20
<b>4.6. Modelado matemático</b> .....	20
<b>4.7. El Ciclo Stirling.</b> .....	21
<b>4.7.1. Introducción</b> .....	21
<b>4.7.2. Funcionamiento del motor stirling</b> .....	21
<b>4.8 Descripción del Ciclo Stirling</b> .....	23
5. METODOLOGÍA DE DISEÑO .....	26
<b>5.1 Etapa de diseño.</b> .....	26
<b>5.1.1 Parámetros de diseño</b> .....	26
<b>5.2 Materiales, métodos y técnicas de trabajo</b> .....	27
<b>5.2.1Materiales</b> .....	27

5.2.2 Herramientas: .....	27
5.3 Metodos y técnicas de trabajo.....	28
5.3.1 Componentes y funciones de los elementos del motor. ....	30
5.3.2 Cilindro de alta temperatura:.....	30
5.3.3 Cilindro de baja temperatura:.....	30
5.3.4 Pistones: .....	30
5.3.5 Bielas: .....	30
5.3.6 Cigüeñal: .....	31
5.3.7 Bloque del motor:.....	31
5.3.8 Tapa bloque del motor: .....	31
5.3.9 Volante:.....	31
5.3.10 Rodamientos:.....	31
5.3.11 Junta torica pistones:.....	31
5.3.12 Tornillería de fijación:.....	31
5.3.13 Bulones de los pistones: .....	31
5.3.14 Regenerador:.....	32
5.4 Cálculos de diseño .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.5. Modelado CAD.....	33
5.5.1 Modelado del pistón en auto CAD.....	33
5.5.2 Cálculos de la masa de la biela.....	33
5.5.3 Calculo de la masa de la manivela (Mm) .....	34
5.5.4 Modelado 3D del cigüeñal con los contrapesos.....	34
5.5.5 Diseño del bulon de pistón.....	35
5.6 Simulación. ....	35
5.6.1 Análisis del pasador en el software solid works .....	35
5.6.2 Análisis de la biela en el software solid works .....	36
5.6.3 Análisis del cigueñal en el software solid works .....	37
5.6.4 Grafica de cambios de temperatura en el motor.....	38
5.7. Analisis de la informacion. ....	39
6. CONCLUSIONES.....	45
7. BIBLIOGRAFIA .....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parametros de diseño .....	26
Tabla 2 Propiedades Fisicas del piston .....	33
Tabla 3 Propiedades Fisicas de la biela .....	33

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 configuración mecánica del bloque de motor Stirling tipo alfa V a 90° .....	16
FIGURA 2 Transformación de la presión del fluido de trabajo en par motor por el sistema biela-manivela.....	17
FIGURA 3 Partes de la biela .....	18
FIGURA 4 cigüeñal de un motor alfa.....	19
FIGURA 5 Volante.....	19
FIGURA 6 Principales variables que determinan el funcionamiento Del motor Stirling .....	20
FIGURA 7 Esquema de configuración de un motor Stirling.....	21
FIGURA 8 Etapas a las que es sometido un gas en un motor Stirling .....	22
FIGURA 9 Diagrama P-V y P-S del ciclo Stirling.....	24
FIGURA 10 Comportamiento del pistón en una compresión isotérmica .....	24
FIGURA 11 Comportamiento del pistón, Proceso isocórico.....	25
FIGURA 12 Comportamiento del pistón expansión Isotérmica.....	25
FIGURA 13 Motor tipo Gamma.....	28
FIGURA 14 Motor tipo Beta .....	29
FIGURA 15 Motor tipo alfa .....	29
FIGURA 16 Modelado del piston.....	33
FIGURA 17 Modelado biela.....	33
FIGURA 18 Modelado Masa de la Manivela .....	34
FIGURA 19 Modelado esquema Motor Alfa .....	34
FIGURA 20 Modelado Cigüeñal con contrapesos .....	34
FIGURA 21 Modelado del bulon del piston.....	35
FIGURA 22 Analisis del pasador en solid works .....	35
FIGURA 23 Análisis de la biela en el software solid works .....	36
FIGURA 24 Análisis del cigüeñal en el software solid works .....	37
FIGURA 25 Grafica de cambios de temperatura en el motor .....	38
FIGURA 26 Esquema grafica de temperature en el motor.....	38
FIGURA 27 Variables termodinamicas.....	39
FIGURA 28 configuración presión de giro para la manivela.....	40
FIGURA 29 Configuración torque de giro para la manivela.....	40
FIGURA 30 Parametros termodinamicos modificando la longitud .....	41
FIGURA 31 Resultados 1 .....	41
FIGURA 32 Resultados2 .....	42
FIGURA 33 Resultados 3 .....	42
FIGURA 34 Resultados 4 .....	43
FIGURA 35 Parametros Termodinamicos ajustando la densidad del aire.....	43
FIGURA 36 Resultados de acuerdo a densidad del aire .....	43

## **RESUMEN**

El presente documento de grado, ha sido desarrollado con la pretensión de poner a consideración de la academia, un análisis termodinámico-mecánico de un motor Stirling de configuración alfa, procedimiento llevado a cabo por los autores de este proyecto. En consecuencia, la primera actividad que se realizó, fue la de describir el prototipo existente, para exhibir los diferentes compuestos y partes de dicho prototipo en aras de contextualizar al lector.

Tomando como referente que el propósito capital de este análisis era brindar una interpretación de la condición de funcionamiento actual de un prototipo de motor Stirling tipo alfa, a partir de un análisis de ingeniería, se formuló un modelo termodinámico/mecánico de apoyo sobre el funcionamiento del motor Stirling tipo alfa objeto de este proyecto. Para tal final, se hizo una selección de las variables relevantes en el funcionamiento del motor y también del rango de sus valores

En la parte final del documento, se propone un plan sistemático de simulaciones utilizando el modelo matemático formulado, orientado a interpretar el funcionamiento del motor

## INTRODUCCION

A lo largo de los años, especialmente desde que aparecieron las industrias y el motor de combustión interna, la atmósfera ha ido sufriendo cambios irremediables que hasta hoy en día siguen sucediendo. Algunos efectos de esos cambios son el efecto invernadero y el calentamiento global, causando cambios en el clima a nivel mundial trayendo consigo una ola de desastres naturales.

Uno de los causantes de estos cambios es la alta emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, proveniente principalmente de la combustión del petróleo, ocasionando el calentamiento global por la destrucción de la capa de ozono. Este combustible no sólo causa efectos nocivos durante su combustión, sino también durante su transporte, ya que es el causante de la destrucción ecológica cuando ocurre algún derrame de petróleo en el mar. Aún estamos a tiempo de evitar que ocurran cambios más drásticos en el medio ambiente, para lo cual necesitamos reducir las emisiones de gases tóxicos, esto se lograría con el uso de motores que tengan un bajo nivel de emisiones. El motor Stirling puede responder a estos requerimientos, además que trae consigo otras ventajas en comparación con los motores de ciclo Otto y Diesel, como son su alta eficiencia, bajo nivel de ruidos y emisiones tóxicas, y además puede funcionar con una amplia gama de combustibles debido a que es un motor de combustión externa

El objetivo de este trabajo es determinar los parámetros que influyen en su funcionamiento, así como también realizar el estudio teórico y experimental para el diseño,

El motor Stirling tiene un diseño simple y compacto, y un costo de producción relativamente bajo. En el diseño se buscó una manera de reducir los efectos que pueden tener los errores humanos durante la construcción, porque esto se manifiesta en un aumento de la fricción debido a la desalineación de sus partes.

Debido a que el mundo se encuentra en una crisis ambiental, aparte que el precio del petróleo sigue elevándose, tenemos que ver la forma de reemplazar este combustible, buscando otras formas de energía que reduzcan el daño al medio ambiente, por eso los motores Stirling son una buena alternativa, porque son de combustión externa, lo cual hace posible regular mejor la combustión y utilizar diferentes formas de energía (combustibles sólidos, líquidos, gaseosos, energía nuclear, solar, etc.) para su funcionamiento.

Por lo dicho anteriormente, el motor Stirling podría ser usado en zonas rurales donde se cuente con combustibles convencionales o alternativos, y de esta manera se podría utilizar el motor para la generación eléctrica a pequeña escala, lo cual permitirá el desarrollo de las actividades productivas y mejorar la calidad de vida, en dichas zonas, sin dañar el medio ambiente.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. General

Determinar los parámetros de diseño de un motor Stirling tipo alfa que generara una potencia de 40 wattios.

### 1. 2 Específicos

- Establecer el modelo matemático del motor Stirling tipo alfa
- Determinar a qué RPM se tiene el mayor rendimiento
- Determinar y reducir los volúmenes muertos con un diseño adecuado en la geometría del motor.
- Obtener energía lumínica utilizando solo calor como fuente provisora en vías a la obtención de energía eléctrica mediante mecanismo de conversión de energía calorífica en energía eléctrica mediante un proceso termodinámico.
- Comprender el funcionamiento mecánico y termodinámico del motor

## 2. PROBLEMÁTICA

### 2.1 Situación Problemática

El creciente incremento en el precio de combustibles fósiles, el calentamiento global por emisiones de CO<sub>2</sub> impulsan al desarrollo de nuevas formas de obtención de energía más limpia y que ayuden a la desarrollar una soberanía energética, el sol es una fuente energía relativamente inagotable pero pocos son los proyectos que se ha desarrollado en nuestra Ciudad para aprovechar esta energía y transformarla en energía eléctrica. La construcción de un motor Stirling tipo alfa para accionar un alternador eléctrico pretende ser parte de esta solución. Los motores Stirling basan su funcionamiento en el denominado ciclo Stirling el cual explica el comportamiento de gas en las diferentes etapas de expansión y compresión por adición y extracción de calor, en el motor Stirling que se va a diseñar se pretende determinar **los parámetros de diseño necesarios para generar una potencia de 40 wattios con un motor Stirling tipo alfa**, y por ende este se ha convertido en el problema general de investigación.

Los motores Stirling al ser motores de combustión externa tienen una amplia variedad de fuentes de energía (biomasa, energía solar u otro fuente de energía limpia) y puede convertirse en una opción más para disponer de energía en zonas aisladas de red eléctrica, tal y como hoy en día lo es la energía solar fotovoltaica. En cuanto a sus principales desafíos, es una tecnología todavía inmadura que necesita un mayor desarrollo pero actualmente la creciente contaminación atmosférica y calentamiento global abre las puertas para un mejor desarrollo de estos motores para la generación eléctrica, entre la ventajas que presupone los motores Stirling es la mejoría con respecto a los sistemas fotovoltaicos: mientras que un panel solar puede cubrir entre el 5% y el 10% de la energía de una residencia, los motores Stirling pueden llegar a cubrir desde un 40% hasta la totalidad de la energía necesaria de una residencia y por su versatilidad en la fuente de combustible pueden llegar reducir el uso de combustibles fósiles, amortizar el gasto inicial entre uno y tres años, calentar, refrigerar o suministrar electricidad con el mismo sistema, son algunas de las ventajas del uso de motores Stirling. El creciente desarrollo tecnológico, cada vez mayor, no es el único factor del que depende su generalización. Al igual que ocurre con el resto de alternativas energética, el gobierno locales pueden promover su uso, mediante incentivos o subvenciones. Si las empresas constructoras de edificios y los consumidores se conciencien de las ventajas de utilizar motores Stirling para la generación eléctrica, y reciben ayudas para su uso, también contribuirán al avance de los motores Stirling.

## **2.2 Problema general de investigación**

¿Cuáles son los parámetros de diseño necesarios para generar una potencia de 40 wattios de energía con un motor Stirling tipo alfa?

En este trabajo nos limitamos a usar como fluido de trabajo el aire, porque no tiene costo alguno y está en todos lados. Lo ideal sería utilizar He ó H<sub>2</sub>, porque estos gases tienen una mayor conductividad térmica, pero el diseño tendría que ser hermético, lo cual sería complicado y costoso.

Por otro lado, no se puede contar con un quemador y una cámara de combustión totalmente aislada porque sería necesario inyectar aire para mejorar la combustión, por eso es que existe mucha pérdida de calor al medio ambiente haciendo que el consumo específico de combustible sea alto.

La potencia del motor es baja debido a que el motor no está presurizado, ya que es muy difícil asegurar hermeticidad, y, también, al fluido de trabajo utilizado (aire), porque no es el fluido de trabajo más indicado para este motor.

### 3. JUSTIFICACIÓN

#### 3.1 Justificación

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el diseño de un motor Stirling capaz de generar 40 wattios energía.

El emergente mercado y la necesidad de energía no dependiente de combustibles fósiles y más limpias motiva un aumento constante en la investigación de nuevas formas de transformación de energía, Incrementar rendimiento, reducir costos, disminuir pérdidas y el desarrollo de sistemas de almacenamiento más eficientes y económicos incita el diseño de nuevos conceptos de plantas de generación eléctrica (hibridación, mixtas, etc.), los motores Stirling surgen como el principal competidor ante estos nuevos requerimientos en la generación eléctrica.

El campo de la utilización de los motores Stirling en el sector industrial o para el sector residencial tiene un enorme potencial aunque su implementación carece de un marco adecuado de apoyos públicos. Demostrar la fiabilidad y prestaciones de las aplicaciones térmicas y contribuir a las mejoras tecnológicas a nivel de mecanismos y sistemas de utilización garantiza un continuo crecimiento en este campo y acrecienta de eficacia del uso de los motores Stirling en la industria y a los consumidores individuales.

La ejecución de un motor Stirling tipo alfa tiene como propósito acumular la suficiente energía para dotar de iluminación una casa pequeña, que pueda ser ubicado en lugares donde la líneas eléctricas no existen, que sea de fácil mantenimiento y que la inversión se amortiza rápidamente.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 Características particulares del proyecto**

El objetivo principal de este proyecto es el diseño modelado matemático de un motor Stirling tipo alfa capaz de generar una potencia de 40 wattios de energía para acoplarlo a un generador de corriente. El proyecto se aplicara en la ciudad de Medellín como fuente de energía para la utilización de diversas aplicaciones. Buscando además disminuir sus costes de mantenimiento e implantación utilizando materiales económicos. Se estudian diferentes casos intentando así conseguir un caso óptimo con la comparación de todos los casos de estudio.

Como el motor Stirling es un motor de combustión externa, existe una amplia variedad de elementos que sirven como combustible para su funcionamiento entre estos la biomasa, energía solar, GLP, gasolina, o cualquier otro. Para la implementación de este proyecto en particular se utilizara GLP como combustible por su fácil acceso y por qué resulta práctico para fines demostrativos.

### **4.2 Aplicación práctica.**

La finalidad del proyecto es que el motor Stirling tipo alfa sirva como fuente de energía para diferentes tipos de aplicaciones.

### **4.3 Principales ventajas y desventajas del motor Stirling tipo alfa:**

#### **4.3.1 Ventajas:**

El aporte de calor es externo, por lo que las condiciones de combustión son flexibles. La fuente de energía puede ser el sol, por lo cual se pueden reducir la mayor parte de las emisiones (NOx, hollines, hidrocarburos)

La mayoría de los motores Stirling tienen los mecanismos y juntas en el foco frío, y por tanto necesitan menos lubricación y duran más que otras máquinas alternativas.

Los mecanismos son más sencillos que en otras máquinas alternativas, estos es, no necesitan válvulas, el quemador puede simplificarse.

Una maquina Stirling usa un fluido de trabajo de una única fase, manteniendo las presiones

internas cercanas a la presión de diseño y por tanto se reducen los riesgos de explosión. En comparación una máquina de vapor usa agua en estados líquidos y vapor, por lo que un fallo en una válvula puede provocar una explosión peligrosa.

En algunos casos, las bajas presiones, permiten utilizar cilindros ligeros.

Se pueden construir para un funcionamiento silencioso y sin consumo de aire para propulsión de submarinos o en el espacio.

Arrancan con facilidad (despacio y después del calentamiento inicial) y funcionan mejor con temperaturas ambientales frías, en contraste con los de combustión interna que arrancan con facilidad en temperatura templada pero con problemas en temperaturas frías.

#### **4.3.2 Desventajas:**

Los motores Stirling requieren intercambiadores de calor de entrada y salida, que tienen que contener el fluido de trabajo a alta temperatura, así como soportar los efectos corrosivos de la fuente de calor y la atmósfera. Esto supone un encarecimiento de la máquina

El motor Stirling funciona con pequeños diferenciales térmicos; que son muy grandes en comparación al trabajo realizado por culpa de los intercambiadores. Aumentar la diferencia de temperatura o la presión permite motores más pequeños.

Un motor Stirling no puede arrancar instantáneamente, tiene que primero “calentarse”. Esto es cierto para todos los motores de combustión externa, pero menor que otros como la máquina de vapor. Su mejor uso es en motores que requieran una velocidad constante.

#### 4.4. Elementos del motor Stirling tipo alfa

##### 4.4.1. Bloque de cilindros

Es el cuerpo del motor el bloque figura tiene la función de alojar los cilindros en donde se desplazan los émbolos y las bielas además en este se fija el cigüeñal e incorpora por su parte externa los elementos de refrigeración como aletas.

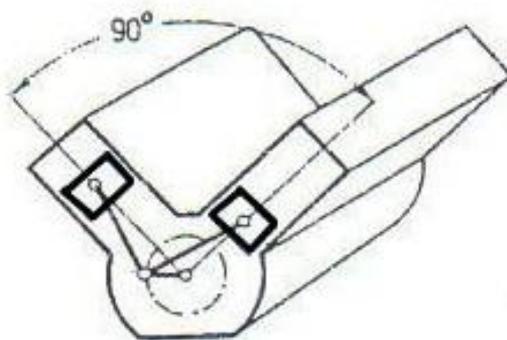


FIGURA 1 configuración mecánica del bloque de motor Stirling tipo alfa V a 90°

##### 4.4.2. Cilindro

En el motor Stirling tipo alfa la camisa esta mecanizada en el mismo bloque de cilindros, la superficie interna de la camisa requiere una superficie pulida y rectificada y cumplir con características como resistencia al desgaste, resistencia superficial, bajo coeficiente de rozamiento cualidades lubricantes y conductividad térmica.

### 4.4.3. Sistema biela manivela

Este mecanismo es el encargado de realizar la transformación del movimiento rectilíneo y alternativo del embolo en movimiento giratorio del cigüeñal

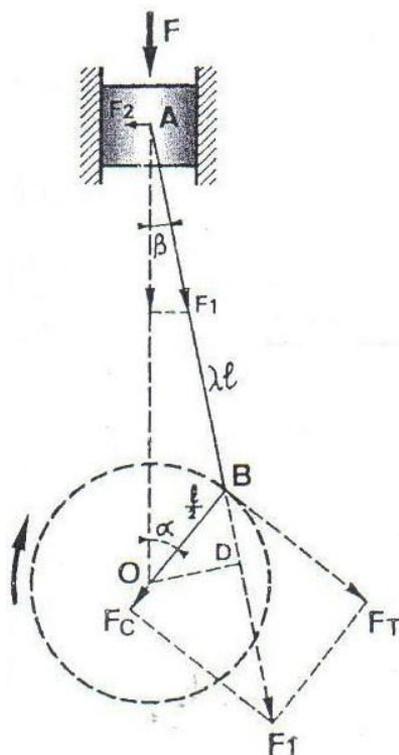


FIGURA 2 Transformación de la presión del fluido de trabajo en par motor por el sistema biela-manivela

En la figura se observa el pistón A que está unido por la biela AB al cigüeñal representado por un círculo. Cuando el pistón reciba la presión del fluido de trabajo la fuerza  $F$  aplicada en su cabeza se descompondrá en dos fuerzas  $F_1$  longitud de biela y  $F_2$  perpendicular al eje del cilindro que se apoyara sobre la pared del cilindro y contribuirá al roce del pistón-cilindro. La biela transmite la fuerza  $F_1$  sobre la muñequilla del cigüeñal representado por el punto B. La fuerza  $F_1$  se descompone a su vez en dos fuerzas  $F_c$  que apoya el cigüeñal sobre sus apoyos y  $F_t$  tangente al círculo descrito por el brazo de manivela, en la rotación del motor, la presión de los gases no será la misma en todos los giros, la fuerza  $F$  variara y por tanto también lo hará la fuerza  $F_t$  de par motor.

#### 4.4.3.1. La Biela

Es la pieza encargada de unir el embolo con el cigüeñal y por tanto está sometida al esfuerzo alternativo del pistón en las diferentes partes del ciclo Stirling de trabajo, esta debe soportar esfuerzos de compresión tracción, flexión debido a la presión del fluido de trabajo fuerza de inercia alternativas angulares y centrifugas

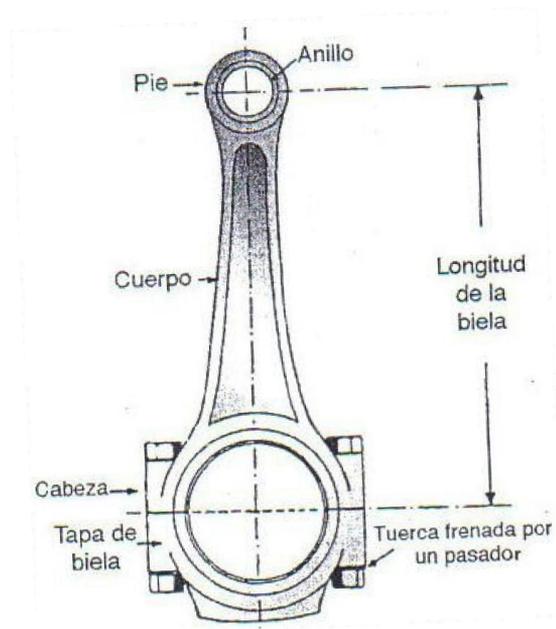


FIGURA 3 Partes de la biela

#### 4.4.3.2. Material de la biela

El material de construcción de la biela debe tener suficiente estabilidad mecánica resistir a los esfuerzos a la que es sometida y su masa debe ser pequeña para reducir la inercia que esta pueda crear. El metal usado generalmente es acero al carbono o aleaciones con níquel cromo manganeso o molibdeno.

#### 4.4.4. Cigüeñal

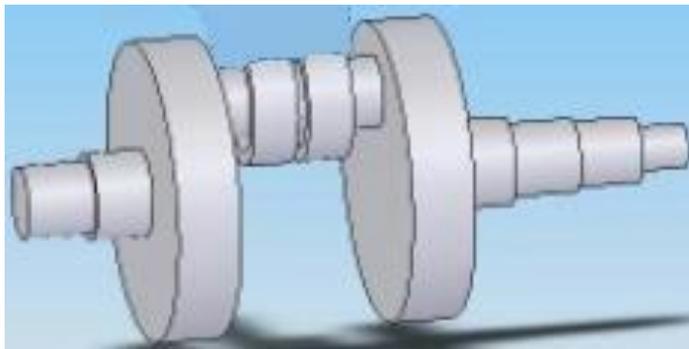


FIGURA 4 cigüeñal de un motor alfa

Este elemento completa el conjunto biela manivela figura 4 es el encargado de transformar el movimiento lineal del pistón en movimiento rotativo la forma del cigüeñal depende de factores propios de cada motor.

#### 4.4.5. El volante de inercia

Esta pieza es la encargada de almacenar energía durante el tiempo que se desarrolla impulso en el motor y la restituye para el resto del ciclo, la energía que el volante almacena debe ser mayor que el trabajo de compresión en el motor y así poder iniciar un nuevo ciclo.

La energía que almacena este volante depende de la masa de su geometría y de la velocidad de giro. Cuando el motor es sometido a una alta carga el trabajo de compresión aumenta y por ende debe aumentar la masa del volante de inercia.

Generalmente se construye en acero o fundición y debe estar perfectamente equilibrado con el cigüeñal.

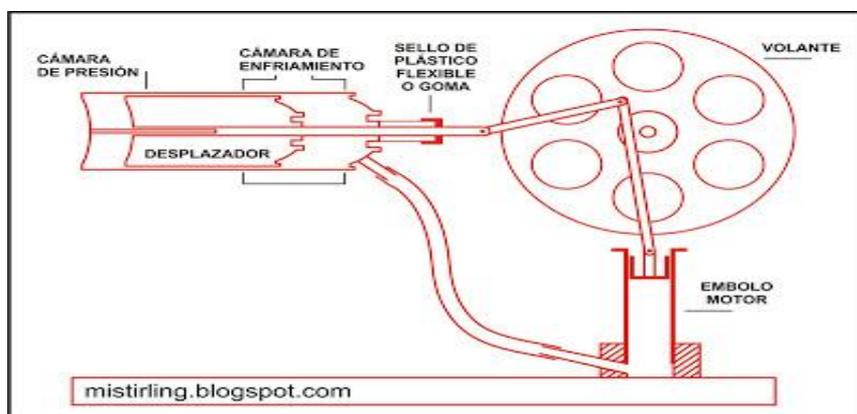


FIGURA 5 Volante.

#### 4.5. Particularidades de los elementos mecánicos de un motor Stirling

Entre las muchas ventajas que presentan los Stirling como suavidad en su funcionamiento, baja relación de compresión, sus componentes mecánicos pueden ser relativamente pequeños cigüeñal, bielas, pistones rodamientos, cilindros, bloque, además tienen una mayor vida útil. Entre todas estas ventajas la principal desventaja suele ser la temperatura que alcanzan los elementos que trabajan en la parte caliente, especialmente evitar la fuga del fluido de trabajo los empaques de los pistones suelen no resistir la elevada temperatura por lo que se hace necesario un adecuado diseño tanto en el cilindro como en el pistón para evitar la fatiga de materiales y su pronta destrucción.

#### 4.6. Modelado matemático

Para el modelado matemático del motor Stirling tipo alfa los parámetros determinantes del funcionamiento están dados por las siguientes variables.

Temperatura en el punto frío Temperatura en el punto caliente Calor de entrada  
Calor de Salida Potencia Salida

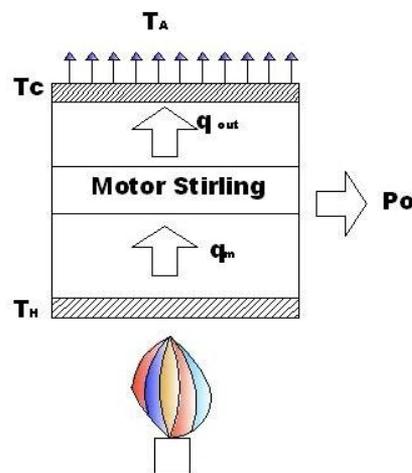


FIGURA 6 Principales variables que determinan el funcionamiento Del motor Stirling de una manera general

## 4.7. El Ciclo Stirling.

### 4.7.1. Introducción

El gran desarrollo de los motores de combustión interna a partir de la mitad del siglo XIX, consiguió que, desde principios del siglo XX, la máquina de vapor y los motores Stirling y Ericsson fueran apartados en la carrera por la industrialización.

Desbancado definitivamente el motor Stirling en aplicaciones motrices y de bombeo, hacia mediados de siglo XX aparece un renovado interés de estos dispositivos para nuevas aplicaciones. Refrigeración, calefacción y generación eléctrica a partir de entes de calor alternativas a los combustibles fósiles de alta calidad son nuevos campos donde el Stirling puede ser competitivo respecto a otros sistemas

### 4.7.2. Funcionamiento del motor stirling

El motor Stirling opera con un fluido calo transportador en un ciclo cerrado, obteniendo el trabajo a partir de cuatro procesos cíclicos – ciclo Stirling- aporte de calor, expansión del gas producto del aporte de calor, extracción de calor hacia un acumulador térmico regenerativo y compresión del gas producto de la extracción de calor.

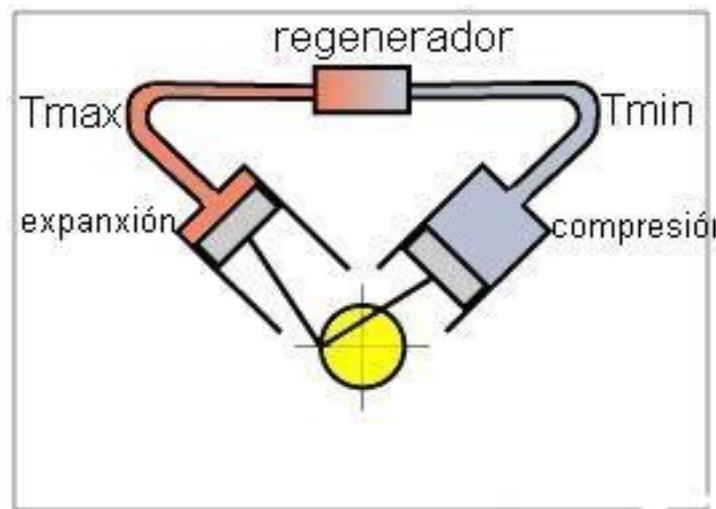


FIGURA 7 Esquema de configuración de un motor Stirling

El esquema final de un motor Stirling se lo observa en la figura 7 en donde el fluido está entre dos pistones uno se encuentra en un foco frío y otro en el foco caliente el fluido está separado por el regenerador pieza clave para separar la cámara fría de la caliente.

El gas está sometido a cuatro etapas en el interior del motor:

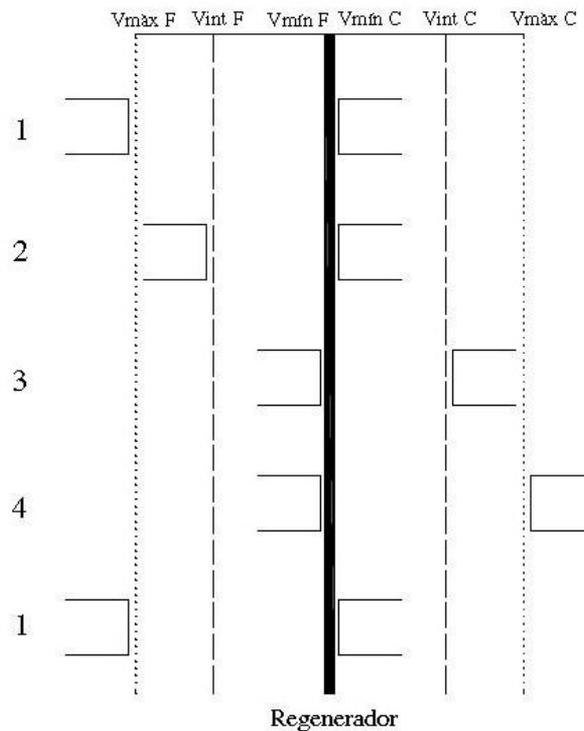


FIGURA 8 Etapas a las que es sometido un gas en un motor Stirling

En la etapa 1 de la figura 8 el gas está a baja temperatura y la cámara está a su volumen máximo ( $V_{máx F}$ ).

1-2 El gas es enfriado lo que provoca una reducción de su volumen e incita que el pistón se traslade a un volumen intermedio del foco frío ( $V_{int F}$ ).

2-3 El gas es desplazado en su totalidad a la cámara caliente en un proceso isocórico absorbiendo calor del regenerador esto provoca que el pistón de esta cámara se mueva a un volumen intermedio del foco caliente ( $V_{int C}$ ).

3-4 El gas gana temperatura consecuentemente aumenta su volumen y el pistón se mueve hasta ocupar toda la cámara ( $V_{\max C}$ ).

4-1 El gas nuevamente es trasladado en su totalidad a la cámara fría y el calor es absorbido por el regenerador en un proceso isocórico, el gas a su vez desplaza el pistón al  $V_{\max F}$ .

Como se ha descrito en el proceso por los que atraviesa el gas, el volumen máximo se da cuando el gas está en el foco caliente y el volumen mínimo se da cuando el gas está en el foco frío, además en los procesos isocóricos el cambio del foco frío a caliente del gas se da absorbiendo calor del regenerador y del foco caliente al frío cediendo calor al regenerador.

La limitante de tener un rendimiento de un ciclo ideal en estos motores es que el proceso 3-4 como el 4-1 sucede sin tiempo alguno y no existe un mecanismo que satisfaga esos requerimientos. Un mecanismo de biela manivela es lo más adecuado da una solución práctica a este problema a costa de una pequeña modificación en el ciclo. Un aspecto muy importante a tomar en cuenta en los motores Stirling es el cambio del gas del foco frío al caliente y viceversa se asumen como procesos puramente isotérmicos y las limitaciones actuales de los mecanismos de transferencia de calor junto con la velocidad a la que sucede el ciclo hacen que difícilmente se pueda introducir o extraer calor con suficiente rapidez y este problema se agranda mucho más cuando el volumen y superficie de la cámaras es más grande. Este es el motivo que los motores Stirling tienen mayor rendimiento a bajas velocidades.

#### **4.8 Descripción del Ciclo Stirling**

En el ciclo Stirling es un proceso isotérmico en el cual la transferencia de gas de una cámara a otra es a volumen constante. Es un ciclo regenerativo en el que los pistones de la figura se mueven simultáneamente con idéntica velocidad manteniendo la distancia entre ellos.

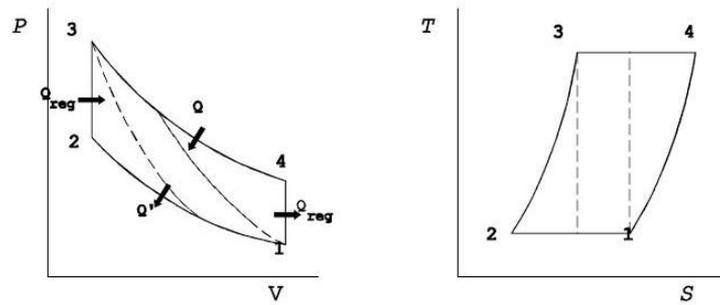


FIGURA 9 Diagrama P-V y P-S del ciclo Stirling

Descripción del ciclo de acuerdo a la figura: 1-2 compresión isoterma a temperatura baja 2-3 aportaciones de calor a volumen constante 3-4 Expansión isoterma a temperatura alta 4-1 extracciones de calor a volumen constante

De acuerdo al ciclo el comportamiento de los pistones es: Se parte de la posición 1 en el que el desplazador, colocado en el interior del cilindro, ubica todo el fluido en la zona fría y el pistón se encuentra en la posición inferior.

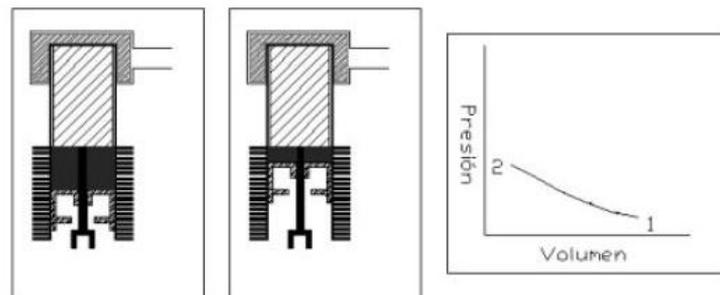


FIGURA 10 Comportamiento del pistón en una compresión isotérmica

Cuando el pistón pasa de la posición 1 a la 2 se realiza una compresión isotérmica a la temperatura inferior figura 4. El proceso es representado en un diagrama presión – volumen. Si se mantiene fijo el pistón y se mueve el desplazador, para hacer pasar todo el aire a la zona caliente, se tiene un proceso isocórico en el que sin variar el volumen aumenta la presión (posición 2 – 3).

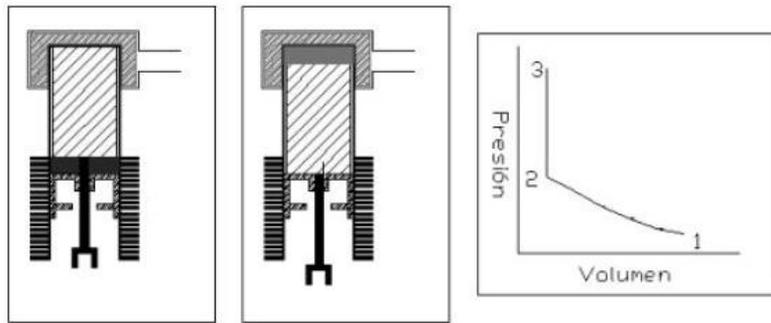


FIGURA 11 Comportamiento del pistón, Proceso isocórico

En este momento se puede obtener una expansión isotérmica a la temperatura más elevada, haciendo bajar juntos el pistón y el desplazador (posición 3-4).

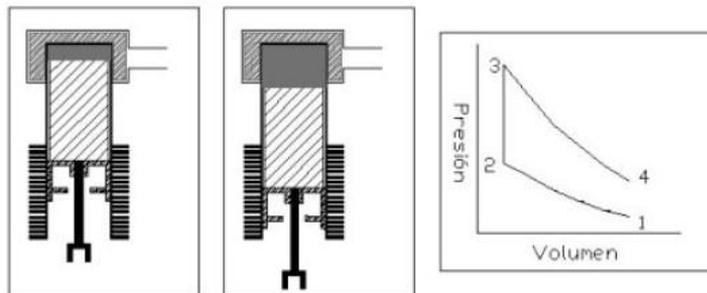


FIGURA 12 Comportamiento del pistón expansión Isotérmica

Moviendo el desplazador a la posición inicial se obtendrá otro proceso isocórico que finalizará el ciclo termodinámico (posición 4 -1).

## 5. METODOLOGÍA DE DISEÑO

A continuación se describe la metodología usada para el diseño del motor Stirling la cual consta de 1 etapa fundamental, la cual se basa en el diseño y modelo matemático

### 5.1 Etapa de diseño.

#### 5.1.1 Parámetros de diseño.

DATOS INICIALES	
POTENCIA DE SALIDA	40 WATTIOS
TEMPERATURA EN LA ZONA CALIENTE	673 °K
TEMPERATURA EN LA ZONA FRIA	323 °k
REVOLUCIONES POR MINUTO	600
VOLUMEN EN EL INTERIOR DEL MOTOR	130 cm <sup>3</sup>

Tabla 1 Parametros de diseño

- a) No hay pérdidas de presión en los conductos internos y la presión es igual en todo el motor para un instante de tiempo determinado
- b) Todos los procesos de expansión y compresión son isotérmicos.
- c) El fluido de trabajo se comporta como un gas ideal.
- d) El volumen muerto de la zona caliente se mantiene a una temperatura  $T_e$ , y el volumen muerto de la zona fría se mantiene a una temperatura  $T_c$  durante el ciclo.
- e) La temperatura del gas en el regenerador es el promedio entre la temperatura en la zona fría y la temperatura en la zona caliente.
- f) El volumen de expansión  $V_e$  y el de compresión  $V_c$  cambian de acuerdo a la función coseno. el volumen desplazado por el pistón de expansión es el mismo que el volumen desplazado por el pistón de compresión  $V_{se}=V_{sc}$  Todas las relaciones de volúmenes permanecen constantes los volúmenes muerto en el pistón de expansión y compresión y el regenerador será 15% para cada uno

## 5.2 Materiales, métodos y técnicas de trabajo

### 5.2.1 Materiales

Materiales con los que se diseñó para la ejecución del de motor Stirling tipo alfa

- Fundición gris.
- Bronce.
- Acero 1020.
- Maya de acero inoxidable 304 20x20 wire 0.4mm
- Tubería de cobre de ¼ de pulgada.
- Rodamientos de bolas
- O-ring Parker referencia 2-222
- Tornillería M5x0.8x 8mm cabeza Allen
- Racores de ¼ de pulgada estándar.
- Lija número 120, 320 ,400 y 600

### 5.2.2 Herramientas:

- Torno CNC o convencional.
- Fresadora CNC o convencional.
- Taladro de pedestal.
- Equipo de soldadura eléctrica o tig.
- Buriles: para cilindrar interiores y exteriores, para refrentar, para tronzar.
- Brocas: de diversos diámetros.
- Elementos de medición: Pie de rey, micrómetro, reglilla de 10 cms, comparador de caratula, compas de interiores.
- Herramientas de mano: lima plana , lima redonda, lima triangular , destornilladores de pala, juego de llaves Allen, hombre solo , alicate, machuelos para roscar, martillo de pasta, llave inglesa.

### 5.3 Metodos y técnicas de trabajo

Para cumplir con el objetivo de este proyecto el cual fue diseñar un motor Stirling capaz de generar 40w de potencia se tuvieron en cuenta tres opciones de construcción según la teoría planteada anteriormente en la sección del marco teórico que hace parte de la investigación previa a desarrollar este proyecto, estas opciones consiste en emplear uno de los tres métodos de construir un motor Stirling los cuales son el tipo Gamma, el Beta o el Alfa.

El motor tipo Gamma era el más sencillo de todos pues en el cilindro de alta temperatura o desplazador no es necesario un ajuste mecánico piston- cilindro que produzca estanqueidad por lo contrario debe haber holgura para facilitar el paso del fluido de trabajo hacia el regenerador o zona de enfriamiento que hace parte del mismo cilindro, esta condición del regenerador de estar integrado al mismo cilindro desplazador nos hizo pensar que si queríamos jugar con la eficiencia de un motor Stirling construido no podíamos hacerlo ya que todo viene integrado a un mismo conjunto por lo cual nos planteamos la siguiente opción.

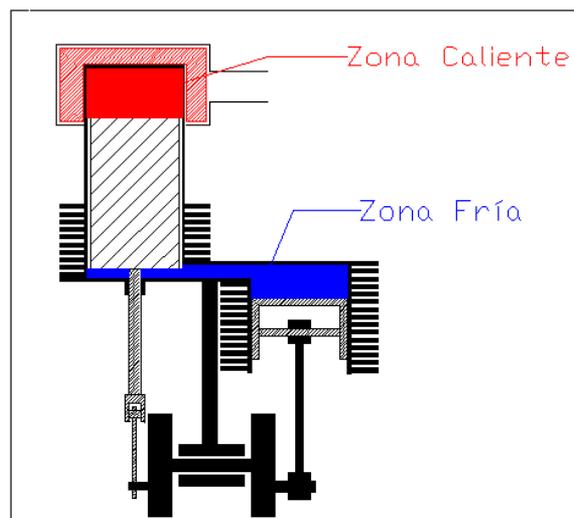


FIGURA 13 Motor tipo Gamma

El motor tipo Beta, este es el más complicado de los tres a pesar de que fue el diseño original del inventor, es más complicado desde el punto de vista mecánico por que requiere de un doble cigüeñal para la transmisión de movimiento lo cual se traducía en mayores costos económicos y académicos pues al ser más complicado el mecanismo requiere más cálculos, además tiene

el mismo inconveniente del anterior el regenerador viene integrado a la estructura y no es posible modificarlo.

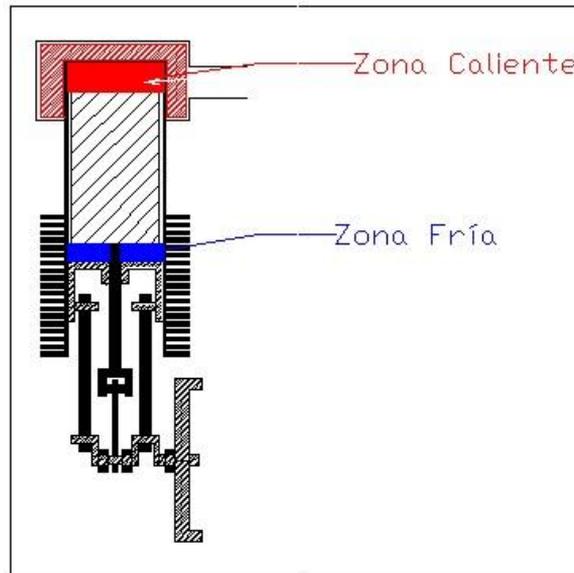


FIGURA 14 Motor tipo Beta

El motor tipo Alfa tiene la característica de que el regenerador se sitúa entre los dos cilindros, de alta y baja temperatura, y es posible modificarlo fácilmente si se quiere jugar con la eficiencia del motor.

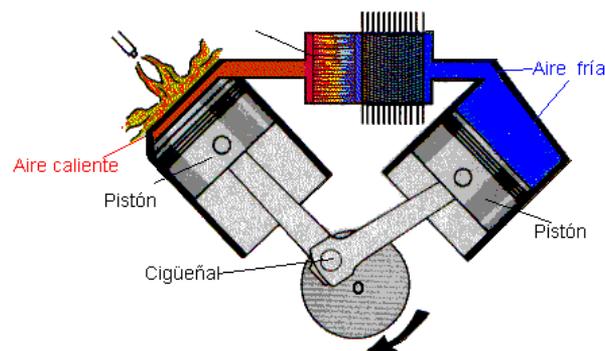


FIGURA 15 Motor tipo alfa

Además si se quiere hacer mejoras como adicionar un serpentín refrigerado con agua en el cilindro de baja temperatura se puede hacer fácilmente, por esta razones por su fácil construcción por su capacidad de que permite ser mejorado fácilmente sin tener que cambiar

las piezas principales optamos por esta como la mejor opción y el mejor método de generar potencia mecánica que se puede utilizar en cualquier aplicación.

### **5.3.1 Componentes y funciones de los elementos del motor.**

Como vimos anteriormente la ubicación del regenerador, la configuración de las piezas y fácil construcción fue pues el elemento principal por el cual nos inclinamos por el motor Stirling tipo Alfa, a continuación una leve descripción de sus componentes, los cálculos se encuentran en la sección de memorias de cálculo y los planos en los anexos.

### **5.3.2 Cilindro de alta temperatura:**

Fabricado en fundición gris por su bajo costo y buena conductividad térmica, su función es transmitir el calor a través de sus paredes al fluido de trabajo y permitir la expansión de este al mismo tiempo contiene el pistón que transmite el movimiento.

### **5.3.3 Cilindro de baja temperatura:**

Fabricado en fundición gris por su bajo costo y buena conductividad térmica, su función es transmitir el calor a través de sus paredes permitiendo que el fluido de trabajo se enfríe lo más rápido posible por tal motivo y por ser refrigerado por aire se construye con aletas para maximizar la superficie de transmisión de calor.

Hay que tener en cuenta que la fundición gris no es mejor conductor térmico que el cobre, aluminio o el acero inoxidable pero es el más barato.

### **5.3.4 Pistones:**

Fabricados en bronce por su propiedad auto lubricante que no permite que estos por algún motivo se atasquen en los cilindros de fundición, también sirve como piezas de desgaste pues es más fácil construir el pistón que el cilindro, sirven para transmitir la fuerza generada por la expansión del fluido de trabajo a través de la biela hacia el cigüeñal.

### **5.3.5 Bielas:**

Fabricadas en acero 1020 por sus reconocidas propiedades de resistencia mecánica, su función es transmitir el movimiento del cilindro al cigüeñal.

**5.3.6 Cigüeñal:**

Fabricado en acero 1020 por sus reconocidas propiedades de resistencia mecánica, su función es convertir el movimiento rectilíneo de los pistones en circular a la vez que sirve para transmitir la potencia a la volante, aunque este con sus contrapesos también almacena energía cinética a la vez que balancea el movimiento pulsante del motor.

**5.3.7 Bloque del motor:**

Sirve estructura de apoyo al resto de los componentes y como alojamiento para los rodamientos que sirven de apoyo al cigüeñal, es construido en fundición gris por su bajo costo y maquinabilidad, ya que tiene una forma más o menos complicada.

**5.3.8 Tapa bloque del motor:**

Sirve como alojamiento para uno de los rodamientos que sirve de soporte al cigüeñal, a la vez que facilita el armado del motor, el material es fundición gris por su costo y maquinabilidad.

**5.3.9 Volante:**

Su función es almacenar energía cinética, construida en fundición.

**5.3.10 Rodamientos:**

Sirven de apoyo al cigüeñal, seleccionado por catálogo según diámetros de alojamientos y eje de cigüeñal.

**5.3.11 Junta torica pistones:**

Sirven para realizar sello en los cilindros y no dejar escapar el fluido de trabajo, pues se trata de un sistema cerrado, el material es silicona para alta temperatura.

**5.3.12 Tornillería de fijación:**

Tornillos estándar M5x0.8x 8mm, usados en todo el conjunto.

**5.3.13 Bulones de los pistones:**

Hechos en acero 1020 por sus propiedades mecánicas, su función es conectar las bielas con los pistones.

#### **5.3.14 Regenerador:**

Este elemento es clave en este motor pues sirve como una especie de almacenador de energía térmica, cuando el aire caliente se mueve del lado de alta temperatura hacia el de baja el absorbe energía a la vez que el fluido la pierde para llegar más frío al lado de baja temperatura, uno vez el fluido es enfriado más en el cilindro de baja temperatura y se contrae este pasa nuevamente al cilindro de alta temperatura a través del regenerador el cual sede su energía calorífica almacenada incrementando la temperatura del fluido el cual llegara más caliente a la zona de alta temperatura, por eso el regenerador influye directamente en la eficiencia del motor ayudando a enfriar el aire que entra en la zona fría y precalentando el aire que entra en la zona caliente, los materiales de construcción de este dispositivo son cobre y acero 1020 , lo que realiza el trabajo de almacenar energía es el material que lleva en su interior que por lo general es un material poroso nosotros recomendamos malla de acero inoxidable enrollada, pero igualmente se puede probar con otros materiales y verificar con cual funciona de manera más eficiente el motor.

## 5.5. Modelado CAD.

### 5.5.1 Modelado del pistón en auto CAD

De acuerdo a los datos obtenidos se obtiene un dimensionamiento previo de los pistones para una mayor precisión en los datos, se modelo el pistón en Auto CAD y de ahí se obtuvo su volumen total (comando massprop) para cálculos posteriores de momentos de inercia



Propiedades físicas de Pistón (Part Configuration - Predeterminado<Como mecanizada>)

Sistema de coordenadas de salida:

-- predeterminado

-- Masa = 80.44 gramos

Volumen = 28624.74 milímetros<sup>3</sup>

Área de superficie = 18180.65 milímetros<sup>2</sup>

Centro de masa: (milímetros)

X = 20.18 Y = 0.00 Z = 0.00

FIGURA 16 Modelado del pistón

Tabla 2 Propiedades Físicas del pistón

### 5.5.2 Cálculos de la masa de la biela

Con las dimensiones obtenidas se realiza un modelo preliminar 3D con ayuda del software Auto CAD, con el comando massprop se obtiene propiedades del sólido para el cálculo de



Propiedades físicas de la biela (Part Configuration - Predeterminado<Como mecanizada>)

Sistema de coordenadas de salida:

-- predeterminado

Densidad=0.00 gramos por milímetro cubico

-- Masa = 24.06 gramos

Volumen = 8977,12 milímetros<sup>3</sup>

Área de superficie = 6464.32 milímetros<sup>2</sup>

Centro de masa: (milímetros)

FIGURA 17 Modelado biela

Tabla 3 Propiedades Físicas de la biela

### 5.5.3 Calculo de la masa de la manivela (Mm)

De acuerdo a los datos obtenidos se obtiene un dimensionamiento previo de la manivela. Para una mayor precisión en los datos el cigüeñal se lo modelo en Auto CAD y de ahí se obtuvo su volumen total (comando massprop) para cálculo de la masa.



FIGURA 18 Modelado Masa de la Manivela

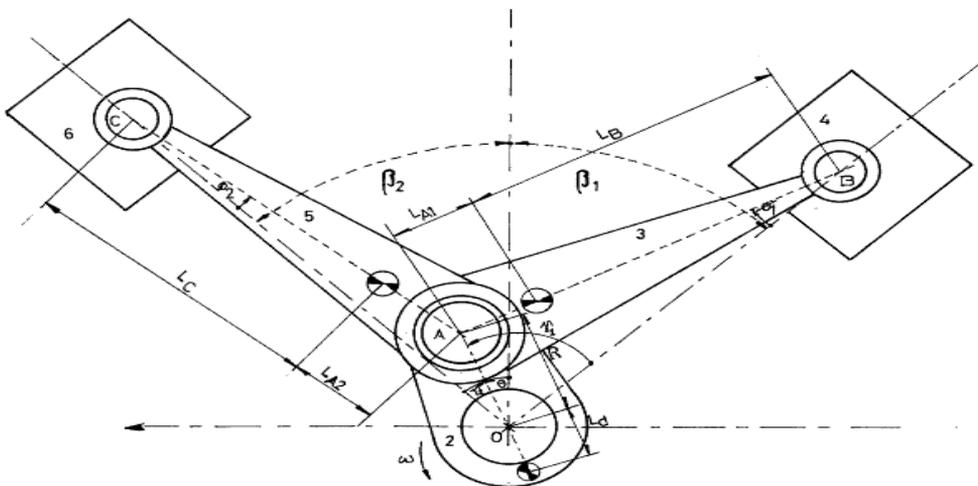


FIGURA 19 Modelado esquema Motor Alfa

### 5.5.4 Modelado 3D del cigüeñal con los contrapesos

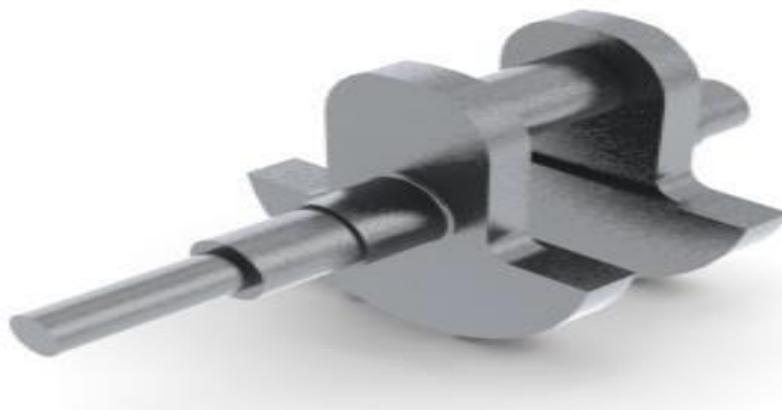


FIGURA 20 Modelado Cigüeñal con contrapesos

### 5.5.5 Diseño del bulon de pistón

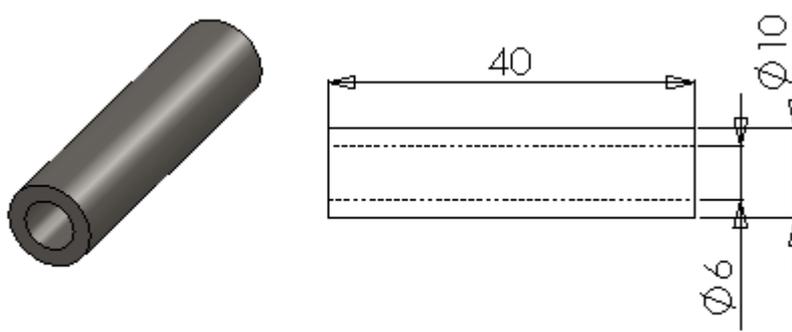


FIGURA 21 Modelado del bulon del piston

## 5.6 Simulación.

### 5.6.1 Análisis del pasador en el software solid works

De acuerdo a los parámetros especificados  $F_s$  mas bajo para el diseño es 2.042

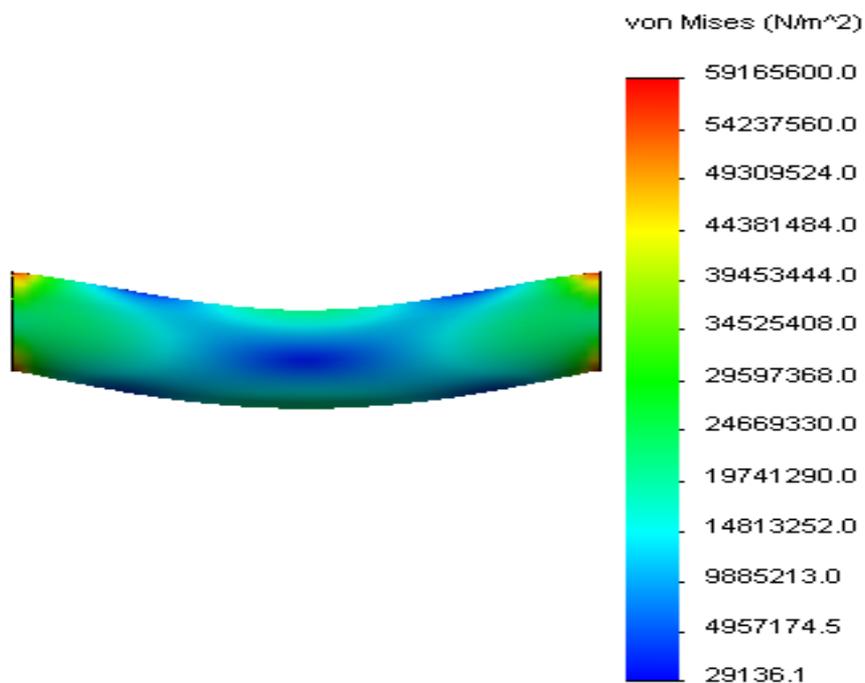


FIGURA 22 Analisis del pasador en solid works

### 5.6.2 Análisis de la biela en el software solid works

De acuerdo a los parámetros especificados  $F_s$  mas bajo para el diseño es 1.356

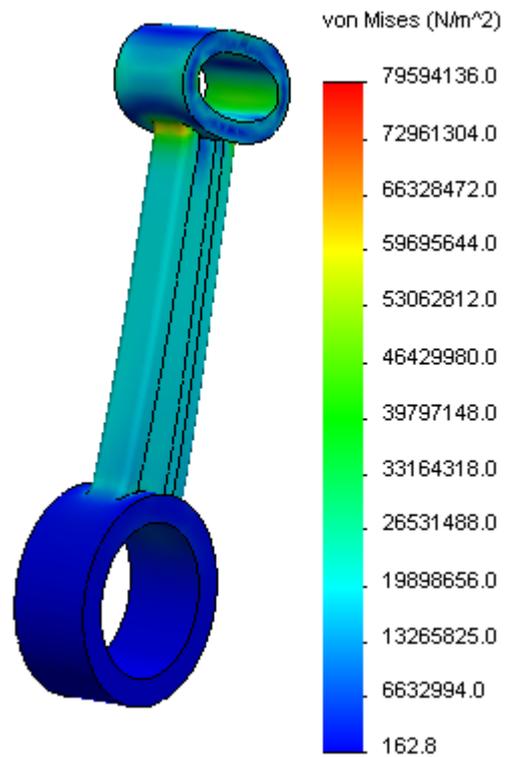


FIGURA 23 Análisis de la biela en el software solid works

### 5.6.3 Análisis del cigueñal en el software solid works

De acuerdo a los parámetros especificados  $F_s$  mas bajo para el diseño es 3.16

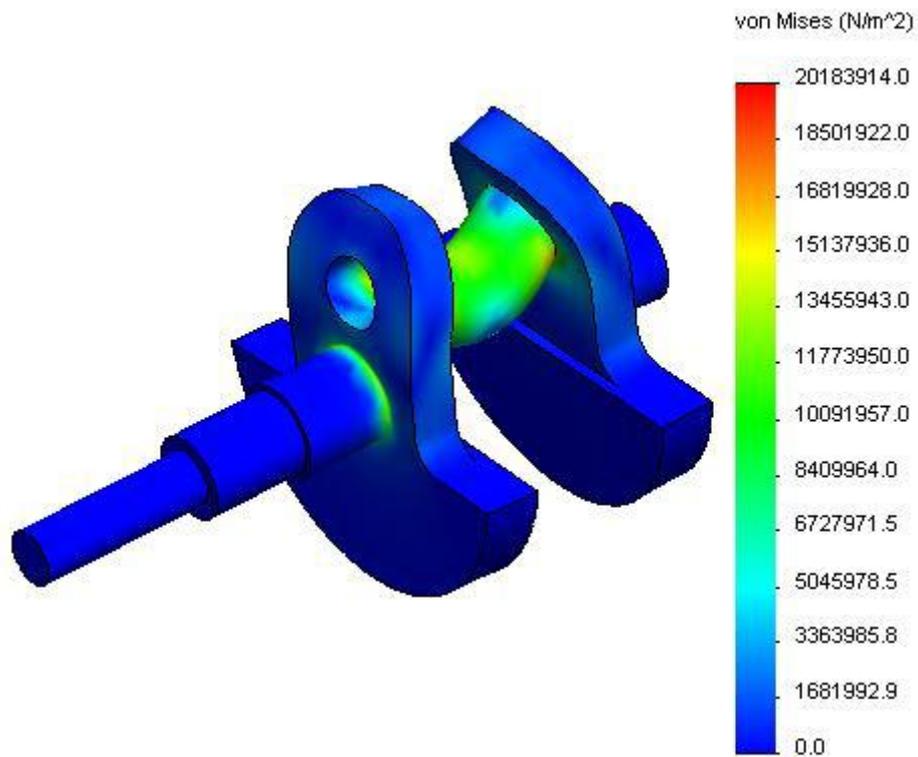


FIGURA 24 Análisis del cigueñal en el software solid works

### 5.6.4 Grafica de cambios de temperatura en el motor

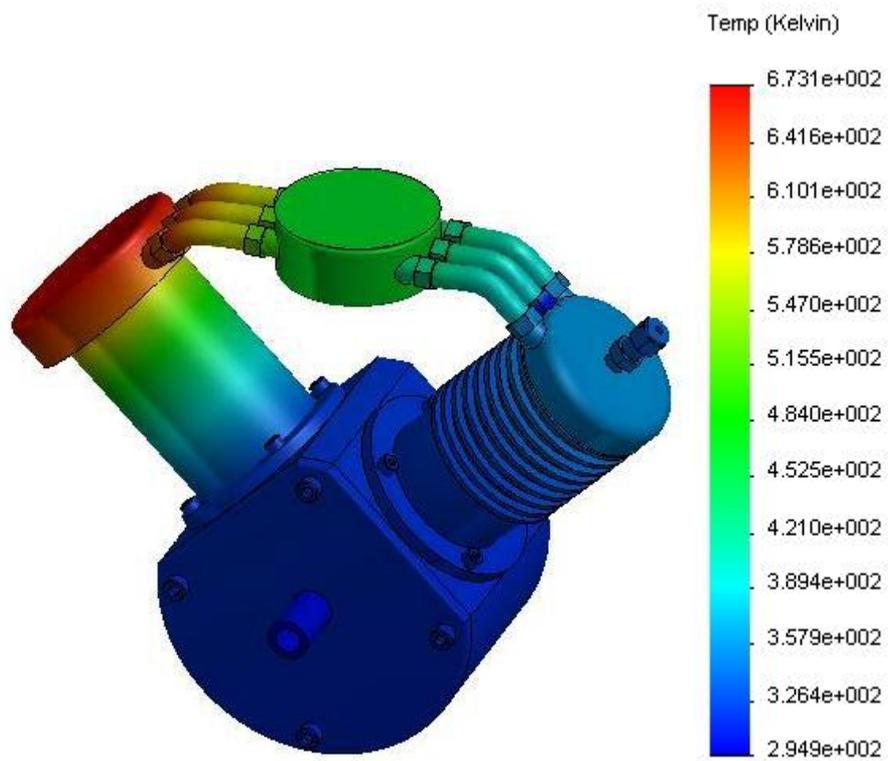


FIGURA 25 Grafica de cambios de temperatura en el motor

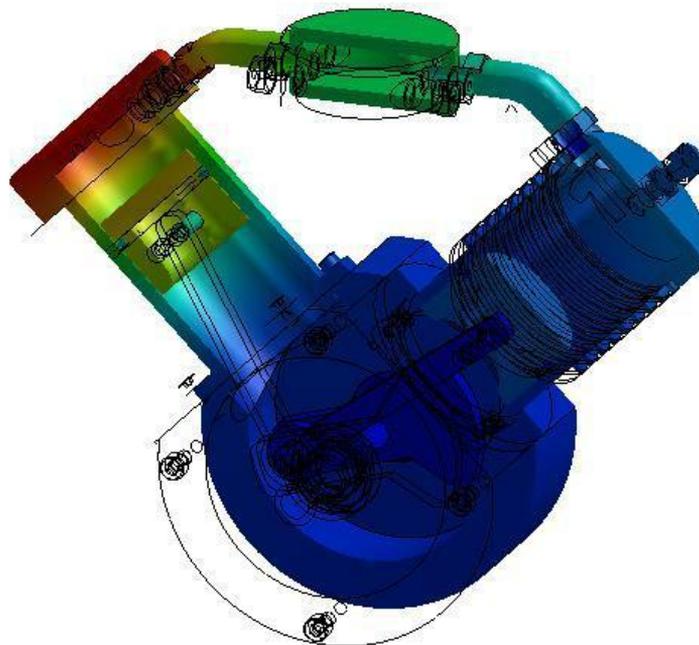


FIGURA 26 Esquema grafica de temperature en el motor

### 5.7. Analisis de la informacion.

El análisis de la información parte de las siguientes unidades de observación para el diseño y posterior desarrollo del proyecto investigativo serán:

- Expresiones matemáticas del motor Stirling
- Motores de cálculo e interacción con MATLAB
- Procesamiento de datos con interfaz grafica en SIMULINK (MATLAB)
- Diseño de cilindros y pistones de motores
- Empaque de calor y presión
- Sistemas de refrigeración
- Controles de velocidad
- Elementos materiales con elevada capacidad térmica
- Rectificación de pistones y cilindros
- Geometría de motores Stirling tipo alfa
- Mecanizado de piezas para motores

Se realizan difrentes ensayos y simulaciones con la ayuda del programa SIMULINK (MATLAB las cuales estaremos demostrando acontinuacion

Variando los parámetros geométricos y termodinámicos es posible obtener una variedad de configuraciones para el motor Stirling estudiado en el presente informe. La hoja de cálculo permite analizar y comparar los efectos que causan en la presión del gas y el torque total para cada una de estas arquitecturas del motor Stirling.

Manteniendo constantes las variables termodinámicas se analiza el comportamiento de la presión del gas y del torque según se varía la altura  $h$ . La temperatura del lado frío permanece en  $28^{\circ}\text{C}$  y la temperatura del lado caliente en  $200^{\circ}\text{C}$ , la densidad del aire está en  $1,184 \text{ kg/cm}^3$ . Los valores para las masas equivalentes y los espesores del pistón y desplazador son como aparecen en la figura 27

MECANISMO MANIVELA - BIELA				CILINDROS - PISTON - DESPLAZADOR				GAS DE TRABAJO			MASAS EQV PIST.		MASA EQV DESPL.				
Longitud manivela $r$	0,02	$W$ RPM	60	Longitud pistón $L_p$	0,02	Diametro pistón	0,02	L vol mto comp pistón (Lcp)	0,05	$T_{\text{fría}}^{\circ}\text{C}$	28	Densidad aire	1,184	$M_{2A}$	0,02	$M_{5A}$	0,06
Altura descent $h$	0	Fase $\phi$ grados	90	Longitud desplaz $L_d$	0,02	Diametro desplaz.	0,02	L vol mto comp desplaz (Lcdc)	0,8	$T_{\text{cal}}^{\circ}\text{C}$	200	R especifico	287	$M_{1A}$	0,04	$M_{6A}$	0,04
Longitud biela $L$	0,08	Chequeo $(r+h)/L < 1$	0,25	Longitud conexión	0,015	Diametro conexión	0,005	L vol mto expan desplaz (Lcde)	0,1	%Vol gas Desplaz	30			$M_{3A}$	0,06	$M_{6B}$	0,06
														$M_{4A}$	0,06	$M_{7A}$	0,04

FIGURA 27 Variables termodinamicas

Este arreglo de motor Stirling está caracterizado por las variables que se presentan en la figura. La presión del gas varía aproximadamente entre 114100 y 112800 Pas, ver figura. Esta presión

alcanza su máximo valor a los 275 grados de giro de la manivela aproximadamente. El torque para esta primera configuración toma valores entre -0,8 y 0,7 Nm y su máximo valor se alcanza a los 90 grados de giro para la manivela como se muestra en la figura

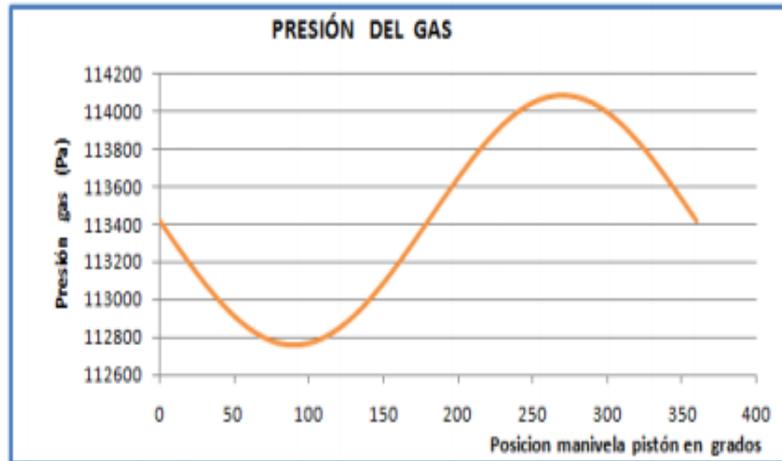


FIGURA 28 configuración presión de giro para la manivela

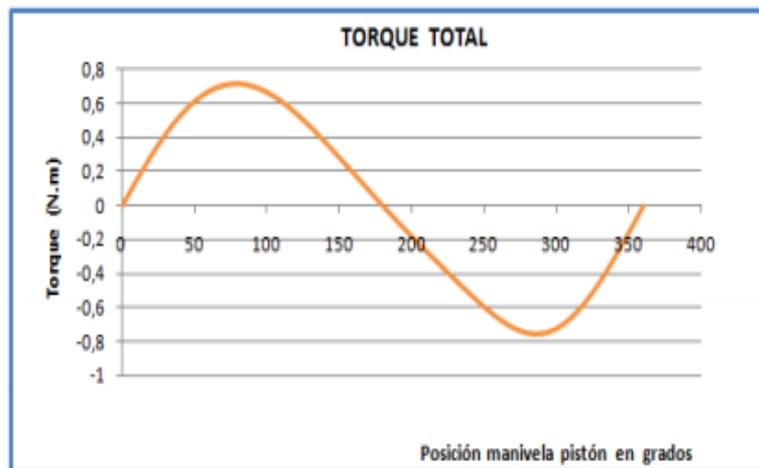


FIGURA 29 Configuración torque de giro para la manivela

Sin variar los parámetros termodinámicos solamente se modifica la longitud de h a 0,01m

MECANISMO MANIVELA - BIELA				CILINDROS - PISTON - DESPLAZADOR				GAS DE TRABAJO			MASAS EQV PIST.		MASA EQV DESPL.				
Longitud manivela r	0,02	IV RPM	60	Longitud pistón Lp	0,02	Diametro pistón	0,02	L vol mto comp pistón (Lcp)	0,05	T fría °C	28	Densidad aire	1,184	Mza	0,02	Msa	0,06
Altura descent h	0,01	fase φ grados	90	Longitud desplaz Ld	0,02	Diametro desplaz.	0,02	L vol mto comp desplaz (Lcdc)	0,8	T cal °C	200	R específico	287	Mza	0,04	Msa	0,04
Longitud biela L	0,08	Chequeo (r+h)/L < 1	0,375	Longitud conexión	0,015	Diametro conexión	0,005	L vol mto expan desplaz (Lcde)	0,1	%Vol gas Desplaz	30			Mza	0,06	Msa	0,06
														Mza	0,06	Msa	0,04

FIGURA 30 Parametros termodinamicos modificando la longitud

Los resultados para valores del torque se presentan en la figura 31 y se observa que estos oscilan entre -0,8 y 0,7 Nm aproximadamente. El valor máximo del torque es a los 90 grados de giro de la manivela.

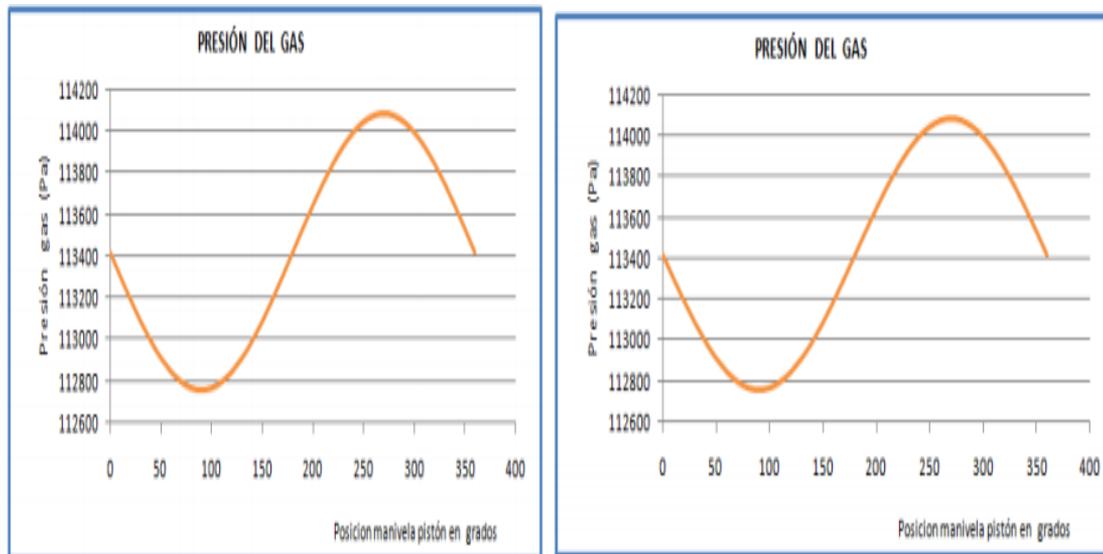


FIGURA 31 Resultados 1

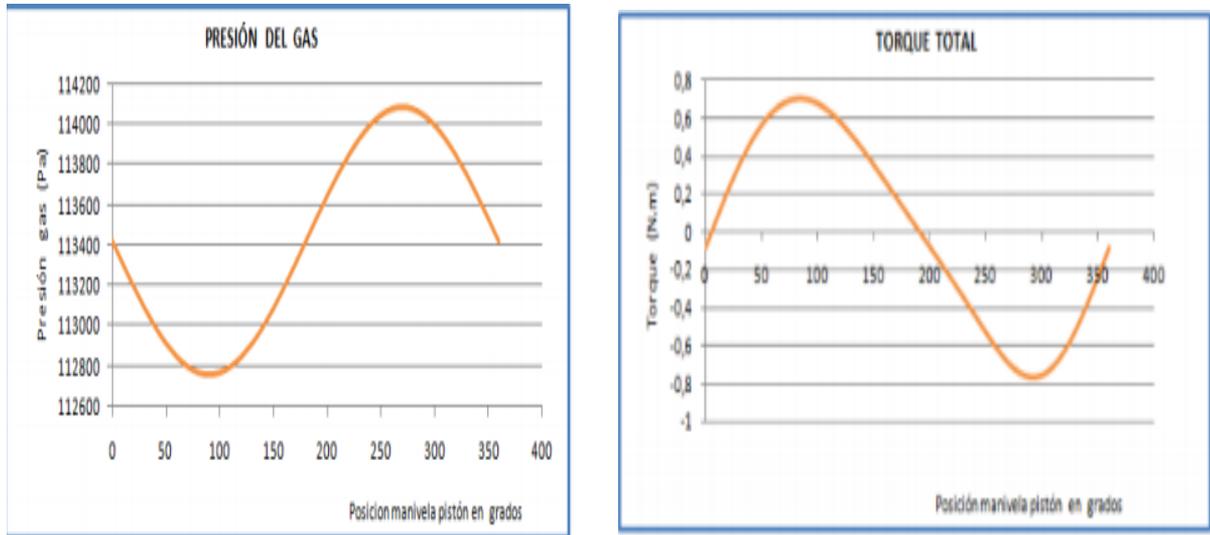


FIGURA 32 Resultados2

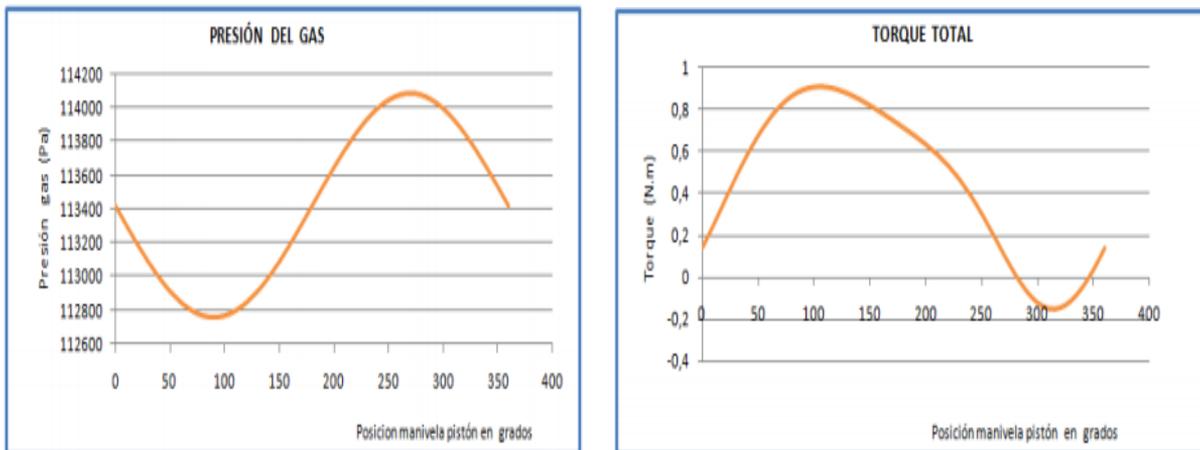


FIGURA 33 Resultados 3

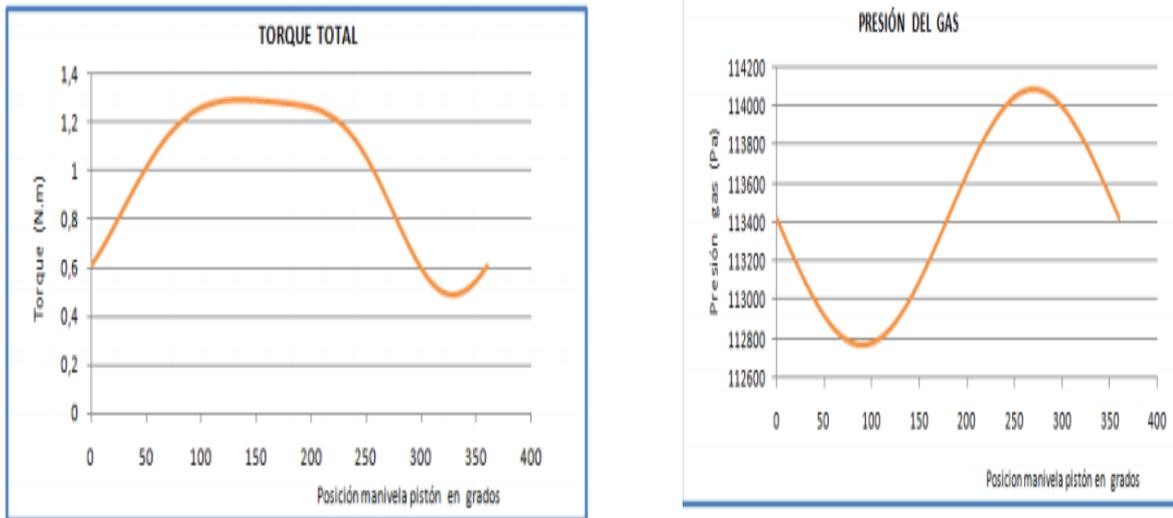


FIGURA 34 Resultados 4

Se establece una densidad de aire de mayor valor igual a 1,7 Kg/m<sup>3</sup> y con los parámetros expresados en la figura 35. Las curvas de presión y de torque se muestran las figuras y correspondientemente. El área bajo estas dos curvas se incrementa claramente, esto indica que una densidad mayor en el gas de trabajo mejora la eficiencia del motor Stirling.

MECANISMO MANIVELA - BIELA				CILINDROS - PISTON - DESPLAZADOR				GAS DE TRABAJO					
Longitud manivela r	0,02	W RPM	60	Longitud pistón Lp	0,02	Diametro pistón	0,04	L vol mto comp pistón (Lc1p)	0,05	T fria °C	28	Densidad aire	1,7
Altura descent h	0,055	Fase φ grados	90	Longitud desplaz Ld	0,02	Diametro desplaz.	0,02	L vol mto comp desplaz (Lc1dc)	0,8	T cal °C	200	R específico	287
Longitud biela L	0,08	Chequeo (r+h)/L < 1	0,9375	Longitud conexión	0,015	Diametro conexión	0,005	L vol mto expan desplaz (Lc1de)	0,1	%Vol gas Desplaz	30		

FIGURA 35 Parametros Termodinamicos ajustando la densidad del aire

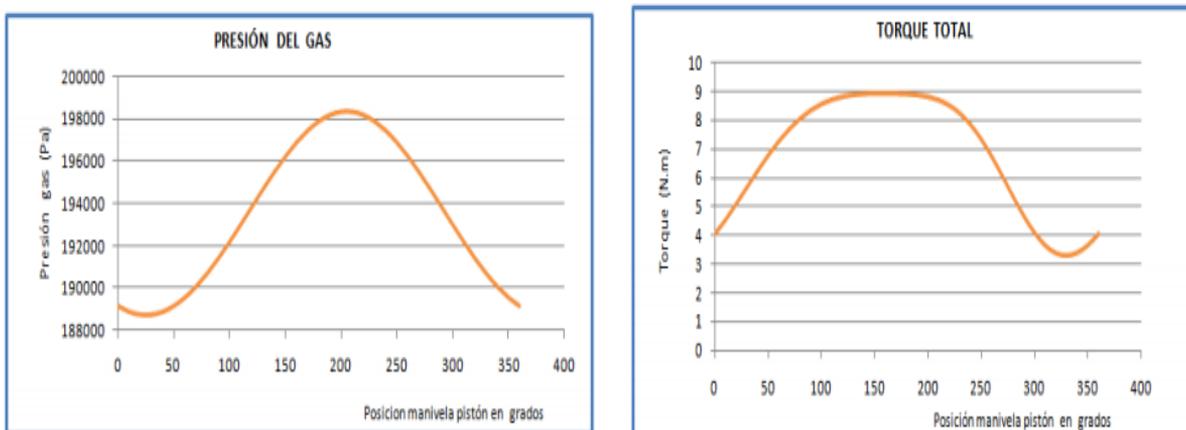


FIGURA 36 Resultados de acuerdo a densidad del aire

Hay una serie de factores que afectan al funcionamiento del motor. Hay algunos factores que se han determinado, pero otros no han quedado tan bien determinados.

La primera mejora que se podría incorporar en el modelo, es un estudio dinámico de como varían los coeficientes de transferencia del calor. Ya que permitiría una definición del problema mucho más acorde con la realidad.

Por otra parte, el modelo está desaprovechando mucha energía, ya que el flujo de calor es muy grande y de toda la potencia calorífica entregada el motor extrae muy poca. Así que es una buena idea incorporar un regenerador que permita reducir esta tasa de calor desaprovechada.

Para finalizar, una mejora importante es definir qué áreas influyen más en el intercambio de calor. Usando una simulación en CFD podría determinarse que regiones son influyentes.

## 6. CONCLUSIONES

Los volúmenes muertos del sistema no contribuyen al ciclo termodinámico ya que son masas de aire que no terminan el ciclo y que consumen energía. La respuesta obtenida al disminuir los volúmenes muertos fue un aumento de la velocidad y de la potencia entregada.

El área de transferencia de Calor condiciona el funcionamiento del motor. Esto se debe a que la entrada y salida de energía es a través de las paredes de los cilindros. Por lo que el diseño de los cilindros favorece este aspecto.

Otro factor que influye en la potencia del motor es el coeficiente de transferencia de calor de los materiales, el cual varía en función del tiempo debido a que las propiedades del gas cambian en cada instante.

Otro factor que afecta al sistema es la presión inicial a la que se encuentra el cilindro, ya que a mayor presión hay más masa y mayor viscosidad. La importancia de tener más masa, es que permite transportar una cantidad de calor mayor. Además, el aumento de la presión trae consigo un aumento de la viscosidad, por una parte, es malo porque el fluido pierde velocidad, pero también es cierto que la transferencia de calor es más eficaz por lo que se logra transmitir más calor.

Las pérdidas por rozamiento fluido son importantes, aunque su valor es pequeño y su efecto es frenar el paso del fluido. Esto no quiere decir que no sean importantes, ya que también son las responsables del bloqueo de una tubería haciendo que el flujo llegue a pararse y generando un pico de presión.

Basados en las modificaciones realizadas al modelo inicial. Se puede concluir que se ha configurado un modelo funcional que basa su funcionamiento en un motor real a escala el cual puede ser construido por cualquier persona que use los parámetros de diseño aquí determinados.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] James R. Senft “Theoretical Limits on the performance of Stirling Engines”. International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res., 22,991-1000 (1998).
- [2] Jovaj, “Motores de Automovil”, Editorial Mir Moscú (1982).
- [3] Fabio Zegarra Choque, Tesis para optar el grado de Ingeniero Mecánico “Estudio, Diseño y Construcción de un Motor Stirling Experimental Tipo Beta”, FIM, UNI, Lima, Perú (2005).
- [4] James R. Senft, “An Introduction to Stirling Engine”, Morilla Press, third printing (1997).
- [5] F. Alva Dávila, “Diseño de Elementos de Maquinas I”, FIM, UNI, Lima, Perú (1995)
- [6] F. Alva Dávila, “Diseño de Elementos de Maquinas II”, FIM, UNI, Lima, Perú (2002)
- [7] James G. Rizzo, “The Stirling Engine Manual”, printing in Great Britain by Carden Miniatura Steam Services (1995).
- [8] J. R. Senft, “Small stationary Stirling engine design”, University of Wisconsin, USA, C19/82
- [9] James R. Senft, “Ringbom Stirling Engine”, Oxford University Press.
- [10] James R. Senft, “Optimum Stirling engine geometry”, International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res., 22, 991-1000 (1998).
- [11] J. R. Senft, “Mechanical efficiency Considerations in the Design of an Ultra Low Temperature Differential Stirling Engine”, University of Wisconsin, Sae Technical Paper series 929024.
- [12] James R. Senft, “Extended mechanical efficiency theorems for engines and heat pumps”, International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res., 24, 679 -1000 (2000).
- [13] J. R. Senft, “Mechanical Efficiency of Kinematic Heat Engines”, Journal of the Franklin Institute, Pergamon Journal Ltd, Vol. 324, No. 2,pp, 273-290, printed in Great Britain (1987).
- [14] William Beale, “Understanding Stirling Engines”, VITA Technical Paper
- [15] Gunnar Lundholm, “The experimental V4X Stirling Engine – A Pioneering Development”, Department of Heat & Power Engineering of Lund University, Sweden. 128
- [16] Frank Incropera, “Fundamentos de transferencia de calor”, 4ta edic.,1996
- [17] Abelardo Ludeña Luque, “Motores Stirling”
- [18] John Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, 1ra edic.,1988
- [19] [www.Stirlingengine.com](http://www.Stirlingengine.com)
- [20] [www.airsport-corp.com/fourpartstirling.html](http://www.airsport-corp.com/fourpartstirling.html)
- [21] [www.robotiker.com.cl](http://www.robotiker.com.cl)
- [22] [www.nmri.go.jp/env/khirata/](http://www.nmri.go.jp/env/khirata/)

- [23] [www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/others.htm](http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/others.htm)
- [24] [www.stirlingenergy.com/solar\\_projects.htm](http://www.stirlingenergy.com/solar_projects.htm)
- [25] [www.energylan.sandia.gov/sunlab/feature.htm](http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/feature.htm)
- [26] [www.kockums.se/Submarines/aipstirling.html](http://www.kockums.se/Submarines/aipstirling.html)
- [27] [www.janis.com/p-stirling.html](http://www.janis.com/p-stirling.html)
- [28] [www.geocities.com/~rrice2/my\\_engines/ttr/ttrcalc.html](http://www.geocities.com/~rrice2/my_engines/ttr/ttrcalc.html)
- [29] [www.Stirlingenergy.com](http://www.Stirlingenergy.com)
- [30] [www.nasatech.com/Briefs/Jan99/LEW16581.html](http://www.nasatech.com/Briefs/Jan99/LEW16581.html)
- [31] [www.tdx.cesca.es/TDX-0512103-122109/](http://www.tdx.cesca.es/TDX-0512103-122109/), “Caracterización Termodinámica de los Aceros Inoxidables”
- [32] Alan Altman, “Stirling Engine Heat Transfer – A Snappy Primer”
- [33] Walker Graham, “Stirling Engines”
- [34] Koichi Hirata, “Development of a Small 50W Class Stirling Engine”
- [35] Koichi Hirata, Shoichi Iwamoto, Fujio Toda and Kazuhiro Hamaguchi, “Performance evaluation for a 100W Stirling Engine”.
- [36] Can Cinar, Segar Yucesu, Tolga Topgul and Melih Okur, “Beta-type Stirling Engine Operating at Atmospheric Pressure”, Mechanical Education Department, Faculty of Thechnical Education, Gazi University. Besevler, Ankara 06500, Turkey, 2004.
- [37] Marcos Sebastiao P. Gomez, Pressure and Temperature Variations on a Stirling Engine”, PUC/RJ – Rio de Janeiro

