

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Diseño de un motor Stirling a escala para una práctica de laboratorio en el ITM

Ricardo Franco Betancur

Ingeniería Electromecánica

Director del proyecto

Carlos Alberto Acevedo Álvarez, IM

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

FACULTAD DE INGENIERÍAS

MEDELLÍN

2019

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Se construye este proyecto con el propósito de motivar al estudiante a conocer teorías de los motores de combustión externa. El estudiante podrá interactuar y practicar las teorías termodinámicas, visualizar cada una de sus partes y procesos de construcción, acompañados de los cálculos matemáticos, con una guía básica que explica el funcionamiento de los motores Stirling. Esta guía cuenta con unos objetivos claros que se desarrollaran mediante una práctica de laboratorio.

El proyecto abarca toda la historia desde su creación, hasta las últimas investigaciones y aplicaciones en la generación de energía. Para cumplir estos objetivos, se recurre a diferentes medios científicos como: artículos de revistas, trabajos de grados, libros y videos, buscando facilitar el acceso a la documentación más importante de los motores Stirling, que motiven a continuar con nuevas investigaciones sobre el tema.

Como resultado de este proyecto, queda disponible el motor Stirling en el laboratorio para que se desarrollen las prácticas con la guía de laboratorio y finalmente el estudiante pueda elaborar sus propias conclusiones acerca de cómo se puede mejorar el sistema y cuáles son las variables que afectan el sistema.

Palabras claves: motor de combustión externa, motor Stirling, eficiencia, ciclo termodinámico

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por darme la sabiduría y dedicación para culminar la carrera.

Luego quiero agradecer a mi familia especialmente a mi padre que toda su vida me inculco el estudio y a mi esposa que fue la que me impulso y animo a avanzar.

Por ultimo quiero agradecer al ITM cuerpo docente, directivos y administrativos quienes me formaron y facilitaron todas las herramientas para lograr todas mis metas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

A = área del cilindro

a = aceleración del pistón

α = ángulo de rotación de la manivela

β = ángulo que forma el eje del pistón de trabajo con el eje central

c = espacio muerto de compresión

e = espacio muerto de expansión

h = calentador

H_1 = entalpia en el estado 1

k = enfriador

M = masa del gas ideal (aire)

M_k = masa del aire en el enfriador

M_h = masa del aire del calentador

M_r = masa del aire del regenerador

M_c = masa del aire muerto de la recamara de compresión

M_e = masa del aire muerto de la recamara de expansión

η = eficiencia del ciclo Stirling

P_1 = presión del ciclo 1

Q_{entrada} = calor agregado

Q_{salida} = calor expulsado

Q_{1-2} = calor entre los ciclos 1 y 2

Q_{3-4} = calor entre los ciclos 3 y 4

R = constante del gas ideal

r = regenerador

r_1 = radio del cigüeñal

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

r_j = radio del cilindro

S = carrera del pistón de trabajo

S_1 = entropía en el estado 1

S_{4-3} = entropía de entrada

S_{2-1} = entropía de salida

T_1 = temperatura del ciclo 1

T_{\max} = Temperatura máxima

T_{\min} = Temperatura mínima

T_R = Temperatura del regenerado

T_c = Temperatura del espacio muerto de la recámara de compresión

T_e = Temperatura del espacio muerto de la recámara de Expansión

V = volumen del cilindro

v = velocidad del pistón

V_1 = volumen específico

V_h = volumen de aire caliente

V_k = volumen de aire frío

V_r = volumen de aire en el regenerador

V_c = volumen de aire muerto en la recámara de compresión

V_e = volumen de aire muerto en la recámara de expansión

V_{ol1} = volumen de una de las recámaras

ω = velocidad angular del cigüeñal

W_{neto} = trabajo neto

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.2	ANTECEDENTES.....	11
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo General	13
1.3.2	Objetivos Específicos.....	13
1.3.3	Organización de la tesis.....	13
2	MARCO TEÓRICO.....	14
2.1	La historia de los motores Stirling en la industria automotriz	14
2.2	APLICACIONES ENERGETICAS.....	14
2.3	Mejoras realizadas por los hermanos Stirling al diseño original.....	17
2.4	CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES STIRLING.....	21
2.4.1	Tipo alfa.....	21
2.4.2	Tipo beta.....	22
2.4.3	Tipo gama	22
2.5	Desarrollo de un motor Stirling impulsado por gases residuales	23
2.6	Funcionamiento del motor Stirling	25
3	METODOLOGÍA.....	28
3.1	Revisar las diferentes fuentes bibliográficas y webgrafía de diseños de motores Stirling.	28
3.2	Realizar diseño	28
3.3	Construcción del prototipo	29
3.4	Elaboración de la guía de laboratorio	29
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1	Videos de apoyo, páginas de internet donde se pueden consultar y ver los funcionamientos de los motores Stirling	30
4.2	Diseño del motor Stirling.....	32
4.2.1.1	Análisis del mecanismo	32
4.2.1.2	Ecuación del desplazamiento.....	33

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.1.3	Ecuación de la velocidad	34
4.2.1.4	Ecuación de la aceleración	35
4.2.1.5	Volumen de desplazamiento.....	35
4.2.1.6	Hipótesis de la teoría de Schmidt.....	36
4.2.1.7	Ecuación de la masa del aire en el sistema	37
4.2.1.8	Presión instantánea del motor Stirling.....	38
4.2.1.9	Ecuaciones para determinar el trabajo	39
4.2.1.9.1	Ecuación trabajo de expansión	39
4.2.1.9.2	Ecuación trabajo compresión.....	40
4.2.2	Selección del prototipo a fabricar	40
4.3	Construcción del motor Stirling tipo alfa	41
4.3.1	Cota superior	45
4.3.2	Cota frontal	46
4.3.3	Cota lateral derecha	47
4.3.4	Isométrico del Motor Stirling a construir	48
4.3.5	Diseño del motor Stirling.....	48
4.3.6.	Construcción del prototipo en el laboratorio	49
4.3.7.	Comparación de los datos calculados con los experimentales	58
4.4	Guía de laboratorio	63
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones	72
5.3	Trabajo futuro	72
	REFERENCIAS	73

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Plataforma solar de Almería.....	15
Figura 2.	Esquema del motor Stirling original de 1816.....	16
Figura 3.	Ciclo Stirling para dos pistones	18
Figura 4.	Motor Stirling tipo	22
Figura 5.	Motor Stirling tipo Beta.....	22
Figura 6.	Motor Stirling tipo Gama.....	23
Figura 7.	Motor Stirling diseñado e impulsado por gases.....	24
Figura 8.	estructura de la cámara de combustión para gases residuales	24
Figura 9.	Comportamiento de la potencia vs. Velocidad para un motor Stirling.....	26
Figura 10.	Mecanismo biela-manivela del pistón de fuerza y desplazador	32
Figura 11.	Recámaras de aire del motor Stirling	37
Figura 12.	Grafica P-V.....	44
Figura 13.	cota superior motor Stirling	45
Figura 14.	cota frontal del motor Stirling.....	46
Figura 15.	Cota lateral derecha del motor Stirling	47
Figura 16.	isométrico del motor Stirling.....	48
Figura 17.	diseño del motor Stirling	48
Figura 18.	Mecanizado de árbol de levas.....	49
Figura 19.	mecanizado del cigüeñal	50
Figura 20.	Fabricación de las chumaceras.....	51
Figura 21.	Ensamble del sistema mecánico	52
Figura 22.	sistema mecánico con volante	53
Figura 23.	Ajuste del sistema mecánico a la base	54
Figura 24.	Adaptación de jeringas a la base.....	55
Figura 25.	Adaptación del conducto intercambiador de calor.....	56
Figura 26.	Conexión de los émbolos con los cigüeñales	57
Figura 27.	Finalización del proyecto.....	58
Figura 28.	Tabla de algoritmos del programa EES.....	59
Figura 29.	Grafica de presión vs entalpia	60
Figura 30.	Grafica de temperatura vs volumen especifico	61
Figura 31.	Grafica de temperatura vs volumen	62

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los motores a gasolina	27
Tabla 2. Parámetros iniciales del motor Stirling	42
Tabla 3. Grados vs presiones.....	43
Tabla 4. Datos científicos en cada ciclo del motor Stirling.....	59

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente las universidades han invertido gran parte de sus recursos en el aprendizaje, fortaleciendo la investigación, las prácticas en los laboratorios y las capacitaciones en nuevas tecnologías, logrando una formación teórico-práctica donde el estudiante pone a relucir todas sus destrezas, logrando llevar profesionales más competentes a las industrias.

Una de las riquezas más grandes de conocimiento se encuentran en los laboratorios ya que allí se ponen en práctica todas las teorías analizadas en las aulas de clase, es por esto que en este proyecto se desarrolla un prototipo de un motor Stirling, el cual quedara disponible en el laboratorio de ciencias térmicas de la sede del campus ITM-Instituto Tecnológico Metropolitano en Boston, con el fin de dar al estudiante la posibilidad de reconocer y afianzar sus conocimientos a través de una práctica dirigida por el docente.

Actualmente la investigación sobre el motor Stirling y sus posibles aplicaciones no está muy desarrollada, ya que los motores y combustibles convencionales han ganado terreno a lo largo de las décadas. Además, no se ha obtenido un motor suficientemente pequeño y potente para reemplazar a otras tecnologías en muchas aplicaciones, como en la automoción. Sin embargo, comienza una tendencia al uso de energías renovables y una implementación de medidas de ahorro energético. En este ámbito, el motor Stirling se presenta como una alternativa tecnológica sostenible que se está comenzando a implementar principalmente en pequeñas centrales de energía solar termoeléctrica para poblaciones aisladas. *(Varela, 2014)*.

Si el desarrollo de esta tecnología cobra más importancia en los próximos años, ésta se podrá convertir en una alternativa competente en muchas áreas, como en la generación eléctrica o en la automoción de vehículos. *(Varela, 2014)*.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 ANTECEDENTES

Para fundamentar el objetivo de diseñar un prototipo a escala de un motor Stirling para las prácticas termodinámicas en el laboratorio de ciencias térmicas, es fundamental revisar las investigaciones de otras Universidades de Colombia con respecto a los motores Stirling, donde han surgido grandes proyectos de pregrado, revistas e investigaciones de maestría; como la implementación del motor Stirling en la generación de energía con luz solar, el aprovechamiento de energías térmicas residuales, entre otras. A continuación, se referencian estas Universidades con su respectiva investigación:

- Aplicaciones de motores Stirling, Institución Universitaria los Libertadores, Bogotá, Colombia.
- Cardona J. y Velásquez H. (2016), Semillero de la Facultad de Minas integrado por estudiantes y docentes creó un prototipo que genera 200 vatios, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Fuquen D. y Niño J. (2015), Aprovechamiento de energía térmica con motores Stirling, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- García J. y París L. (2011), Diseño de un sistema prototipo de conversión de energía solar en potencia mecánica compuesto por un concentrador solar y un motor Stirling, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Méndez J. y Orjuela J. (2017), Investigación documental de simulaciones y aplicaciones de los motores Stirling, Fundación Universitaria los Libertadores, Bogotá, Colombia.
- Mendoza S., Vidal J., Melian V., Silva E. y Lopez Y., (2014), Proyección de un Sistema Dish/Stirling para Generación Distribuida, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.
- Trujillo D. (2017), Modelamiento matemático de un sistema concentración solar con motor Stirling en Colombia, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Estas investigaciones en Colombia son un gran paso al avance tecnológico, científico y a las alternativas de energías limpias basadas en los motores Stirling, que junto a la empresa privada pueden llegar a realizar proyectos que impacten positivamente en el país.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo a escala del motor Stirling para una práctica de laboratorio.

1.3.2 Objetivos Específicos

1.3.2.1 Elaborar el diseño de un prototipo a escala del motor Stirling

1.3.2.2 Elaborar una guía de laboratorio con un análisis termodinámico del motor Stirling

1.3.3. Organización de la tesis

En la primera parte se encuentra toda la historia y avances tecnológicos de los motores Stirling, luego se presentan enlaces donde se pueden apreciar videos y tutoriales con relación a los motores, más adelante están los cálculos, planos y la elaboración de un prototipo y finalmente se presenta una guía de laboratorio con los respectivos cálculos termodinámicos del motor Stirling.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2 MARCO TEÓRICO

2.1 La historia de los motores Stirling en la industria automotriz

En los años 90s renace la combustión externa al emplear un prototipo de sistema de propulsión híbrido Stirling en un Chevrolet Lumina modelo 95, aunque la prueba no fue del todo exitosa, cumplía varios objetivos claves como la eficiencia y la fiabilidad. Finalmente el proyecto fue abandonado, aun así continua siendo objeto de investigaciones y utilizado en otras aplicaciones científicas (*Gurstelle, 2006*).

Por sus numerosas y buenas cualidades, el motor Stirling es un candidato perfecto para revolucionar toda la industria automovilística y reemplazar los motores de combustión. En los últimos años los fabricantes de automóviles han experimentado con los motores Stirling, trabajando muy de la mano con el gobierno, con unos objetivos claros: bajar los niveles de emisiones de gas y una mejora en un 30% en la economía de los combustibles (*Gurstelle, 2006*).

La General Motors implementó un motor Stirling en un Chevrolet Celebrity 1985 y cumplió con todos los objetivos técnicos del programa, pero las mejoras en la eficiencia de los motores existentes de la época y los bajos costos en producción, golpearon duramente a la fabricación de los Stirling condenándolos a la irrelevancia automotriz (*Gurstelle, 2006*).

2.2 APLICACIONES ENERGÉTICAS

Una de las mayores aplicaciones de los motores Stirling es la producción simultánea de energía eléctrica y térmica, mediante un motor que mueve un generador para producir electricidad y a la vez entrega el agua de refrigeración, a temperaturas superiores a los 60 °C y esta se puede utilizar como una energía térmica. (*Chávez, F. y Orquera, D., 2012*),

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En España existe una planta eléctrica solar llamada la plataforma solar de Almería conformado por grandes discos parabólicos que reflejan y concentran los rayos solares hacia un motor Stirling, que produce energía mecánica y esta es convertida por un alternador en energía eléctrica. Estos sistemas experimentales son altamente eficiente con muy buen rendimiento. (Chávez, F. y Orquera, D., 2012), ver figura 1.



Figura 1. Plataforma solar de Almería (Chávez, F. y Orquera, D., 2012),

Esta planta termo-solar fuera de brindar electricidad a los hogares también brinda agua caliente y de esta forma se ahorran un consumo eléctrico en calentadores.

En la actualidad “motor Stirling” se refiere a un tipo de máquina de combustión externa, el cual fue inventado por el reverendo Robert Stirling, miembro de una familia escocesa de granjeros e ingenieros, nació en el año de 1790 y falleció en 1878, fue ministro de la iglesia escocesa en 1824, en 1840 recibió el grado de Doctor (Fano, 1997), ver figura 2.

Tenía un hermano menor llamado James Stirling, ingeniero civil, quien colaboro en sus investigaciones y fue quien presento el informe de pruebas de un motor Stirling ante la presencia de once eminentes científicos (Fano, 1997).

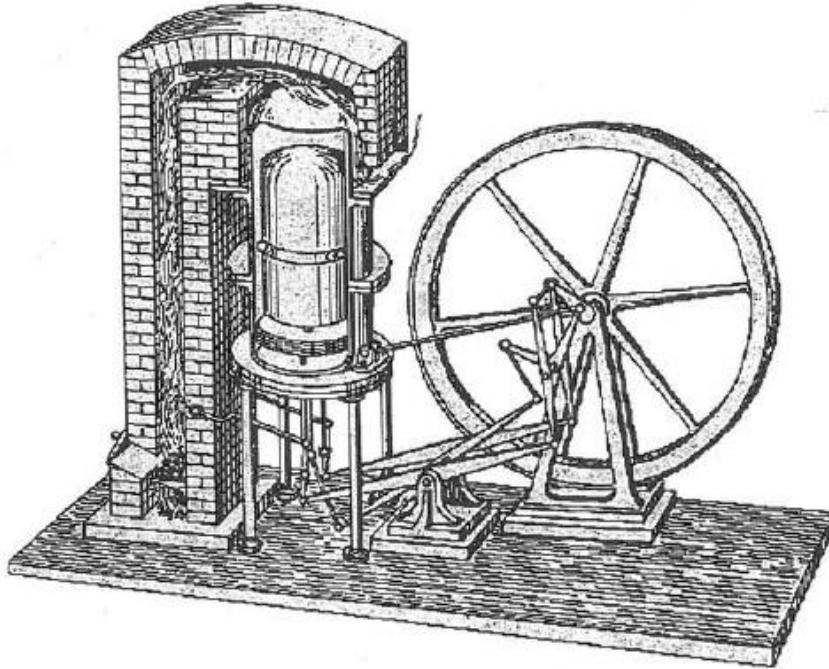


Figura 2. Esquema del motor Stirling original de 1816 (Fano, 1997)

El funcionamiento de este motor fue explicado por James Stirling de la siguiente forma:

La parte inferior del cilindro es donde llega el vapor, calentado a una temperatura promedio de 480 °C. El émbolo superior está casi en contacto con el otro pistón, donde el aire encerrado está confinado en la parte caliente del cilindro, se aumenta su elasticidad y presiona contra el pistón con una fuerza mayor a la atmosférica. El pistón es así desplazado hacia abajo donde el vástago y el cigüeñal suben hasta que la presión del aire sea igual a la atmosférica.

El impulso obtenido por la volante mueve el cigüeñal y el vástago mueve el émbolo respecto del pistón. El aire encerrado desciende por el espacio entre el émbolo y el cilindro hasta la parte fría, este se enfría en el descenso, disminuye su elasticidad y la presión disminuye con respecto a la atmosférica, el pistón es empujado hacia arriba y el cigüeñal hacia abajo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La vuelta del volante lleva de nuevo el émbolo hacia el pistón, el aire sube a través del mismo recorrido por el que bajó, se calienta y desplaza el pistón hacia abajo y el cigüeñal hacia arriba, y así alternativamente. De este modo se produce un movimiento rotativo que puede ser aplicado.

La potencia del motor se regula permitiendo que una pequeña parte de aire entre o salga por una válvula que se abre o cierra como en un regulador de máquinas de vapor, situada en la parte superior del cilindro. *(Fano, 1997)*.

Los motores Stirling eran conocidos en el siglo XX como motores de aire caliente, funcionaban con cualquier tipo de combustible con un funcionamiento sencillo, seguro, silencioso y económico respecto a las maquinas alternativas de vapor de la época. *(Fano, 1997)*

Era considerado como una posible máquina de movimiento perpetuo, de acuerdo con la termodinámica moderna, el ciclo Stirling es teóricamente tan eficiente como podría ser la máquina de Carnot. *(Miranda, 2008)*

2.3 Mejoras realizadas por los hermanos Stirling al diseño original

La principal mejora fue el uso de un nivel de presión, el cual incrementó la eficiencia, otra fue en 1843 cuando convirtieron una máquina de vapor en una que funcionara con su principio, donde alcanzo una potencia de 37 hp, con una presión interna que vario entre 160 a 240 $\frac{lbf}{pulg^2}$ Operando como una máquina de aire consumía menos carbón siendo más segura ya que la caldera no estaba sujeta a una explosión. Los resultados fueron muy satisfactorios, con el inconveniente que las porciones calientes se quemaban después de 6 o 7 meses de uso. *(Miranda, 2008)*.

Todos estos modelos no tuvieron gran éxito económico a pesar que la potencia y la eficiencia eran mayores que la de las máquinas de vapor de la época, la razón principal fue el poco conocimiento de materiales resistentes al calor, ocasionando la quema de los cilindros. (Miranda, 2008)

La operación del ciclo Stirling con una configuración de dos pistones, unido por un regenerador es explicada a continuación (Ver Figura 3):

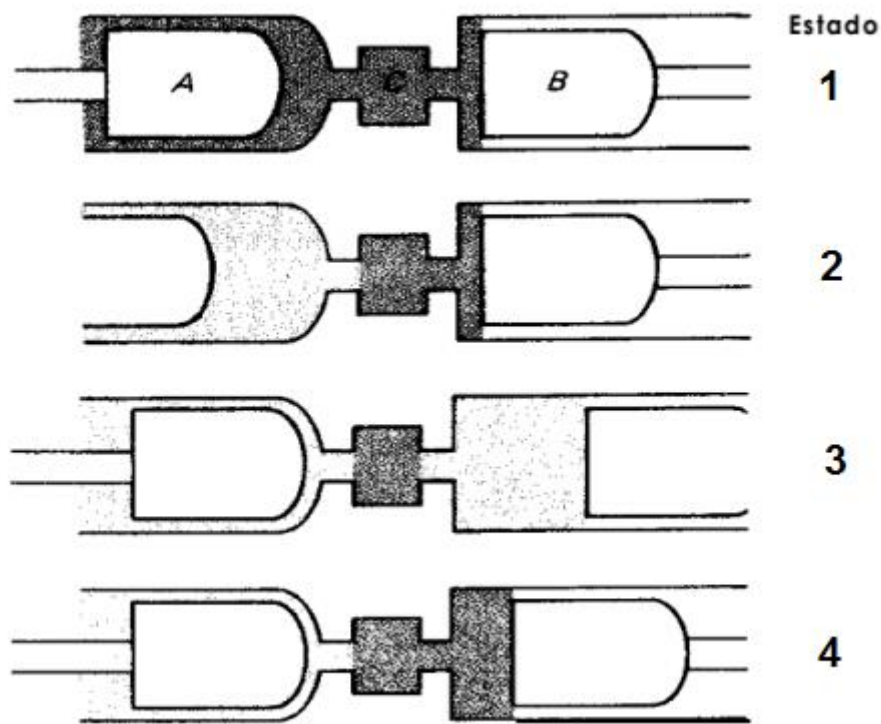


Figura 3. Ciclo Stirling para dos pistones (Howell, J., 2013)

1-2 Expansión a $T_h = \text{constante}$, (adición de calor de una fuente externa); En el estado 1 se transfiere calor hacia el fluido de trabajo en el cilindro del pistón A, generando la expansión del gas en el cilindro y este a su vez se desplaza hacia la izquierda con una velocidad suficiente para mantener la temperatura constante del gas hasta llegar al estado 2. (Howell, J., 2013)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2-3 regeneración a $v = \text{constante}$, (transferencia de calor interna desde el fluido de trabajo hacia el regenerador); Al llegar al estado 2, los dos pistones se desplazan a la derecha a la misma velocidad, de esta manera se mantiene constante el volumen del gas pasando por la malla o regenerador, la cual en ese instante se encuentra a menor temperatura debido al estado 1. (Howell, J., 2013)

3-4 compresión a $TL = \text{constante}$, (rechazo de calor a un sumidero externo); En el estado 3, todo el gas frío se encuentra en el pistón B, este se mueve a la izquierda mientras que el pistón A se mantiene fijo; simultáneamente se transfiere calor desde el gas de tal manera que la temperatura del gas se mantiene constante durante la compresión. (Howell, J., 2013)

4-1 regeneración a $v = \text{constante}$, (nuevamente, transferencia de calor interna desde un regenerador hacia el fluido de trabajo): En el estado 4 se mantiene el volumen constante como en el estado 1, desplazándose los dos pistones hacia la izquierda, manteniendo el gas a volumen constante y a su vez siendo forzado a pasar por el regenerador. El regenerador gana calor para luego cederlo al gas frío, de esta manera se ve reflejada la disminución de la temperatura en el material del regenerador. El ciclo vuelve a su estado 1 y el regenerador queda listo para recibir la energía del ciclo nuevamente. La transferencia de calor se genera en los procesos isotérmicos 2-3 y 4-1 son de la misma magnitud, pero con signo contrario. El proceso 2-3 tiene adición de calor, o calor positivo; El proceso 4-1 tiene rechazo de calor, o calor negativo. (Howell, J., 2013)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El trabajo que se realiza en un ciclo Stirling, se expresa de la siguiente manera:

Trabajo neto del sistema Stirling es igual al calor brindado por una fuente de alta temperatura, convierte parte de esa temperatura en trabajo y rechaza el calor sobrante como desecho a un sumidero. (Trujillo D. 2017):

$$W_{neto} = Q_{entrada} - Q_{salida} \quad (1).$$

El trabajo para los procesos isotérmicos se define como; el calor de salida que es igual al trabajo consumido en la compresión de sustancias mediante una compresión isotérmica (ciclo con la misma temperatura), que extrae el calor al sistema (Trujillo D. 2017):

$$Q_{salida} = Q_{1-2} = T_{min}(S_2 - S_1) = RT_{min} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2).$$

El calor de entrada es igual al trabajo de expansión isotérmica por el cual, se le transmite calor a la sustancia a una temperatura máxima (Trujillo D. 2017)

$$Q_{entrada} = Q_{3-4} = T_{max}(S_4 - S_3) = RT_{max} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (3).$$

La eficiencia del motor Stirling con un fluido de gas ideal, se puede considerar igual al de la máquina de Carnot, con $V_1=V_4$ y $V_2=V_3$. Por tratarse de una regeneración ideal todo el calor que ingresa lo provee el regenerador que se calienta durante la etapa 4-1, por lo tanto el calor Q_{2-3} no se toma en cuenta. No es realmente calor ingresante, sino calor que está contenido dentro del motor y pasa del gas al regenerador y vuelve de nuevo del regenerador al gas. Por tanto, el rendimiento es igual a (Zegarra F. 2004):

$$\eta = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{RT_{min} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{RT_{max} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (4).$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

- η = eficiencia del ciclo Stirling
- Q_{1-2} = calor de salida
- Q_{3-4} = calor de entrada
- Q_{entrada} = calor agregado
- Q_{salida} = calor expulsado
- R = constante del gas ideal
- S_1 = entropía en el estado 1
- T_{max} = Temperatura máxima absoluta
- T_{min} = Temperatura mínima absoluta
- V_1 = volumen específico en el ciclo 1
- W_{neto} = trabajo neto

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES STIRLING

2.4.1 Tipo alfa

Este motor está conformado por dos cilindros que van unidos por un ducto donde se realiza el intercambio de calor entre ellos, con un desfase entre pistones se logra el intercambio siendo uno de los cilindros el generador de alta temperatura y el otro de baja temperatura (*Hernández y Ramírez, 2013*), ver figura 4.

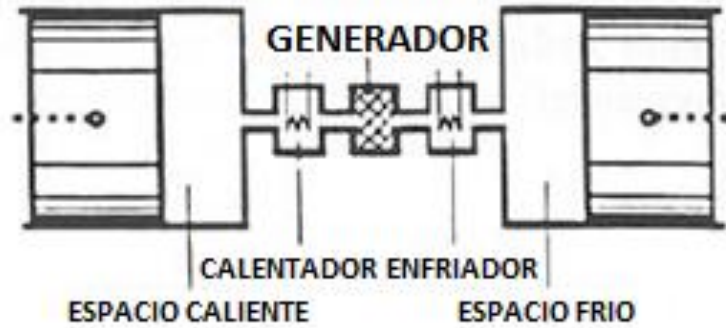


Figura 4. Motor Stirling tipo Alfa (*Fano, 1997*).

2.4.2 Tipo beta

Este motor está conformado por un solo cilindro, en su interior se da la transferencia de calor al tener un extremo caliente y el otro frío y el intercambio se da a través del pistón, este es el diseño original del reverendo Robert Stirling (*Miranda, 2008*), ver figura 5.

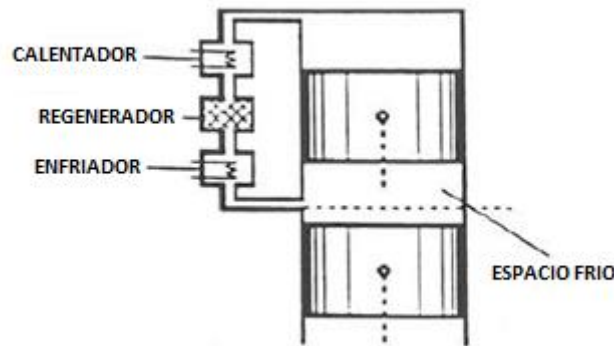


Figura 5. Motor Stirling tipo Beta (*Fano, 2008*).

2.4.3 Tipo gama

Este motor consta también de dos cilindros, es una derivación del Beta, pero sus cilindros están desplazados, uno de ellos es el encargado del intercambio de calor como el tipo beta

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

y el otro está conectado a través de un ducto por el lado frío que es el pistón de la potencia (Hernández y Ramírez, 2013), ver figura 6.



Figura 6. Motor Stirling tipo Gama (Fano, 1997).

2.5 Desarrollo de un motor Stirling impulsado por gases residuales

Debido a las alzas en los precios del petróleo, el daño ambiental y los efectos del calentamiento global, en el orden del desarrollo sostenible de los recursos, se forma el combinado de calor y potencia (CHP), un sistema que puede ser impulsado por energía limpia como solar, el biogás y el calor de escape. Ha llamado la atención de las grandes potencias mundiales los motores para los sistemas de combinación de calor y potencia (CHP). Las principales fuentes de calor para estos motores podrían ser la solar, biogás y gases residuales con temperaturas media-alta de 120 a 150 °C; si la fuente de alimentación del sistema es menos de 5 kW, el motor Stirling debido a su alta eficiencia (de un 70% aprox.) y bajo en ruidos es ideal para este sistema (Tie et al., 2012).

Los motores ideales para este sistema serían los tipos beta ya que podrían evitar la fuerza lateral desde el pistón que actúa hacia la pared interna del cilindro y aprovechar el mecanismo de accionamiento rómbico (Tie et al., 2012).

En la figura 7 se tiene un motor Stirling diseñado para el aprovechamiento de los gases residuales de industrias como; las forjas, hornos, cementeras y fundidoras de vidrio con temperaturas residuales que van desde los 600 a 1200°C (Tie et al., 2012).

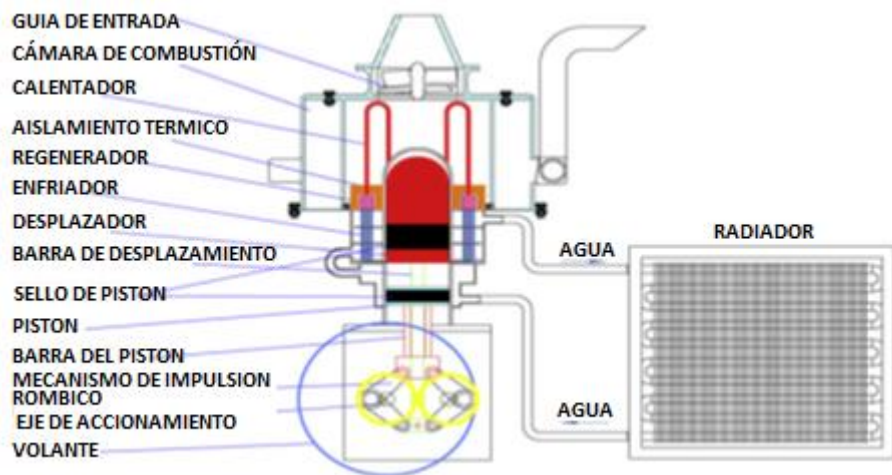


Figura 7. Motor Stirling diseñado e impulsado por gases residuales (Tie et al., 2012).

Para que este motor tipo beta capture el calor proveniente de los gases residuales es necesario una cámara de intercambiador de calor que se observa en la figura 8 (Tie et al., 2012).

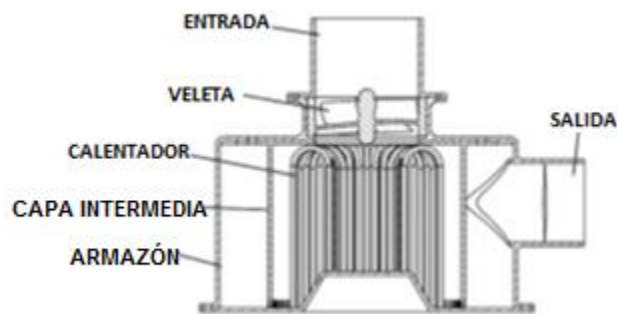


Figura 8. Estructura de la cámara de combustión para gases residuales (Tie et al., 2012).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.6 Funcionamiento del motor Stirling

Cuando los gases residuales entran a la cámara de combustión de la figura 6, empiezan a liberar calor a los tubos del calentador. El eje de salida en el centro de la volante se acopla a un dinamómetro de corrientes parasitas en donde la potencia de salida y la velocidad se miden simultáneamente. Las aguas de refrigeración circulantes son impulsadas por una bomba con el fin de enfriar el refrigerador del motor y el dinamómetro. Un intercambiador de calor convector disipa el calor del agua de refrigeración a temperatura ambiente. Hay 3 sensores de presión que se utilizan para controlar la presión del fluido dentro del sistema del intercambiador de calor, el primero está ubicado entre el enfriador y la entrada a la cámara de compresión, el segundo está ubicado entre el enfriador y el regenerador, el tercero está ubicado entre el regenerador y el calentador. Solo un tubo del calentador es monitoreado con 4 termopares tipo K (*Tie et al., 2012*).

Antes de empezar la operación el motor Stirling debe estar vacío para comenzar a llenarlo con helio hasta que el sensor indique 2 MPa. Entonces las válvulas están cerradas y el proceso de llenado ha terminado. El motor de arranque inicia sin carga hasta que los termopares muestren una temperatura de 350 °C, inmediatamente se activa la bomba de agua de enfriamiento y luego el motor de arranque es operado de manera intermitente hasta que el motor Stirling empiece a operar solo (*Tie, et al., 2012*).

Una vez que el motor Stirling empieza su funcionamiento normal, la presión del fluido de trabajo es controlada por las válvulas, a través de las cuales el helio podría fluir por dentro o fuera del motor, las temperaturas son controladas a través de una bomba de agua que acelera la refrigeración (*Tie et al., 2012*).

La figura 9 indica la relación entre el par, la potencia y la velocidad que desarrolla el motor Stirling.

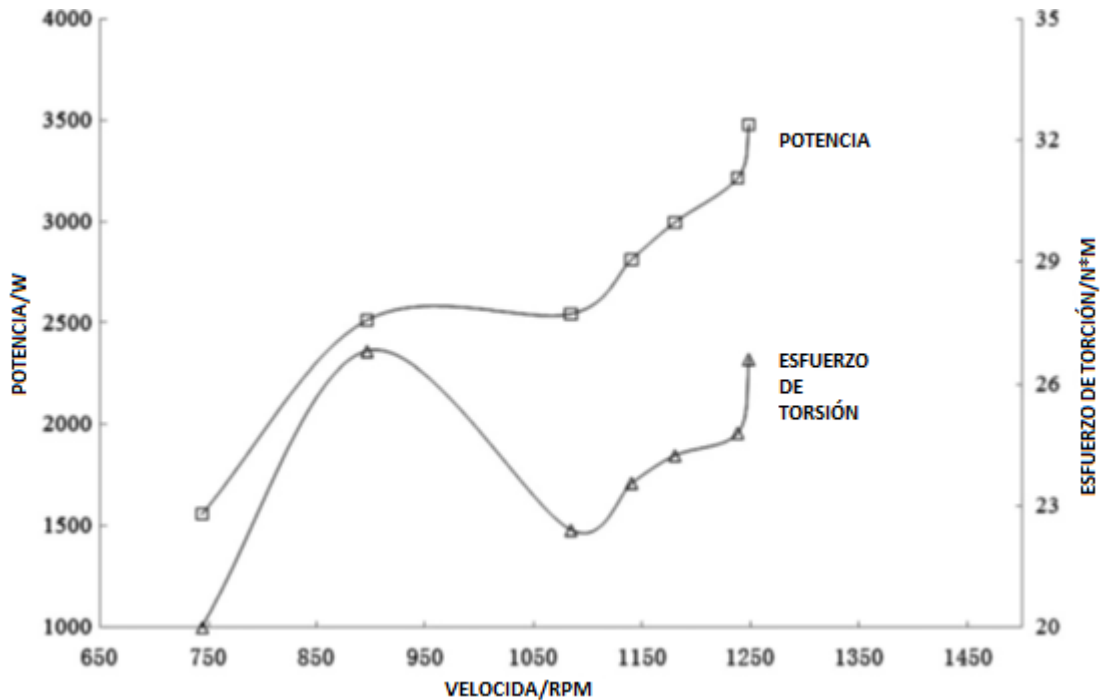


Figura 9. Comportamiento de la potencia vs. Velocidad para un motor Stirling (Tie et al., 2012).

Como se observa en la figura 9 el motor Stirling a velocidades bajas puede tener buena potencia pero al desarrollar mayor velocidad esta potencia disminuye considerablemente, no obstante este puede alcanzar grandes velocidades para aplicaciones que no requieran tanta potencia. Es claro que la industria requiere motores que, al igual que los de gasolina y vapor, cuando estén en su velocidad máxima tengan buena potencia. Esta fue una de las razones por las cuales la fabricación de motores Stirling no prospero en las industrias ni en el sector automotriz.

Según la figura 8, se obtuvieron los siguientes datos:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- El máximo par alcanzado fue de 26.6 Nm
- La salida máxima de potencia del eje fue de 3476 W
- La velocidad correspondiente fue de 1248 RPM

En la tabla 1, se observan las características de los motores de los vehículos más comerciales en Colombia para comparar las características con las del motor Stirling:

Tabla 1. Propiedades de los motores a gasolina, (Castillo, J., 2017)

Denominación		Descripción	
Marca	Chevrolet	Chevrolet	Chevrolet
Modelo	Aveo	Grand Vitara	Luv D-mas 4x2
Año de fabricación	2009	2011	2010
Cilindrada total	1,4 lt	2,0 lt	2,4 lt
Compresión del motor	9,5:1	9,3:1	9,6:1
Numero de cilindros	4	4	4
Potencia máxima	68,66 kW a 6200 rpm	94 kW a 6000 rpm	92,5 kW a 4800 rpm
Torque máximo	130 Nm a 3400 rpm	174 Nm a 4300 rpm	195 Nm a 3600 rpm

En la tabla 1 se puede establecer el torque máximo del motor del Aveo que es el de menor cilindraje con el motor Stirling, el motor del Aveo quintuplica su potencia, y con los otros aumenta más la diferencia de potencias, además según la tabla 1, este torque máximo en el Stirling es a menor velocidad, contrario a los motores de gasolina que desarrollan ese torque a velocidades de más de 3400 RPM.

De igual manera ocurre con las potencias, donde el motor Stirling desarrolla 3.4kW a 1248 Rpm y los motores de gasolina desarrollan desde 68kW a más de 6000 RPM. A pesar que la eficiencia del motor Stirling es superior a los motores de combustión interna, la industria automotriz no realizara mayores inversiones en estos hasta que se desarrollen motores con potencias y torque similares o iguales a los de gasolina.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3 METODOLOGÍA

3.1 Revisar las diferentes fuentes bibliográficas y webgrafía de diseños de motores Stirling.

Se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos científicas para establecer las ecuaciones termofluidodinámicas que rigen los cálculos de estos motores.

De igual manera se tuvieron en cuenta las plataformas virtuales para buscar temas relacionados con los diferentes diseños y como llevar a cabo su construcción. Finalmente se utilizaron videos donde se indica el paso a paso de la creación de un prototipo de motor Stirling.

3.2 Realizar diseño

Con los cálculos obtenidos de los textos, se llevó a cabo el diseño del motor Stirling, utilizando las salas de cómputo del bloque H del ITM, para utilizar uno de los programas de diseño y minimizar las fallas, evaluando cuál de los tres tipos tiene mejor funcionamiento y el que mejor se acomoda al presupuesto estimado.

Con el diseño se pudo dimensionar el tamaño que mejor eficiencia entrega como resultado final, seleccionando los componentes comerciales que mejor se adapten a estas medidas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3 Construcción del prototipo

Con base en el diseño obtenido se procedió a la construcción del prototipo final. Este se construyó en los laboratorios de soldadura, máquinas y herramientas, diseño y de termodinámica del ITM. En ellos se construyó la base, los soportes, se maquinaron poleas, pistones, cilindros, se llevó puesta a punto y se parametrizará los rangos de altura y desplazamiento del pistón, con el fin de interactuar con él hasta obtener el funcionamiento deseado.

Se contó con la ayuda de un personal altamente calificado de apoyo en cada uno de los laboratorios que son los respectivos técnicos de laboratorio del ITM, de igual manera el apoyo de los docentes en las respectivas áreas de trabajo y algunos estudiantes que dominan a la perfección las máquinas y herramientas a utilizar.

3.4 Elaboración de la guía de laboratorio

Se elaboró una guía de trabajo de laboratorio para el estudiante, donde se plasma la teoría recapitulada de las bibliografías utilizadas, con un cuestionario el estudiante se lleve unos conceptos claros del motor Stirling.

De igual manera quedó plasmado en la guía los pasos para elaborar un motor Stirling, con los principios de funcionamiento apoyado del prototipo existente en el laboratorio para que evidencie su funcionamiento y a su vez se motive para construir uno.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de analizar los avances en investigación en Colombia, se visualizaron videos sobre la construcción de prototipos que facilitaran el ensamble de un motor Stirling, que fuera acorde para un laboratorio, donde se puedan realizar prácticas y llevar acabo otras investigaciones futuras. A continuación, veremos las páginas utilizadas con su respectivo aporte a la construcción:

4.1 Videos de apoyo, páginas de internet donde se pueden consultar y ver los funcionamientos de los motores Stirling:

- <https://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/MotorStirling.html>

En este enlace se visualiza el funcionamiento de un motor Stirling tipo beta, con una simulación gráfica del comportamiento de la presión y el volumen del sistema en cada una de sus etapas. Es un prototipo creado en la Universidad de los Andes en Bogotá, donde cuentan con uno de los laboratorios de ciencias térmicas más grandes de Colombia.

- <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106191/TFG.pdf>

En el anterior trabajo de grado se puede apreciar el diseño de un prototipo de motor Stirling tipo alfa con cálculos y gráficas, con un software matemático que entrega los datos precisos de una simulación. En esta se puede apreciar la eficiencia de este sistema, las presiones, volumen y velocidades que puede desarrollar el motor Stirling.

- <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5157/1/T-ESPE-033127.pdf>

En este trabajo se encuentra uno de los métodos para calcular matemáticamente todos los parámetros para el diseño y construcción de un motor Stirling. Este fue utilizado en los cálculos de este proyecto ya que los

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

principios del motor Stirling tipo Alfa y tipo Beta son iguales solo se diferencian porque en uno se utiliza un desplazador y en el otro un pistón, pero se pueden calcular de igual manera.

- <https://www.youtube.com/watch?v=dElQxu6aU4g>

El siguiente enlace fue primordial en la construcción del prototipo de este trabajo. Este vídeo muestra paso a paso la construcción de un motor Stirling tipo Alfa; gracias a este se pudo determinar algunas de las partes del motor utilizando materiales reciclados de aparatos electrónicos en desuso y como es de observar es muy parecido al de este proyecto, en cuanto a las jeringas, el cigüeñal, los émbolos y el regenerador.

- <https://www.youtube.com/watch?v=oYXG0seBV7A>

En el video anterior se puede apreciar un motor Stirling de laboratorio similar al que se esperaba llegar con el proyecto.

4.2 Diseño del motor Stirling

4.2.1 Determinación de los parámetros óptimos para el diseño del motor Stirling

La figura 10 es la representación gráfica del movimiento del émbolo impulsado por el cigüeñal, en él se detalla los ángulos entre las bielas, para hallar las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración de los sistemas Stirling.

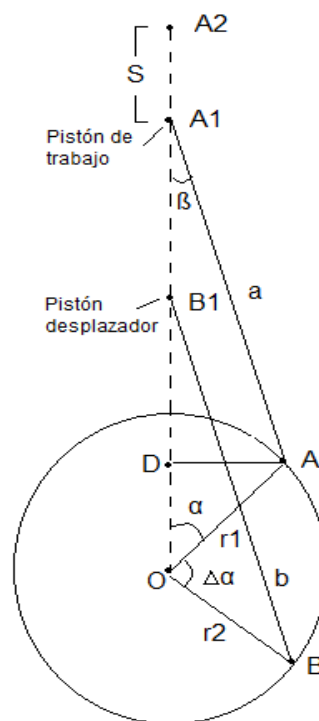


Figura 10. Mecanismo biela-manivela del pistón de fuerza y desplazador (Zegarra F. 2004).

4.2.1.1 Análisis del mecanismo

\underline{a} = aceleración del pistón

\underline{A} = área del cilindro

α = ángulo de rotación de la manivela

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

β = ángulo que forma el eje del pistón de trabajo con el eje central

S = carrera del pistón de trabajo

v = velocidad del pistón

V = volumen del cilindro

V_{\max} = volumen máximo

ω = velocidad angular del cigüeñal

4.2.1.2 Ecuación del desplazamiento

El desplazamiento del émbolo está representado como “S” en la figura 10. Realizando un análisis vectorial de “S” tenemos que A2 y A1 son los extremos, y que la diferencia de la proyección del radio r1 y el vector entre el centro del cigüeñal y A1 es igual a S (Zegarra F. 2004).

$$S = A_2A_1 = A_2O - A_1D - DO \quad (5).$$

Convirtiendo los vectores en coordenadas polares tenemos:

$$S = (a + r_1) - a \cdot \cos \beta - r_1 \cdot \cos \alpha$$

$$S = a + r_1 - a \cdot \cos \beta - r_1 \cdot \cos \alpha$$

$$S = a(1 - \cos \beta) + r_1(1 - \cos \alpha) \quad (6).$$

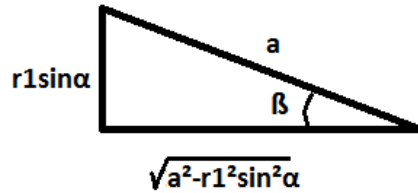
Con el fin de pasar la ecuación a una sola variable se realiza un cambio de variable; $\mu = r_1/a$ es un valor muy pequeño ya que “a” es una longitud muy grande y “r1” una muy pequeña; por tal motivo que “ μ ” puede llegar a ser despreciable.

Convertimos el vector DA (proyección del radio sobre el eje), en coordenadas polares para realizar una sustitución trigonométrica y pasar las ecuaciones a un mismo ángulo (Zegarra F. 2004).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$DA = r1 \sin \alpha = a \sin \beta \quad (7).$$

$$\sin \beta = \mu \sin \alpha \quad (8).$$



$$\cos \beta = \frac{\sqrt{a^2 - r1^2 \sin^2 \alpha}}{a}$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \mu^2 \sin^2 \alpha} \quad (9).$$

Reemplazando la ecuación 6 en 2 obtenemos la siguiente ecuación:

$$S = r1(1 - \cos \alpha) + a \left(1 - \sqrt{1 - \mu^2 \sin^2 \alpha}\right)$$

Por ser $\mu^2 \cong 0$ podemos decir; $S = r1(1 - \cos \alpha) + a(1 - \sqrt{1})$

$$S = r1(1 - \cos \alpha) \quad (10).$$

4.2.1.3 Ecuación de la velocidad

Teniendo la ecuación 10 de posición del émbolo S, la derivamos para hallar la velocidad del pistón (Zegarra F. 2004).

$$v = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dS}{d\alpha} \omega \quad (11).$$

$$v = (r1 \sin \alpha) \omega \quad (12).$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.1.4 Ecuación de la aceleración

Al derivar la ecuación 12 de la velocidad del pistón se obtiene la ecuación 13, que corresponde a la ecuación de la aceleración del sistema (Zegarra F. 2004).

$$\underline{a} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \omega \quad (13).$$

$$\underline{a} = (r1 \cos \alpha) \omega^2 \quad (14).$$

Los cálculos anteriores, son iguales para el pistón desplazador.

4.2.1.5 Volumen de desplazamiento

La fórmula para calcular el volumen de desplazamiento de aire del pistón caliente y de frío es igual al producto del desplazamiento "S" y el área del cilindro "A" (Zegarra F. 2004).

$$V_h = \underline{A} S = \underline{A} r1(1 - \cos \alpha) \quad (15).$$

La ecuación para el volumen máximo de aire en el cilindro es cuando $\alpha=180^\circ$ y el émbolo está en la parte más baja del cilindro, por geometría en la figura 10

$$V_{max} = 2 \underline{A} r1 \quad (16).$$

Reemplazando 16 en 15 tenemos; $V_h = \frac{V_{max}}{2} (1 - \cos \alpha)$ (17).

$$V_k = V_{max} - \frac{V_{max}}{2} (1 - \cos \Delta\alpha) = \frac{V_{max}}{2} (1 + \cos \Delta\alpha) \quad (18).$$

Donde $\Delta\alpha$ es igual al ángulo de desfase entre las dos bielas del sistema (Zegarra F. 2004).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.1.6 Hipótesis de la teoría de Schmidt

El volumen del motor se calcula fácilmente utilizando la geometría interna y el movimiento de sus partes.

La presión se calcula usando las leyes de los gases ideales y haciendo las siguientes suposiciones:

- No hay pérdidas de presión en los intercambiadores y no hay diferencias de presión interna.
- Hay regeneración perfecta
- El gas es considerado ideal
- Los procesos de compresión y expansión son isotérmicos
- Las temperaturas del gas en el regenerador están en función de la temperatura máxima y mínima que son las temperaturas en el calentador y en el enfriador respectivamente
- El espacio muerto de expansión es mantenido a la temperatura mínima y el de compresión a la temperatura máxima, *(Chávez, y Orquera, 2012)*

La temperatura en el regenerador se puede calcular por el balance de la primera ley en los intercambiadores por ser el intercambiador de calor del sistema y con el método LMTD (diferencia media logarítmica de temperatura), se calcula la temperatura;

$$T_R = \Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{T_{max} - T_{min}}{\ln(T_{max} / T_{min})} \quad (19).$$

Donde:

- T_{max} = Temperatura máxima
- T_{min} = Temperatura mínima
- T_R = Temperatura del regenerado
- ΔT_1 = Diferencial de temperatura en el estado 1

4.2.1.7 Ecuación de la masa del aire en el sistema

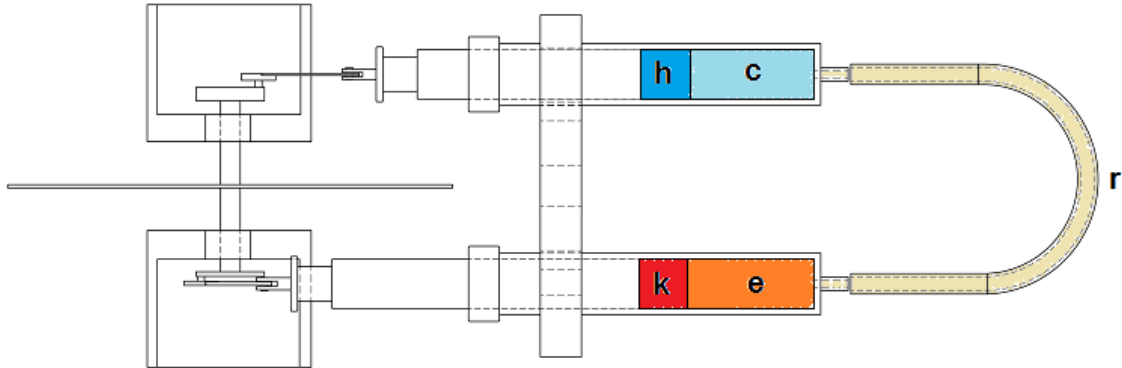


Figura 11. Recámaras de aire del motor Stirling

Los espacios de aire del motor Stirling son los siguientes (Ver Figura 11):

- k = enfriador
- h = calentador
- r = regenerador
- c = espacio muerto de compresión
- e = espacio muerto de expansión

Para calcular la masa de todo el sistema tenemos que:

$$M = M_k + M_h + M_r + M_c + M_e \quad (20).$$

Por ley de gases ideales tenemos que:

$$M = \frac{P}{R} \left(\frac{V_k}{T_{min}} + \frac{V_h}{T_{max}} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_c}{T_{min}} + \frac{V_e}{T_{max}} \right) \quad (21).$$

Realizando cambio de variable en V_r , V_c , y V_e dividiendo por el V_{max} obtenemos una constante para cada una de ellas con relación al V_{max} quedando de la siguiente forma (Zegarra F. 2004):

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\bullet \quad X_r = \frac{V_r}{V_{max}} \quad (22).$$

$$\bullet \quad X_c = \frac{V_c}{V_{max}} \quad (23).$$

$$\bullet \quad X_e = \frac{V_e}{V_{max}} \quad (24).$$

Remplazando en la ecuación 18 las constantes 22, 23 y 24 y las ecuaciones 14 15 y 16 tenemos que (Zegarra F. 2004):

$$M = \frac{P}{R} \left(\frac{\frac{V_{max}}{2} (1 - \cos \Delta\alpha)}{T_{min}} + \frac{\frac{V_{max}}{2} (1 - \cos \alpha)}{T_{max}} + \frac{X_r V_{max}}{\frac{T_{max} - T_{min}}{\ln(T_{max}/T_{min})}} + \frac{X_c V_{max}}{T_{min}} + \frac{X_e V_{max}}{T_{max}} \right)$$

$$M = \frac{P}{R} V_{max} \left\{ \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\alpha) + X_c}{T_{min}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + X_e}{T_{max}} \right] + \left[\frac{X_r \ln(T_{max}/T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right] \right\} \quad (25).$$

4.2.1.8 Presión instantánea del motor Stirling

Al despejar la ecuación de la masa obtenemos la presión en cualquier momento según el ángulo α de la biela (Zegarra F. 2004)

$$P = \frac{MR}{V_{max} \left\{ \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\alpha) + X_c}{T_{min}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + X_e}{T_{max}} \right] + \left[\frac{X_r \ln(T_{max}/T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right] \right\}} \quad (26).$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.1.9 Ecuaciones para determinar el trabajo

El volumen total es igual a la suma de cada uno de los volúmenes del sistema (Zegarra F. 2004): $V = V_h + V_k + V_r + V_e + V_c$

Remplazando en la ecuación anterior las variables X_r , X_c , X_e , y las ecuaciones 14 y 15 tenemos:

$$V = \frac{V_{max}}{2}(1 - \cos \alpha) + \frac{V_{max}}{2}(1 - \cos \Delta\alpha) + X_r V_{max} + X_e V_{max} + X_c V_{max} \quad (27).$$

Simplificando la ecuación anterior obtenemos la fórmula del volumen con respecto al ángulo α (Zegarra F. 2004):

$$V = V_{max} \left[\frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\alpha) + X_r + X_e + X_c \right] \quad (28).$$

El trabajo es igual a la fuerza por la distancia que para este caso la fuerza es la presión del sistema y la distancia es la recorrida por el pistón "S" que es igual a la diferencial del volumen (Zegarra F. 2004):

$$W = \oint PdV = \oint Pd(V_h + V_k + V_r + V_e + V_c) = \oint pd \left[\frac{dV_h}{d\alpha} + \frac{dV_c}{d\alpha} \right] d\alpha \quad (29).$$

4.2.1.9.1 Ecuación trabajo de expansión

Por propiedades de las integrales, estas se pueden resolver por tramos y hallar cada uno de los trabajos del sistema (Zegarra F. 2004):

$$W_h = \int_0^{2\pi} PdV_h \quad (30).$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Reemplazando las ecuaciones 17 y 26 en la ecuación 30 hallamos la ecuación del trabajo en el pistón de expansión:

$$W_h = \frac{MR}{2} \int_0^{2\pi} \frac{V_{max}(1 - \cos \alpha)}{V_{max} \left\{ \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\alpha) + X_c}{T_{min}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + X_e}{T_{max}} \right] + \left[\frac{X_r \ln(T_{max}/T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right] \right\}} d\alpha \quad (31).$$

4.2.1.9.2 Ecuación trabajo compresión

De igual modo a la ecuación anterior se reemplaza las ecuaciones 18 y 26 en la ecuación 30 que es igual para ambos pistones, hallando el trabajo del pistón de compresión.

$$W_k = \frac{MR}{2} \int_0^{2\pi} \frac{(1 - \cos \Delta\alpha)}{\left\{ \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\alpha) + X_c}{T_{min}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + X_e}{T_{max}} \right] + \left[\frac{X_r \ln(T_{max}/T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right] \right\}} d\alpha \quad (32).$$

Con las ecuaciones anteriormente mencionadas se pueden hallar los parámetros de cualquiera de los tres prototipos del motor Stirling, reemplazando cada una de las variables y determinando el ángulo de desfase entre las bielas, igualmente determinando el tipo de gas a utilizar en el sistema y las temperaturas a las que va hacer sometido el motor.

Las variables de los espacios muertos y el de regenerador, son claves a la hora de decidir qué grado de eficiencia se quiere llegar con la máquina.

4.2.2 Selección del prototipo a fabricar

Según los parámetros anteriores los volúmenes de desplazamiento de aire son iguales, si los ángulos el cigüeñal y la longitud de las bielas también lo sean, si los cilindros son de diferente área, la carrera de los émbolos serán diferentes entre ellos, por ende, los radios del cigüeñal también lo serán.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se debe analizar la factibilidad de los materiales comerciales que se ajusten a estos parámetros, que resistan temperaturas de más de 500 a 600 °C por periodos superiores a 20 min, que la fricción del cilindro con el émbolo sea mínima o nula y que sea un material compacto que no permita escapes de aire. Una vez analizadas todas estas variables se opta por trabajar con jeringas de cristal del mismo tamaño, estas jeringas tienen una alta resistencia a las temperaturas de hasta 600 a 700 °C, la fricción entre el cilindro y el émbolo son mínimas y su estructura de cristal no permite fugas de aire; al ser las dos jeringas iguales, los parámetros para los pistones de compresión y expansión serían iguales y a la vez los recorridos del émbolo y radios del cigüeñal también lo serán.

Siendo los pistones iguales el diseño que más se acomoda a estas condiciones es el motor Stirling tipo alfa, ya que es el único de los tres que cuenta con dos pistones, los otros dos trabajan mediante un pistón de fuerza y un desplazador.

4.3 Construcción del motor Stirling tipo alfa

Una vez recopilada toda la información necesaria se utilizarán todos los parámetros para realizar todos los cálculos del motor, la única variable que se asumirá, tomando como referencia a *Zegarra (2004)*, el Angulo de desfase entre los cigüeñales del pistón de compresión y de expansión, que será igual a: $\Delta\alpha=90^\circ$.

Algunos datos de la Tabla 2, fueron el resultado de las ecuaciones 13, 16 y 19, los otros fueron medidos físicamente y tomados de las tablas termodinámicas de la siguiente forma:

- $T_{max} = 477^\circ C = 750K$
- $T_{min} = 25^\circ C = 298K$
- R = Tabla A-1 Termodinámica (*Cengel A. Yunus, 2012*).
- P = atm = 85,113 kPa (EPM, 2018).
- $\alpha = 120^\circ = 2\pi/3$
- $\alpha + \Delta\alpha = 210^\circ = 7\pi/6$
- $r1 = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- $r_j = 7,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
- $\underline{A} = \pi r_j^2 = 1,76 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- $V_{max} = 2 \underline{A} r_1 = 2,12 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- $T_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{\ln(T_{max}/T_{min})} = \frac{750\text{K} - 298\text{K}}{\ln(750\text{K}/298\text{K})} = 489,7\text{K}$
- $V_c = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- $V_e = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- $V_r = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- $$M = \frac{P}{R} V_{max} \left\{ \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos(\alpha + \Delta\alpha)) + X_c}{T_{min}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + X_e}{T_{max}} \right] + \left[\frac{X_r \ln(T_{max}/T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right] \right\} =$$

$$\frac{85,113 \text{ kPa}}{0,298 \text{ kJ/kgK}} (2,12 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \left\{ \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos 7\pi/6) + 0,94}{298\text{K}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\pi/3) + 0,94}{750\text{K}} \right] + \right.$$

$$\left. \left[\frac{0,94 \ln(750\text{K}/298\text{K})}{750\text{K} - 298\text{K}} \right] \right\} = 6,33 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

Tabla 2. Parámetros iniciales del motor Stirling

NUMERO	VARIABLE	RESULTADO	UNIDADES
1	Tmax	750	K
2	Tmin	298	K
3	R	0,287	kJ/kg-K
4	M	6,33E-06	kg
5	Patm	85,113	kPa
6	Tr	489,7182356	K
7	Vc	0,000002	m3
8	Ve	0,000002	m3
9	Vr	0,000002	m3
10	$\Delta\alpha$	1,57079633	rad
11	Vmax	2,12058E-06	m3
12	A	0,000176715	m2
13	rj	0,0075	m
14	r1	0,006	m
15	Xc	0,943140404	
16	Xe	0,943140404	
17	Xr	0,943140404	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Al sustituir los ángulos en un periodo de 0 a 2π en las ecuaciones 14, 15, 20 y 21 en la Tabla 2., obtenemos los volúmenes de desplazamiento, las presiones respectivas de las ecuaciones y los volúmenes específicos.

Tabla 3. Grados vs presiones

GRADOS	α (π)	$k+\alpha$ (π)	Vk	Vh	P	V	S	v
0	0	1,57079633	1,06029E-06	0	106,7795531	7,06029E-06	0	1,11
30	0,52359878	2,09439511	1,59043E-06	1,42052E-07	95,71043312	7,73248E-06	0,00080385	1,22
45	0,78539816	2,35619449	1,81002E-06	3,10551E-07	91,09736883	8,12058E-06	0,00175736	1,28
60	1,04719755	2,61799388	1,97852E-06	5,30144E-07	87,34010981	8,50867E-06	0,003	1,34
90	1,57079633	3,14159266	2,12058E-06	1,06029E-06	82,63969148	9,18086E-06	0,006	1,45
120	2,0943951	3,66519143	1,97852E-06	1,59043E-06	81,78370973	9,56895E-06	0,009	1,51
135	2,35619449	3,92699082	1,81002E-06	1,81002E-06	82,79958772	9,62005E-06	0,01024264	1,52
150	2,61799388	4,18879021	1,59043E-06	1,97852E-06	84,77801749	9,56895E-06	0,01119615	1,51
180	3,14159265	4,71238898	1,06029E-06	2,12058E-06	91,56796292	9,18086E-06	0,012	1,45
210	3,66519143	5,23598776	5,30144E-07	1,97852E-06	101,6491846	8,50867E-06	0,01119615	1,34
225	3,92699082	5,49778715	3,10551E-07	1,81002E-06	107,4266918	8,12058E-06	0,01024264	1,28
240	4,1887902	5,75958653	1,42052E-07	1,59043E-06	113,1676734	7,73248E-06	0,009	1,22
270	4,71238898	6,28318531	0	1,06029E-06	122,1714835	7,06029E-06	0,006	1,11
300	5,23598776	6,80678409	1,42052E-07	5,30144E-07	124,0915716	6,6722E-06	0,003	1,05
315	5,49778714	7,06858347	3,10551E-07	3,10551E-07	121,8236888	6,6211E-06	0,00175736	1,05
330	5,75958653	7,33038286	5,30144E-07	1,42052E-07	117,7796869	6,6722E-06	0,00080385	1,05
360	6,28318531	7,85398164	1,06029E-06	0	106,7795531	7,06029E-06	0	1,11

La tabla 3 muestra los resultados agregando cada una de las variables y utilizando como parámetro el periodo entre 0 y 2π . Inicialmente se ingresan los valores de los volúmenes de compresión y de expansión y se obtiene el volumen total en cada uno de los grados del sistema, al analizar el volumen total seleccionamos los ángulos α y $\Delta\alpha$ correspondiente al volumen total máximo, para tomar en ese punto la presión mínima, correspondiente a la presión atmosférica, para así elevar la presión en el punto más bajo del volumen total. De esta forma hallamos la masa del gas y la remplazamos en la tabla de variables para obtener los datos reales del sistema.

Quedando la presión atmosférica en el ciclo 1 del sistema se observa en la gráfica 12 la presión del ciclo 3 es la más alta con un valor de 124 kPa a una temperatura de 750 K.

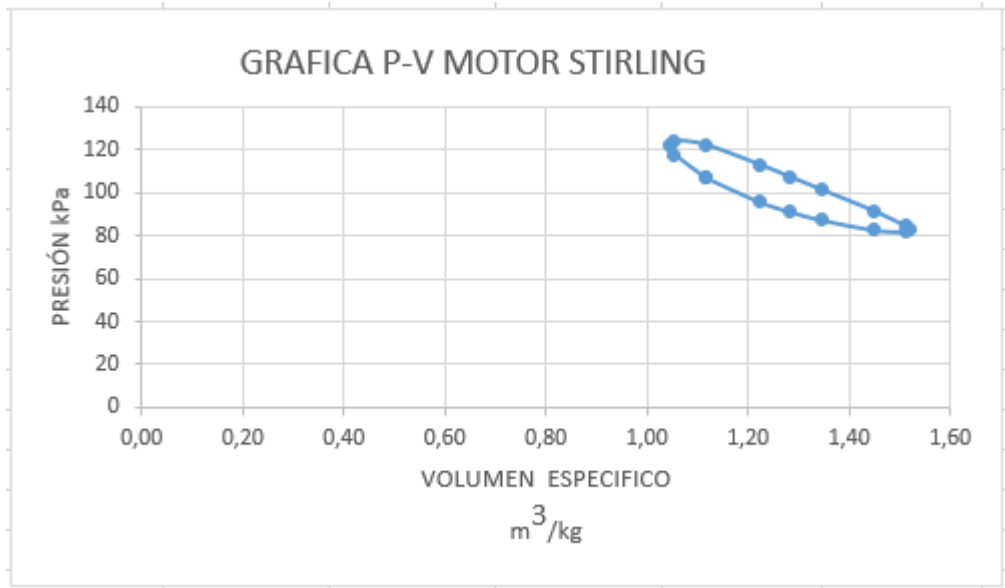


Figura 12. Grafica P-v

En la figura 12, se puede apreciar el ciclo P vs v del motor Stirling a fabricar y con base a los parámetros anteriores se construye cada una de las piezas para ensamblar el motor Stirling, a continuación, se presentan las cotas del prototipo a construir:

4.3.1 Cota superior

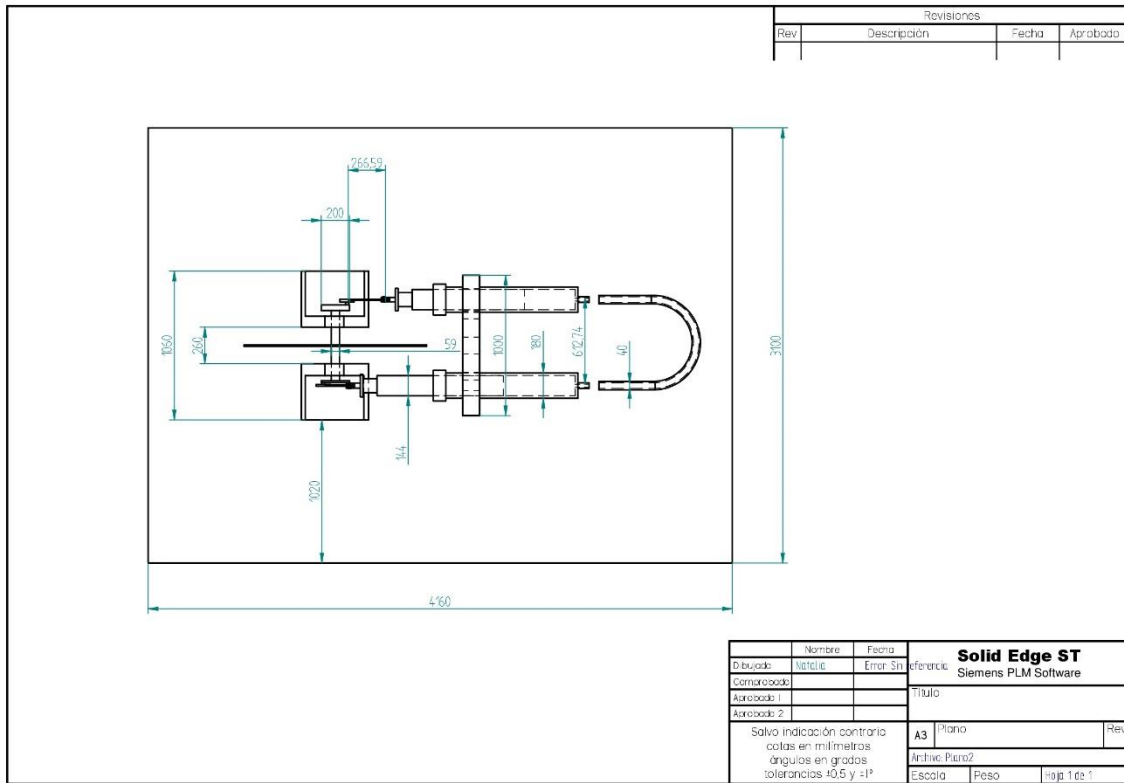


Figura 13. Cota superior motor Stirling

4.3.2 Cota frontal

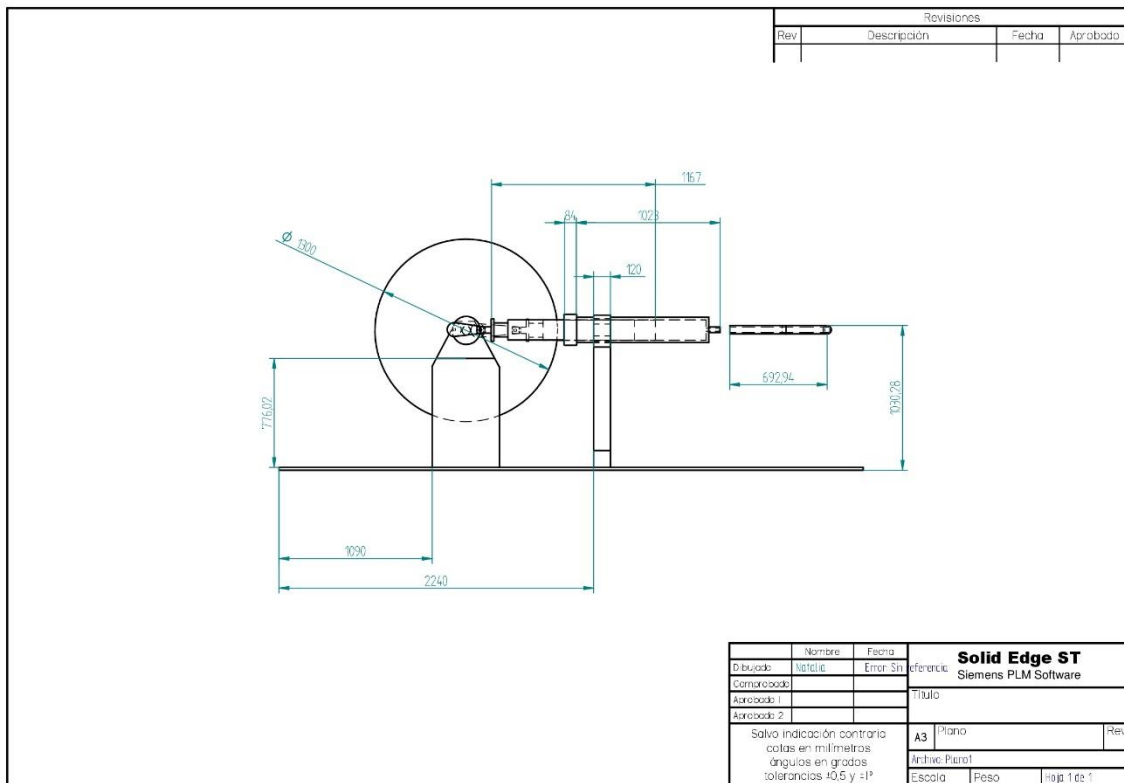


Figura 14. Cota frontal del motor Stirling

4.3.3 Cota lateral derecha

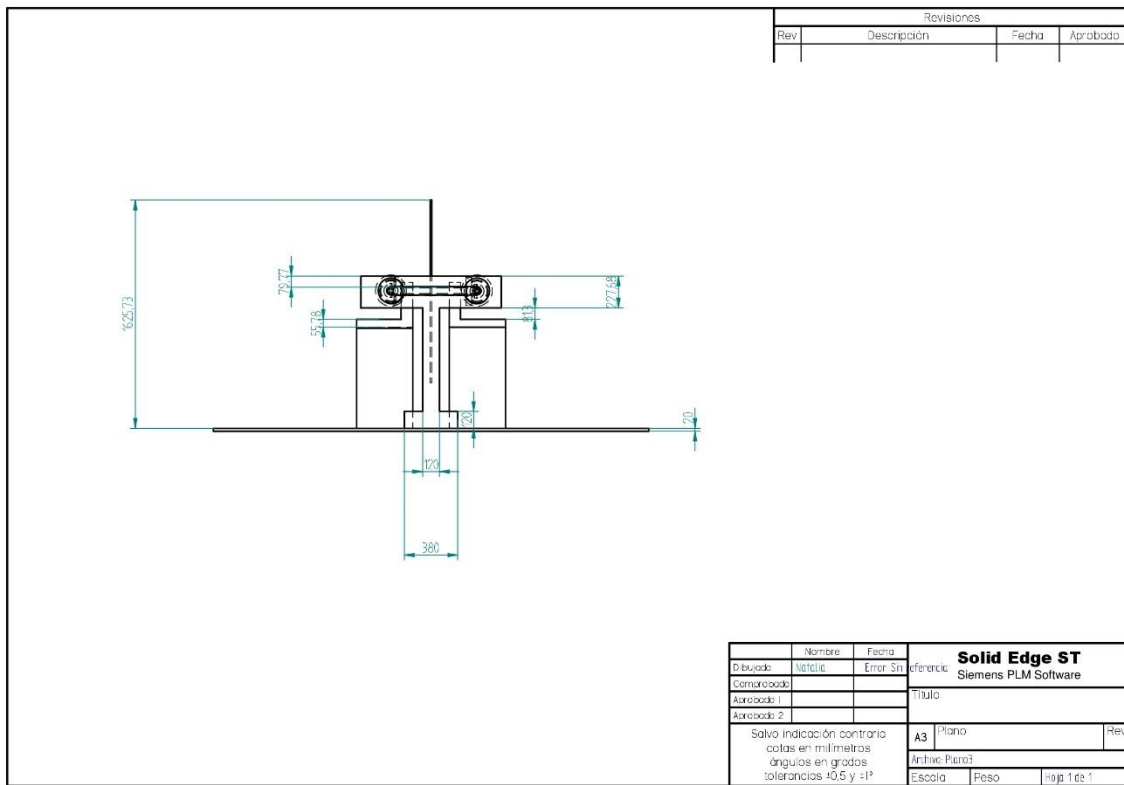


Figura 15. Cota lateral derecha del motor Stirling

4.3.4 Isométrico del Motor Stirling a construir

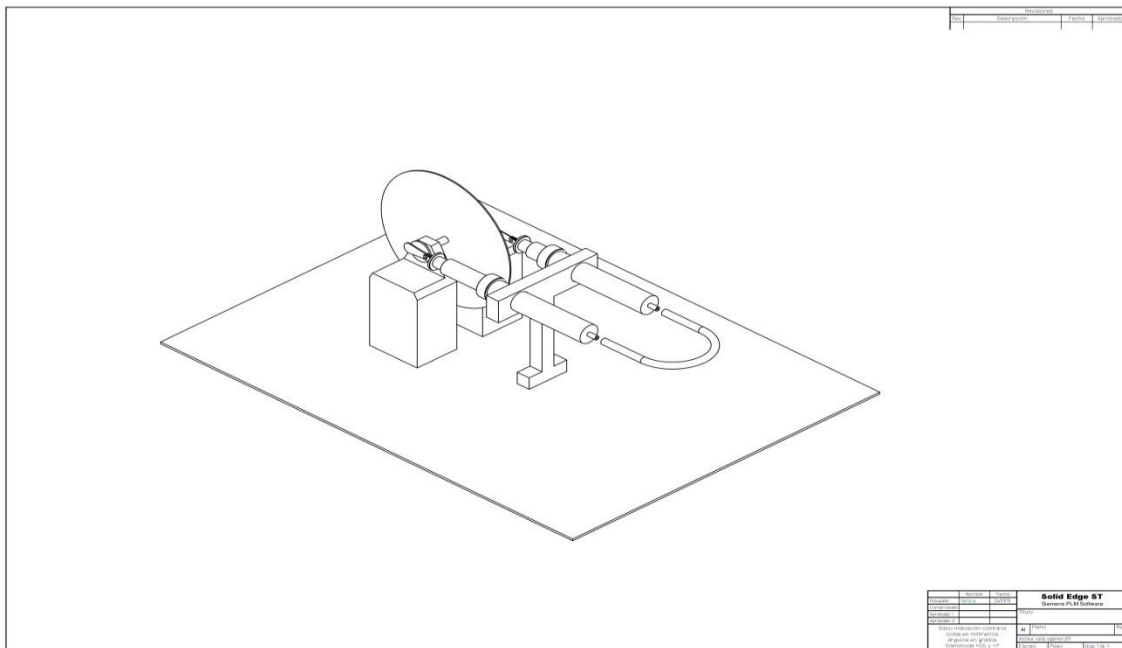


Figura 16. Isométrico del motor Stirling

4.3.5 Diseño del motor Stirling

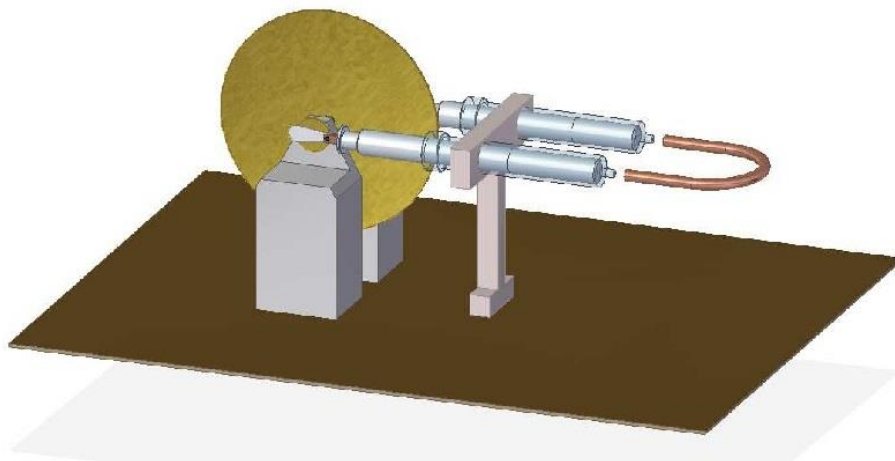


Figura 17. Diseño del motor Stirling

4.3.6. Construcción del prototipo en el laboratorio



Figura 18. Mecanizado de árbol de levas

En la figura 18 se observa el maquinado del cigüeñal del motor. Este lleva una volante para evidenciar la velocidad y para iniciar el arranque del motor. Este cigüeñal está conformado por un eje que en la mitad lleva la volante, a ambos lados de esta estará sujeto por dos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

chumaceras y por último en los extremos están ubicados los cilindros o levas que son los radios del cigüeñal desfasados en 90°; estos cilindros fueron obtenidos de un VHS (Video Home System) del cabezote lector.



Figura 19. Mecanizado del cigüeñal

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la figura 19 se está maquinando la barra de conexión entre la leva y el émbolo de la jeringa, estas barras de conexión fueron extraídas de unas unidades de disco duro de computador, y adaptadas para que fueran livianas y no influyeran en el desfase del cigüeñal. Estas barras se consiguieron exactamente iguales para que los ángulos y la carrera de barrido fuera la misma en ambos pistones, estas llevan unos soportes de bujes supremamente ligeras, con una fricción mínima, que no altera el sistema.



Figura 20. Fabricación de las chumaceras

En la figura 20 se están fabricando las chumaceras que llevaran dos rodamientos sin fricción obtenidas del cabezote lector de un VHS. Estos se adaptan mediante un maquinado para luego sujetarse de un perfil de aluminio que va hacer la base del cigüeñal.



Figura 21. Ensamble del sistema mecánico

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Figura 22 se evidencia el ensamble de algunas de las partes del motor en el laboratorio de ciencias térmicas del ITM.

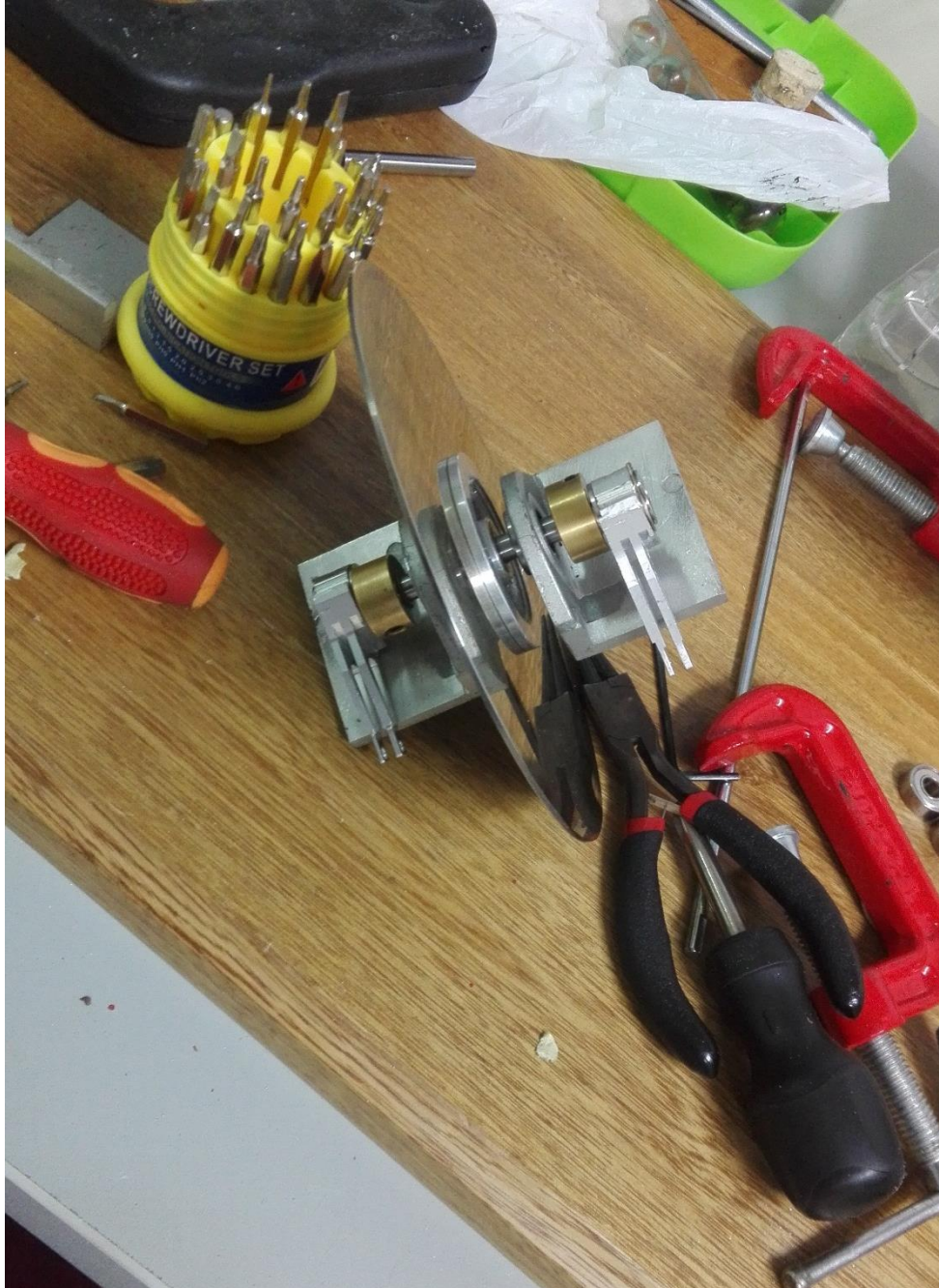


Figura 22. Sistema mecánico con volante

En la figura 23 se aprecia ya todo el sistema del cigüeñal ensamblado con las barras ubicadas con el desfase de 90°.

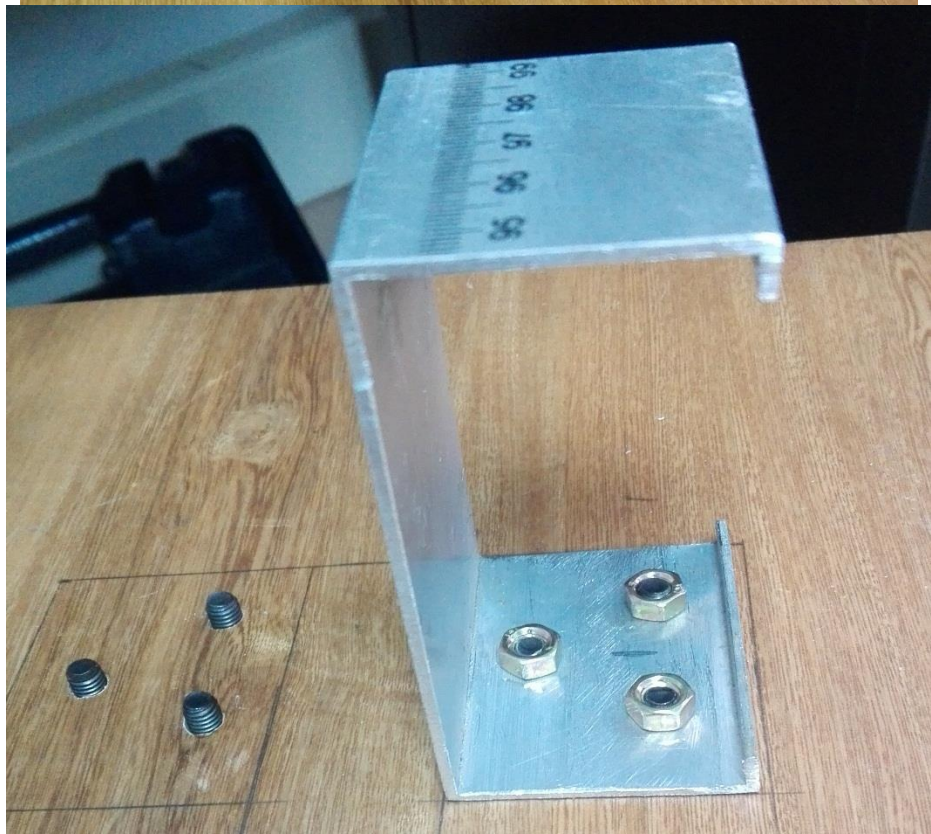


Figura 23. Ajuste del sistema mecánico a la base

Se puede apreciar de la figura 24 que cada una de las piezas y partes del motor Stirling se encuentran rigurosamente ubicadas en una posición específica para que el motor se ajuste perfectamente como lo contemplan los planos.

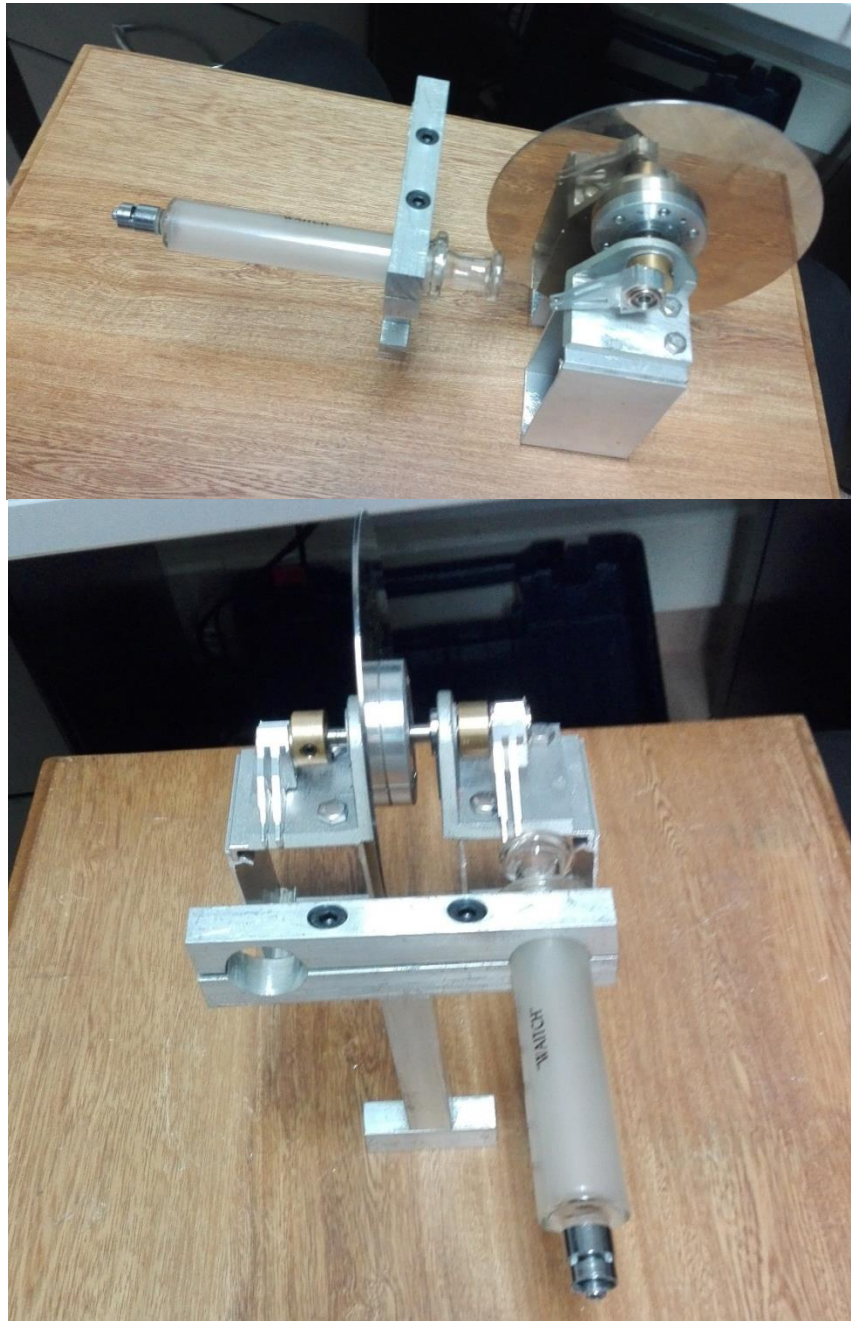


Figura 24. Adaptación de jeringas a la base

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se maquina un sujetador en aluminio, (ver figura 25) que permite sostener las jeringas con el fin de no permitir el movimiento del cilindro cuando el émbolo este realizando la expansión o compresión. Estas piezas fueron maquinadas en el laboratorio de máquinas el ITM.

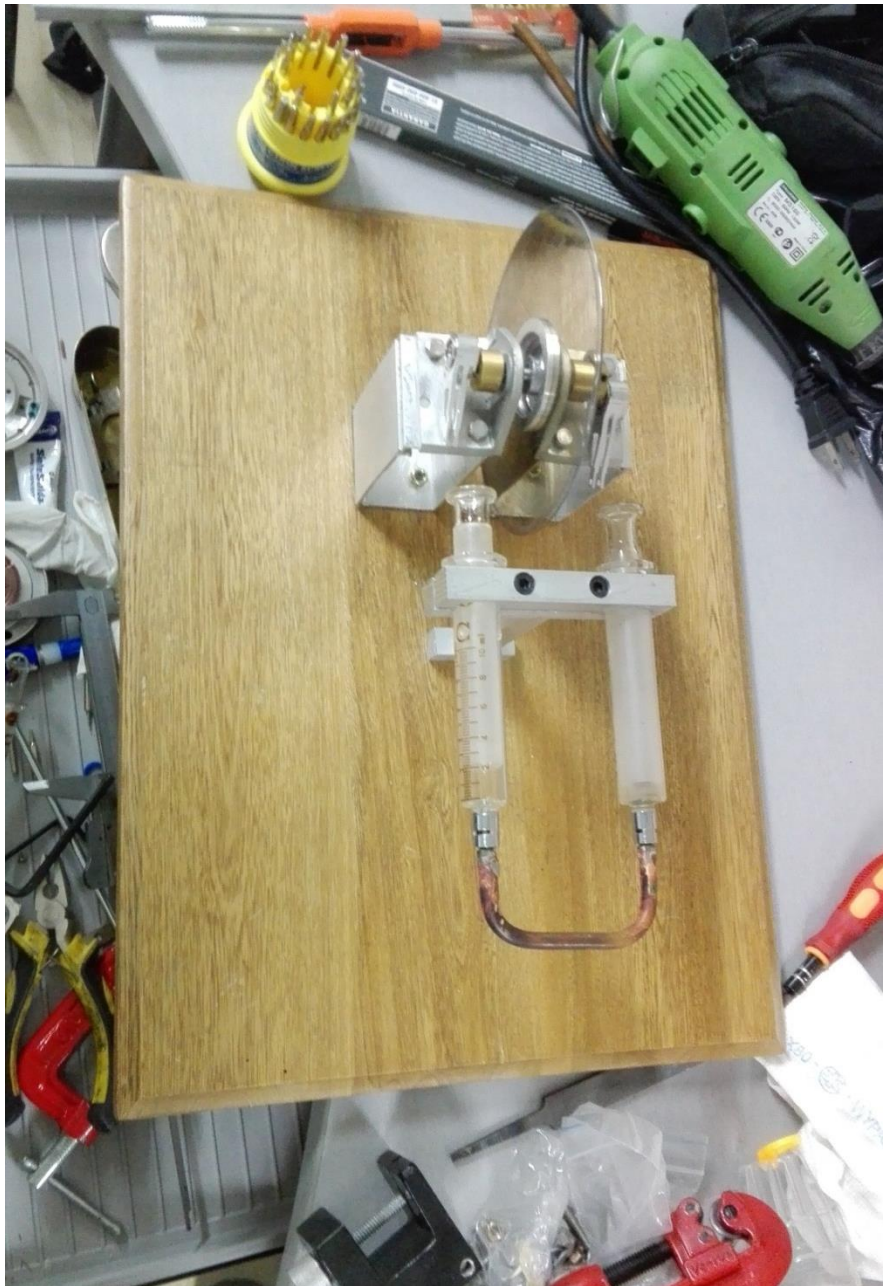


Figura 25. Adaptación del conducto intercambiador de calor

En la figura 26 se evidencia que el regenerador ya está conectado a las jeringas. Este fue fabricado con un material de cobre que es buen conductor térmico y disipa fácilmente el calor con la temperatura ambiente, este fue ajustado perfectamente a la boca de las jeringas para no permitir ningún escape de aire o de presión.

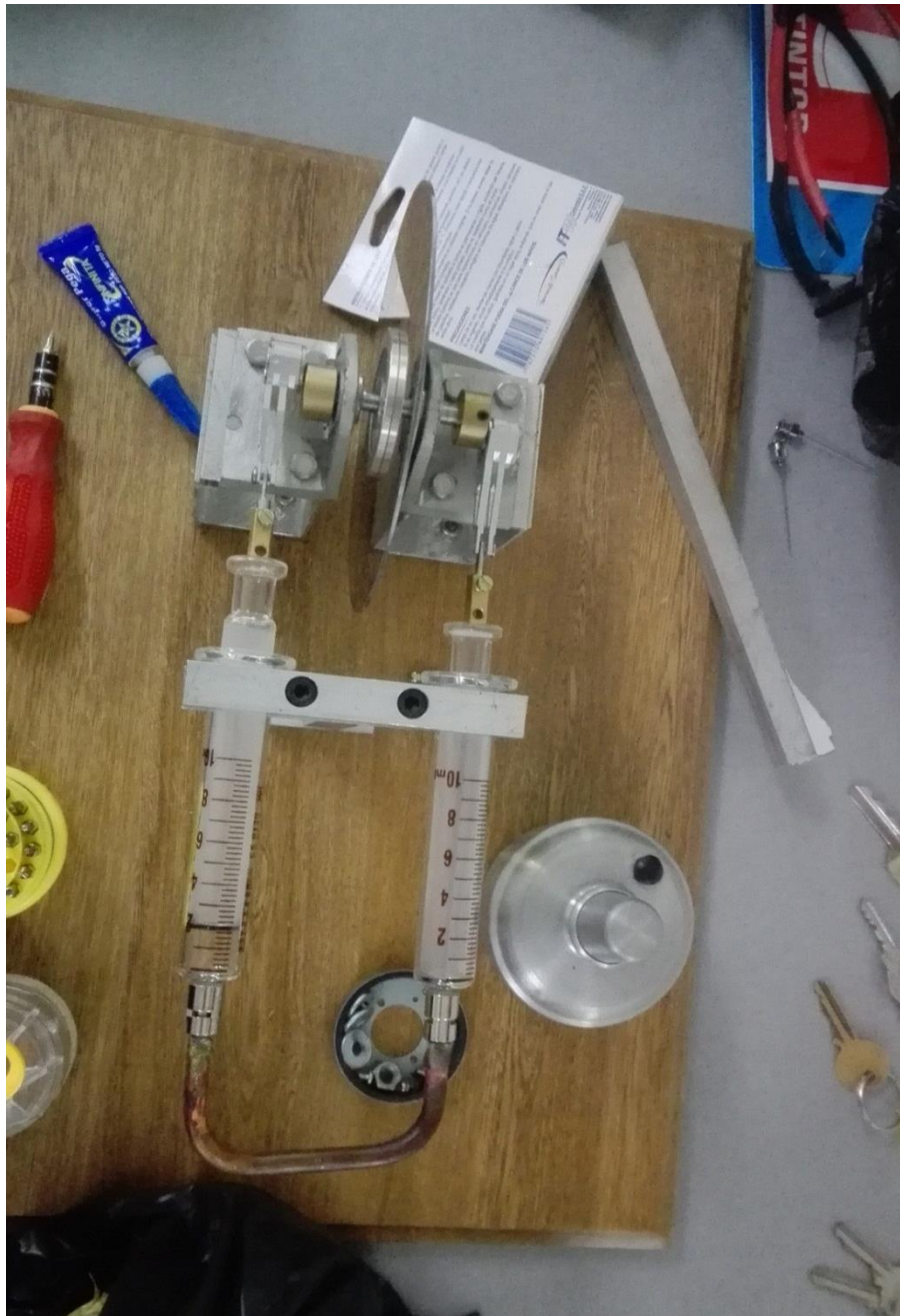


Figura 26. Conexión de los émbolos con los cigüeñales

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la figura 27 ya están ensambladas las barras de conexión con los émbolos. Esto fue posible a través de una pega epóxica donde se une el émbolo de cristal y un acople de cobre que permite ajustar la carrera de la barra de conexión.

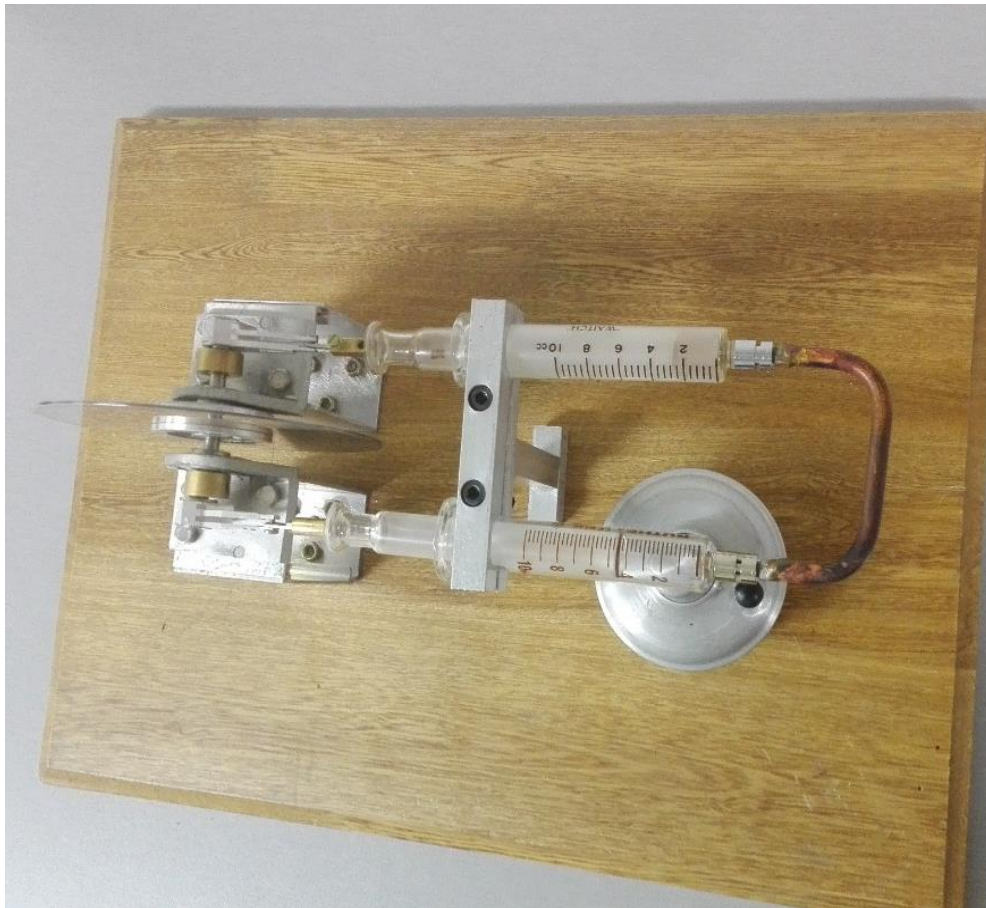


Figura 27. Finalización del proyecto

4.3.7. Comparación de los datos calculados con los experimentales

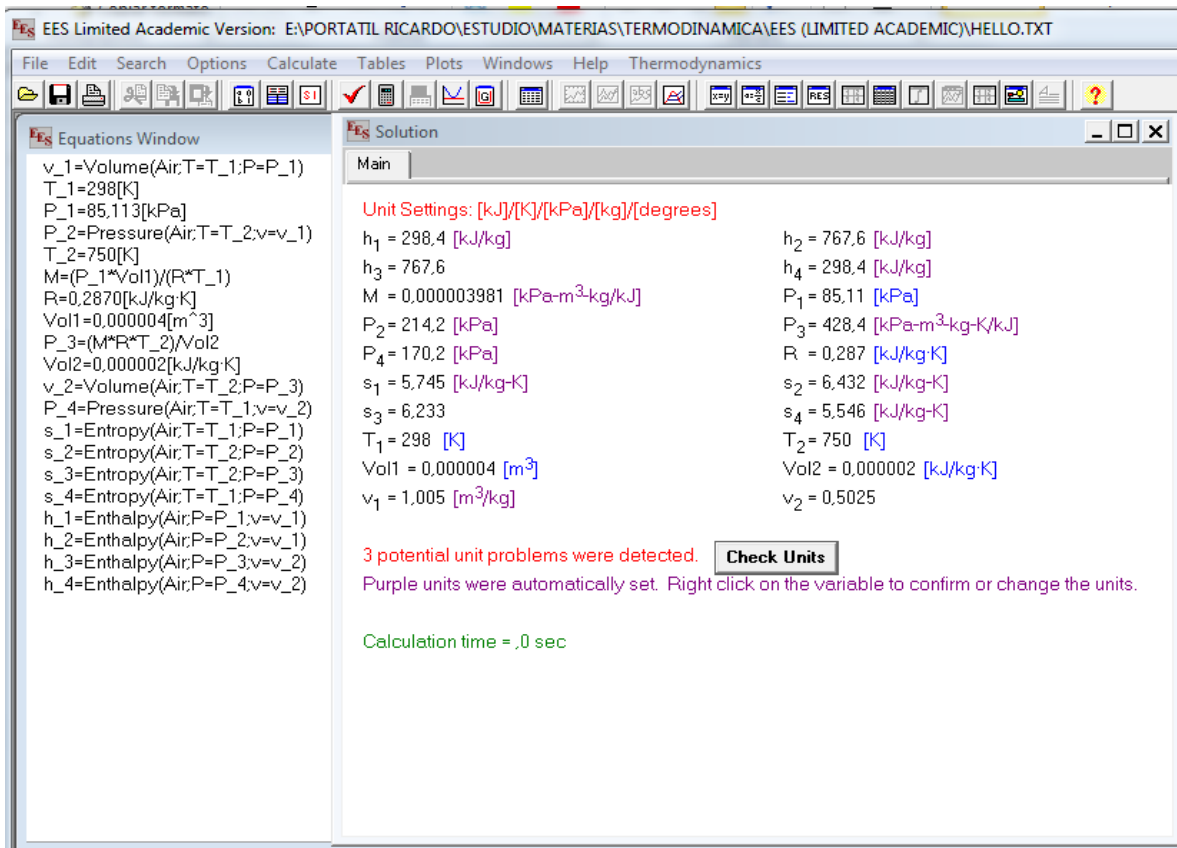
Al tomar los datos de T_{max} , T_{min} , presión atmosférica, la constante del aire como gas ideal y conociendo los volúmenes de aire muerto en las recámaras de expansión y compresión, se realiza la tabla 3., donde se puede calcular los datos científicos del motor Stirling ideal, con la ayuda del programa *EES-Engineering Equation Solver*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 4. Datos científicos en cada ciclo del motor Stirling

FASE	TEMPERATURA K	PRESION kPa	VOLUMEN ESPECIFICO m ³ /kg	ENTALPIA kJ/kg	ENTROPIA kJ/kg-K
1	298	85.11	1.005	298.4	5.745
2	750	214.2	1.005	767.6	6.432
3	750	428.4	0.5025	767.6	6.233
4	298	170.2	0.5025	298.4	5.546

En la figura 28 se encuentra el proceso mediante el cual fueron hallados los datos de la tabla 3 a través del programa EES.



The screenshot shows the EES software interface. The 'Equations Window' on the left contains the following equations:

```

v_1=Volume(Air;T=T_1;P=P_1)
T_1=298[K]
P_1=85.113[kPa]
P_2=Pressure(Air;T=T_2;v=v_1)
T_2=750[K]
M=(P_1*Vol1)/(R*T_1)
R=0.2870[kJ/kg-K]
Vol1=0.000004[m^3]
P_3=(M*R*T_2)/Vol2
Vol2=0.000002[kJ/kg-K]
v_2=Volume(Air;T=T_2;P=P_3)
P_4=Pressure(Air;T=T_1;v=v_2)
s_1=Entropy(Air;T=T_1;P=P_1)
s_2=Entropy(Air;T=T_2;P=P_2)
s_3=Entropy(Air;T=T_2;P=P_3)
s_4=Entropy(Air;T=T_1;P=P_4)
h_1=Enthalpy(Air;P=P_1;v=v_1)
h_2=Enthalpy(Air;P=P_2;v=v_1)
h_3=Enthalpy(Air;P=P_3;v=v_2)
h_4=Enthalpy(Air;P=P_4;v=v_2)

```

The 'Solution' window on the right displays the following results:

```

Unit Settings: [kJ]/[K]/[kPa]/[kg]/[degrees]
h1 = 298.4 [kJ/kg]
h2 = 767.6 [kJ/kg]
h3 = 767.6
h4 = 298.4 [kJ/kg]
M = 0.000003981 [kPa-m^3-kg/kJ]
P1 = 85.11 [kPa]
P2 = 214.2 [kPa]
P3 = 428.4 [kPa-m^3-kg-K/kJ]
P4 = 170.2 [kPa]
R = 0.287 [kJ/kg-K]
s1 = 5.745 [kJ/kg-K]
s2 = 6.432 [kJ/kg-K]
s3 = 6.233
s4 = 5.546 [kJ/kg-K]
T1 = 298 [K]
T2 = 750 [K]
Vol1 = 0.000004 [m^3]
Vol2 = 0.000002 [kJ/kg-K]
v1 = 1.005 [m^3/kg]
v2 = 0.5025

```

Below the results, a message states: "3 potential unit problems were detected. Check Units. Purple units were automatically set. Right click on the variable to confirm or change the units." The calculation time is shown as ".0 sec".

Figura 28. Tabla de algoritmos del programa EES

Con estos datos se realizaron las gráficas P-h, P-v, T-s y T-v para analizarlos con los datos experimentales y para sacar las respectivas conclusiones.

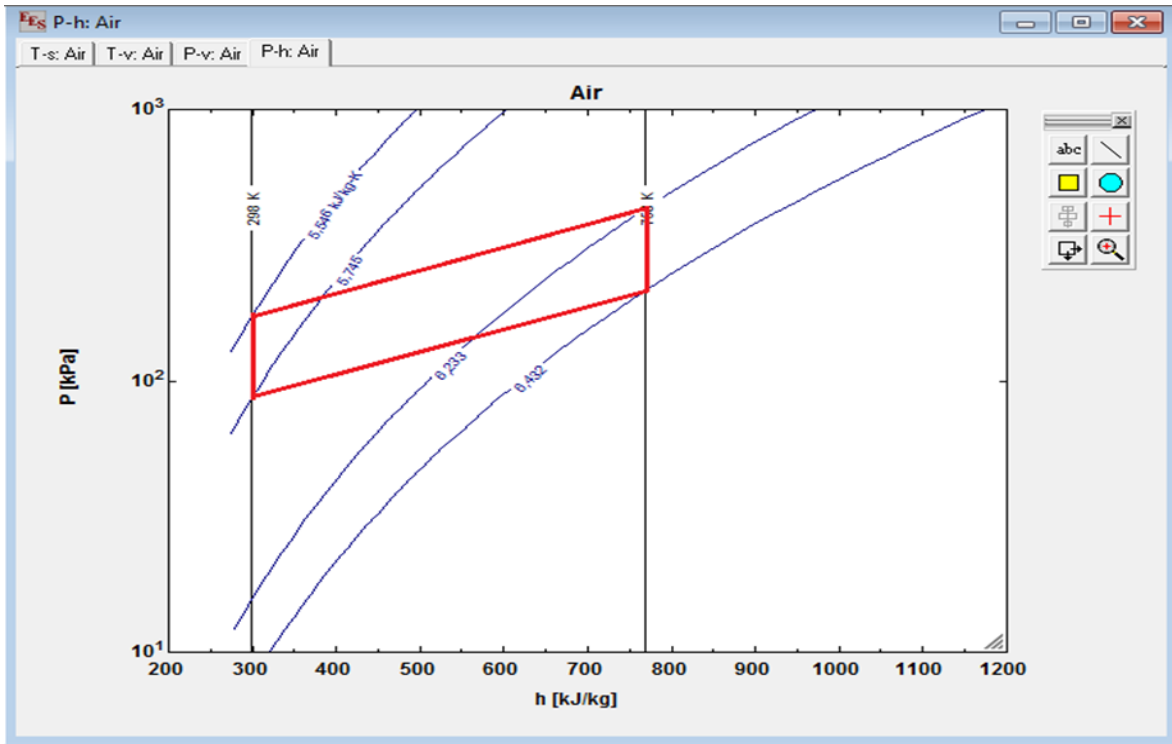


Figura 29. Grafica de presión vs entalpia

Con la figura 28, podemos analizar que este ciclo Stirling en los estados 1-4 y 2-3 tiene la misma entropía y presiones diferentes en cada ciclo, a medida que esta aumenta, también aumenta la presión del sistema.

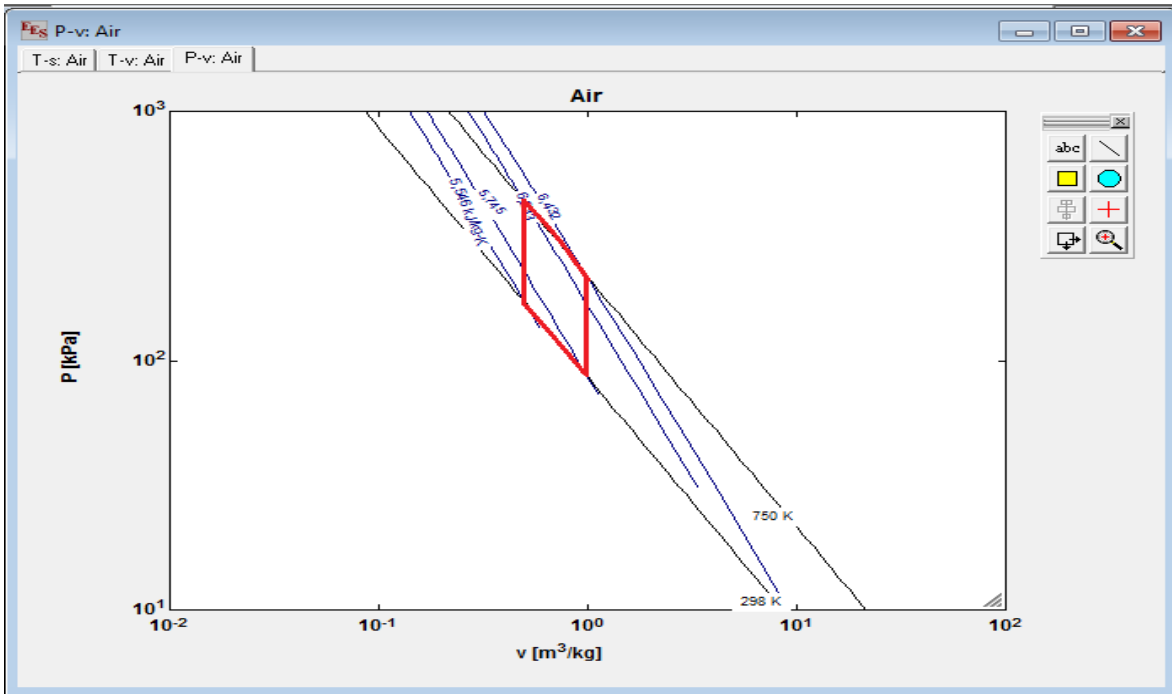


Figura 30. Grafica de temperatura vs volumen específico

Al comparar la figura 12 con la 30 vemos que cumplen los mismos principios termodinámicos pero las presiones varían considerablemente a pesar que tienen las mismas temperaturas y partiendo desde el mismo punto donde la presión es la atmosférica y la temperatura ambiente son las mismas, esta grafica con una presión de 428 kPa y para el experimental es de 124 kPa. Esta diferencia de igual manera altera el volumen específico del sistema siendo para el experimental más bajo.

La razón de esta diferencia puede estar dada por que en el cálculo de los ciclos no es tomada en cuenta la masa de los volúmenes muertos y la del regenerador, alterando los resultados obtenidos.

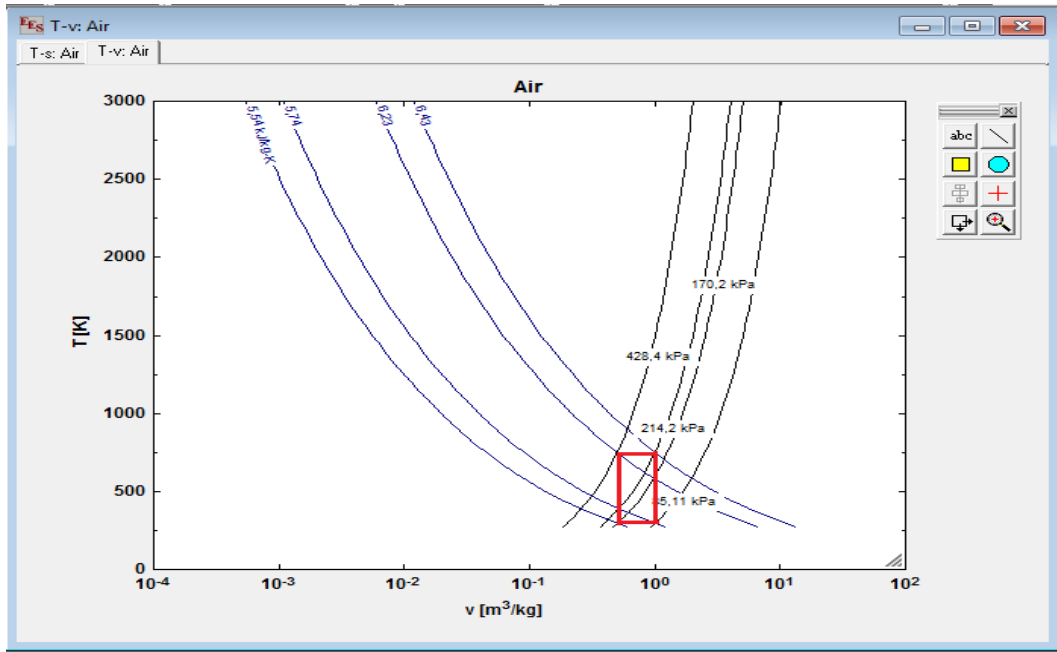


Figura 31. Grafica de temperatura vs volumen

De la figura 31 se tiene que cuando aumenta la temperatura o disminuye el volumen siempre permanece constante, y cuando el volumen específico aumenta o disminuye la temperatura permanece siempre constante.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.4 Guía de laboratorio

1. IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA

Nombre de la guía:	Identificación de las partes del motor Stirling y calentamiento del aire en reposo.
Código de la guía (No.):	001
Taller(es) o Laboratorio(s) aplicable(s):	Laboratorio de ciencias térmicas
Tiempo de trabajo práctico estimado:	2 horas
Asignatura(s) aplicable(s):	Termodinámica, transferencia de calor
Programa(s) Académico(s) / Facultad(es):	Ingeniería Electromecánica / Facultad de Ingenierías

COMPETENCIAS	CONTENIDO TEMÁTICO	INDICADOR DE LOGRO
<p>Aplica los conocimientos para realizar el análisis termodinámico acerca del funcionamiento del motor Stirling con base en los datos experimentales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de las partes del motor Stirling. • Funcionamiento del motor Stirling con base al análisis termodinámico. • Cálculo del coeficiente de desempeño del motor Stirling. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identifica los componentes básicos que conforman un motor Stirling. • Analiza el funcionamiento del ciclo termodinámico que realiza un motor Stirling, la cual calienta el aire que se encuentra en reposo. • Define el coeficiente de desempeño que tiene el motor Stirling.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

En un ciclo de Stirling con regeneración, todo el calor se absorbe a la temperatura del foco caliente, T_H , y todo el calor se cede a la temperatura del foco frío, T_L . Por ello, su rendimiento es el mismo que el de una máquina de Carnot que opere entre las temperaturas extremas.

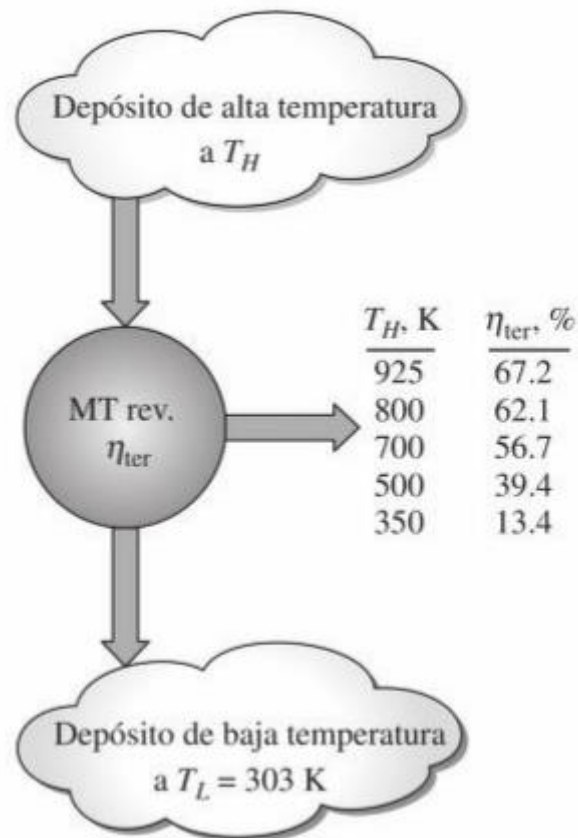


Figura 1. Flujo de energías en un sistema reversible del motor Stirling (Cengel A. Yunus, 2012).

Para que estos sistemas funcionen debe haber un diferencial de temperaturas, por lo que, haciendo el balance de energía del sistema en general se tiene las siguientes ecuaciones:

$$W_{neto} + Q_L = Q_H$$

$$\left(\frac{Q_L}{Q_H}\right)_{rev} = \frac{T_L}{T_H}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\eta_{tér} = \frac{W_{neto}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Dónde:

- Q_H : Calor suministrado por el depósito de alta temperatura
 Q_L : Calor rechazado hacia el depósito de baja temperatura
 W_{neto} : Trabajo útil suministrado por el sistema
 $\eta_{tér}$: Eficiencia térmica del sistema.

El motor Stirling tiene el mismo funcionamiento que la bomba de calor de Carnot y el coeficiente de desempeño de la bomba de calor reversible es igual a:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{neto\ entrada}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

El ciclo Stirling esta compuesto por cuatro procesos totalmente reversibles que son realizados por un desplazador y un pistón en el caso de un tipo beta y de dos pistones uno de recámara fría y otro de caliente en el tipo alfa, los cuales, están unidos por un regenerador y un cigüeñal de modo que formen un ciclo termodinámico cerrado para que el proceso se realice de forma cíclica.

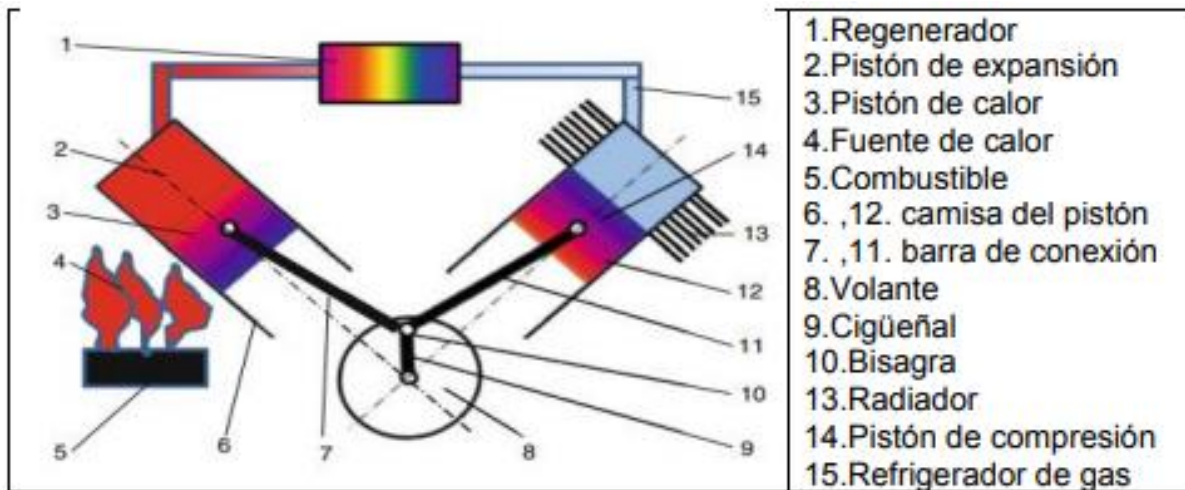


Figura 2. Esquema de un ciclo Stirling. (Trujillo D. 2017)

Los cuatro procesos irreversibles son:

- 1-2 expansión a $T = \text{constante}$ (adición de calor de una fuente externa)
- 2-3 regeneración a $v = \text{constante}$ (transferencia de calor interna desde el fluido de trabajo hacia el regenerador)
- 3-4 compresión a $T = \text{constante}$ (rechazo de calor a un sumidero externo)
- 4-1 regeneración a $v = \text{constante}$ (nuevamente, transferencia de calor interna desde un regenerador hacia el fluido de trabajo). (Cengel A. Yunus, 2012).

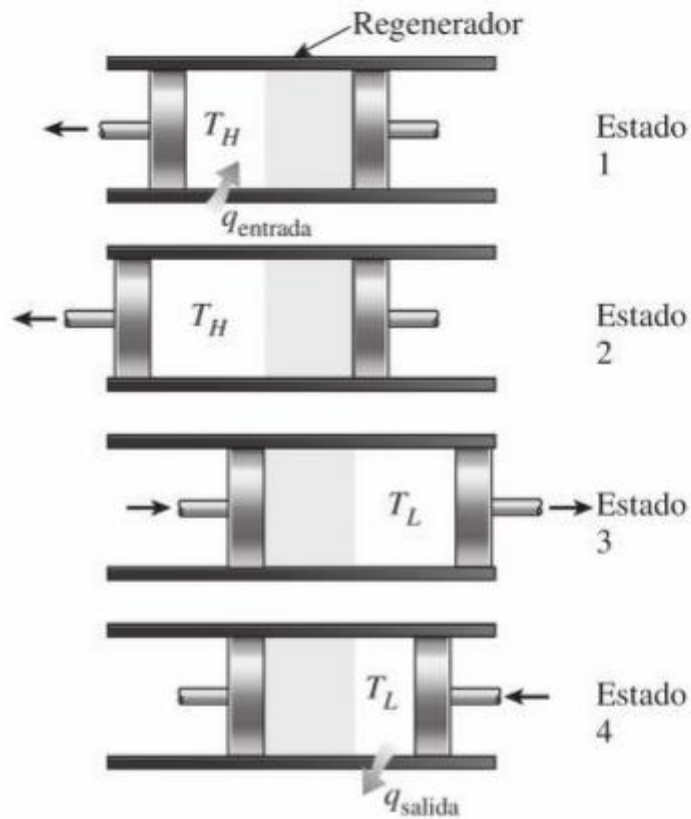


Figura 3. Ejecución del ciclo Stirling. (Cengel A. Yunus, 2012).

Los elementos principales son:

- Cigüeñal
- Regenerador
- Pistón de recámara fría
- Pistón de recámara caliente

La siguiente gráfica muestra en los diagramas **T-s** y **P-v**, cómo es el comportamiento ideal de un ciclo termodinámico de un sistema Stirling.

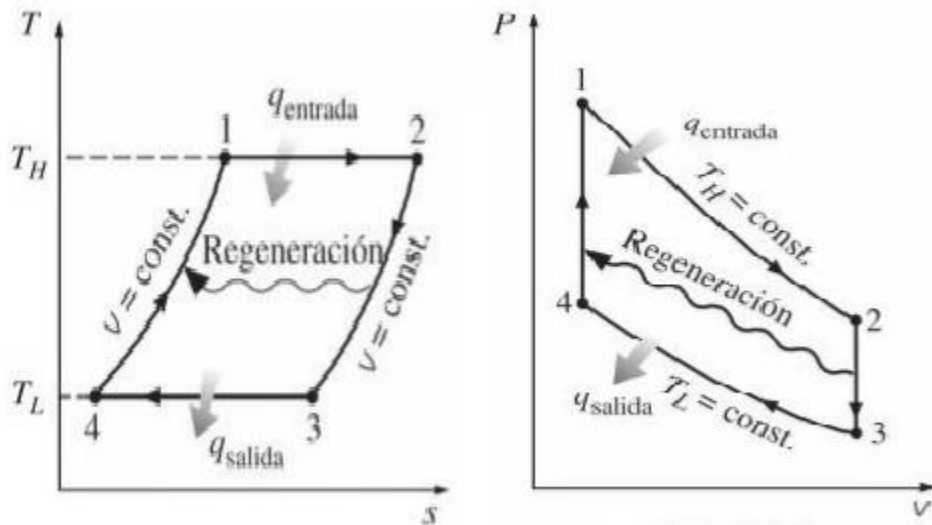


Figura 4. Diagrama T-s (izquierda) y diagrama P-v (derecha) de un ciclo Stirling. (Cengel A. Yunus, 2012).

Para calcular una de las presiones diferente a la atmosférica es necesario determinar la masa del aire que reposa en el sistema, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_1 * Vol_1 = M * R * T_1$$

- P₁= presión del ciclo 1
- Vol₁=volumen de una de las recamaras
- M= masa del gas ideal (aire)
- R=constante del gas ideal
- T₁=temperatura del ciclo 1

3. OBJETIVO(S)

- Identificar los componentes básicos que conforman un sistema Stirling.
- Analizar el funcionamiento del ciclo termodinámico que realiza un motor Stirling con base en los datos experimentales, para realizar el calentamiento del aire.
- Determinar la eficiencia térmica del motor Stirling.
- Determinar el coeficiente de desempeño que tiene el motor Stirling.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RECURSOS REQUERIDOS

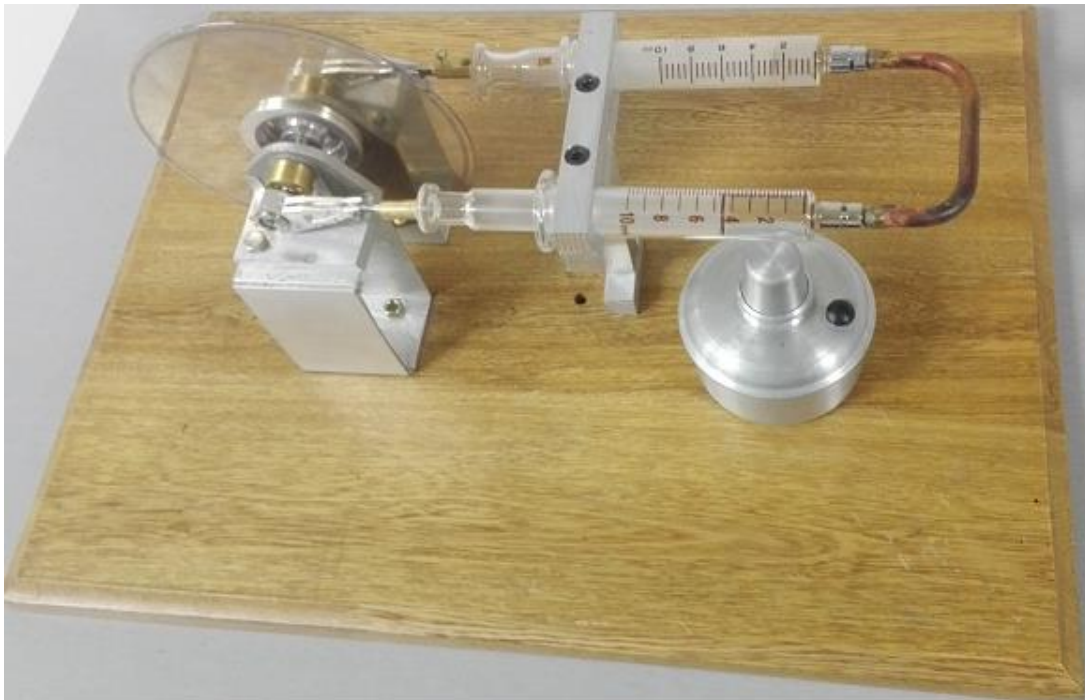
- Motor Stirling
- Medidor de temperatura
- Tabla termodinámica A-1, A-17
- Computador con el software EES

5. PROCEDIMIENTO O METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

5.1 Identificación de los componentes

Identificar las partes básicas que realizan el ciclo termodinámico de un sistema Stirling.

Identificar cuáles son los depósitos térmicos de alta y baja temperatura que funcionan en el motor Stirling.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.2 Instrucciones de funcionamiento del motor Stirling

Verifique que las jeringas no estén agrietadas, el tubo de cobre conductor del aire no este desconectado, las bielas y el cigüeñal estén bien conectados, que este el mechero y que tenga el alcohol industrial.

5.3 Advertencias de uso

Verifique que el mechero esté funcionando solo con alcohol industrial, ya que con otros combustibles el cristal de las jeringas puede verse afectado, recuerde que se estará trabajando con temperaturas por encima de los 600°C, por lo tanto se sugiere el uso de gafas, guantes y bata de laboratorio. Evite tocar las partes expuestas al calor, al menos 5 o 10 minutos después de retirar el mechero.

No se recomienda exponer por más de 10 minutos el cristal de las jeringas ya que puede sufrir deformaciones en su estructura o fracturas de la misma.

Evite lubricar o echar cualquier tipo de sustancia en el émbolo de las jeringas.

Verifique antes de someter el sistema al calor que la volante gire normalmente.

5.4 Funcionamiento

Encienda el mechero y ubique en la parte superior de una de las jeringas, espere entre 30 o 40 segundos a que el sistema gane energía e induzca el arranque manualmente haciendo girar la volante, en caso que esta se detenga, quiere decir que aún no alcanza la temperatura adecuada, espere 10 segundo más para que repita la acción.

Una vez este en movimiento el motor se toma la temperatura superficial de ambas jeringas y del tubo de cobre.

5.5 Toma de datos

Para comenzar primero se toma la temperatura ambiente y la del mechero, la presión de la recámara fría antes del arranque del motor que es igual a la atmosférica, y el gas ideal a utilizar es el aire.

Tabla 1. Toma de datos de la práctica y cálculos

FASE	TEMPERATURA K	PRESION kPa	VOLUMEN ESPECIFICO m ³ /kg	ENTALPIA kJ/kg	ENTROPIA kJ/kg-K
1					
2					
3					
4					

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ejercicios teóricos

- Determinar la eficiencia térmica de un sistema Stirling que opera con hidrogeno Y con un $T_H=1000K$

Determine:

- ¿cuáles son las presiones en cada uno de los ciclos?
- realice las gráficas P-v y T-s en el software EES

- Si la temperatura ambiente es de $40^\circ C$ y la presión en el ciclo 3 es igual a 500 kPa

- determine la temperatura máxima del sistema
- determine los dos volúmenes específicos
- determine las entropías de cada ciclo

6. PARÁMETROS PARA ELABORACIÓN DEL INFORME

- Entregar las tablas completadas con los datos experimentales.
- Elaborar las gráficas T-s y P-h del ciclo termodinámico del motor Stirling (Usar software EES).
- Resolver los ejercicios teóricos propuestos.
- Determinar las causas de error y conclusiones.

7. BIBLIOGRAFÍA

Trujillo D. (2017), Modelamiento matemático de un sistema concentración solar con motor Stirling en Colombia, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.

Cengel A. Yunus, (2012), Termodinámica. México: McGraw-Hill, Ed.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Con la colaboración del laboratorio de ciencias térmicas de la sede de fraternidad se culminó con éxito el desarrollo del motor Stirling, con este los estudiantes pueden realizar prácticas de laboratorio y evidenciar los procesos termodinámicos y físicos de este.
- En la construcción de los motores Stirling uno de los factores más importantes es mantener el sistema libre de fugas del gas ya que no se completa el ciclo debido a las pérdidas de presión
- Los sistemas Stirling no deben tener mucha fricción en los pistones y rodamientos, esto afecta directamente la fuerza y la potencia alejándose de los resultados esperados. Uno de los factores que normalmente no es tenido en cuenta es la humedad del aire que al pasar por la recámara de compresión, las partículas cambian de estado a líquido, elevando la fricción entre el émbolo y el cilindro.
- El material del pistón debe soportar altas temperaturas durante varios periodos de tiempo, porque el utilizado en este prototipo, al ser sometido a temperaturas que sobrepasan los 700 °C deforma considerablemente la estructura ocasionando fracturas que dañan el motor.
- La fuerza del motor Stirling se va disminuyendo a medida que el sistema va ganando velocidad y a medida que la cámara de compresión gana temperatura empieza a disminuir el intercambio de calor, desacelerando el motor. Es importante que el regenerador logre disipar lo suficiente y mantener a bajas temperaturas la recámara de compresión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- También se dejan todas las memorias con el paso a paso de la construcción de estos motores. En ella están los videos, tutoriales y demás información que se requiera para elaborar otro prototipo o bien sea para emplear el que queda en el laboratorio.
- Por ultimo está disponible la guía de laboratorio con la cual se podrán realizar las prácticas con el motor Stirling. Ahí se encuentran como calcular las presiones, temperaturas, volumen, entalpías y entropías en cada una de las fases del motor, utilizando el programa EES.

5.2 Recomendaciones

- En lo posible tratar de utilizar pistones más grandes, en materiales resistentes a altas temperaturas y que sean totalmente herméticos, que el intercambiador de calor no sea tan largo y tenga un buen disipador.
- En los casos en que el gas empleado en el sistema Stirling sea aire, este debe ser precalentado y pasado por una unidad de mantenimiento que elimine las partículas de agua, que puedan afectar el funcionamiento.
- Ensayar otro tipo de fuentes de calor como las residuales o la solar para no seguir dependiendo de los combustibles fósiles.

5.3 Trabajo futuro

- Llevar el motor Stirling a aquellos hogares distantes de las grandes ciudades que tienen pésimas condiciones energéticas como la guajira y que tienen altas temperaturas solares para convertir toda esa temperatura en energía a través de estos motores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Cardona J. y Velásquez H. (2016), Semillero de la Facultad de Minas integrado por estudiantes y docentes creó un prototipo que genera 200 vatios, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Castillo, J., Rojas, V., Martínez, J. (2017), Revista Politécnica, Determinación del Torque y Potencia de un Motor de Combustión Interna a Gasolina Mediante el Uso de Bujía con Sensor de Presión Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático, Volumen 39
- Chávez, F. y Orquera, D. (2012), Modelamiento energético y mecánico de un motor Stirling tipo beta para generación de 70 We para el DECEM-UGI, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolqui, Ecuador
- Fano, M., (1997), Aplicación de la teoría de semejanza a los motores de ciclo Stirling, tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Departamento de Física, Asturias, España.
- Fuquen D. y Niño J. (2015), Aprovechamiento de energía térmica con motores Stirling, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- García J. y París L. (2011), Diseño de un sistema prototipo de conversión de energía solar en potencia mecánica compuesto por un concentrador solar y un motor Stirling, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
- Gurstelle, W., (2006), Two-can Stirling engine, Make, Volumen 07, Paginas 90-101.
- Hernández, M., y Sánchez, J., (2013), Diseño y prototipo de un motor Stirling, tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México D.F., México.
- Howell, J., Principios De Termodinámica para Ingenieros. 2013. ISBN 9788578110796
- Méndez J. y Orjuela J. (2017), Investigación documental de simulaciones y aplicaciones de motores Stirling, Institución Universitaria los Libertadores, Bogotá, Colombia
- Mendoza S., Vidal J., Melian V., Silva E. y Lopez Y., (2014), Proyección de un Sistema Dish/Stirling para Generación Distribuida, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Morales, J., (2008), Análisis Termodinámico de un Motor de ciclo Stirling, tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería Mecánica y eléctrica, Ciudad de México, México.

Tie Li, DaWei Tang, Zhigang Li, Jinglong Du, Tian Zhou, Yu Jia, (2012), Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro-CHP system, Applied Thermal Engineering, Volumes 33–34, Pages 119-123.

Trujillo D. (2017), Modelamiento matemático de un sistema concentración solar con motor Stirling en Colombia, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.

Varela, A., (2014), Estudio y modelización de un motor Stirling, tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Mecánica de Fluidos, Barcelona, España.


Cengel A. Yunus, (2012), Termodinámica. México: McGraw-Hill, Ed.

Zegarra F. (2004), Estudio, diseño y construcción de un motor Stirling experimental tipo beta, Universidad nacional de ingeniería, Lima, Perú.

Empresas Públicas de Medellín, (2018), Condiciones atmosféricas de temperatura y presión Municipios atendidos con el servicio de gas natural, Vicepresidencia Gas, Medellín, Colombia.
https://www.epm.com.co/site/Portals/3/CONDICIONES%20ATMOSFERICAS/Condiciones%20Atmosf%C3%A9ricas_Municipios%20Antioquia_25052018.pdf

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Ricardo Franco



Se entrega informe final para ser revisado por segunda vez

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: Marzo 7 de 2019

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

ACEPTADO _____ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____