Universidad Nacional de Loja

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA DE ELECTROMECÁNICA

TÍTULO:

"DISEÑO, MODELACIÓN MATEMÁTICA Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR STIRLING GAMMA"

Tesis de Grado previa la Obtención del Título de Ingeniero Electromecánico

AUTOR: Nixon Eduardo Gonzaga Jaramillo

DIRECTOR DE TESIS: Ing. Gonzalo Ramiro Riofrío Cruz

INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

LOJA – ECUADOR

2012

NG

CERTIFICACIÓN

Ing. Gonzalo Ramiro Riofrío Cruz

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **"DISEÑO, MODELACIÓN MATEMÁTICA Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR STIRLING GAMMA"**, previa la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por el señor egresado: **Nixon Eduardo Gonzaga Jaramillo**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 5 de Diciembre de 2012

_____

Ing. Gonzalo Ramiro Riofrío Cruz

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La investigación, análisis y conclusiones del presente trabajo de tesis, les corresponden exclusivamente a su autor y el patrimonio intelectual a la Universidad Nacional de Loja. Autorizamos al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables y por ende a la carrera de Ingeniería Electromecánica, hacer uso del presente documento en lo conveniente.

.

_____

Nixon Eduardo Gonzaga Jaramillo

Egdo. Ingeniería Electromecánica

PENSAMIENTO

"Todo lo que somos es el resultado de lo que hemos pensado; está fundado en nuestros pensamientos y está hecho de nuestros pensamientos" - Dhammapada

"El ignorante afirma, el sabio
duda y reflexiona" - Aristóteles

"Serás lo que debas ser o no serás nada"
San Martín

"No estoy de acuerdo con lo que dices,
pero hasta con la vida defenderé el
derecho que tienes de decir lo que
piensas" - Voltaire

"El que no posee el don de maravillarse ni de entusiasmarse más le valdría estar muerto, porque sus ojos están cerrados"
Albert Einstein

"La educación es el pasaporte hacia
el futuro, el mañana pertenece a aquellos

que se preparan para él en el día de hoy"

Malcolm X

"Tu peor enemigo no te puede dañar tanto como tus propios pensamientos. Ni tu padre, ni tu madre, ni tu amigo más querido, te pueden ayudar tanto como tu propia mente disciplinada." Dhammapada

"Es fácil ver las faltas de los demás,

pero ¡ qué difícil es ver la nuestras propias!

Exhibimos las faltas de los demás como el

viento esparce la paja, mientras ocultamos las

nuestras como el jugador tramposo esconde

sus dados." Dhammapada

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy.
Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanas y novia por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar. A mi sobrina Brigith quien ha sido y es una mi motivación, inspiración y felicidad.

"La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar". **Thomas Chalmers**

AGRADECIMIENTO

❖ Se hace preciso en estos momentos agradecer a Dios por lo que en mi vida he conseguido y por ser quien por medio de las diferentes personas que se encuentran hoy a mi lado, ha sabido brindarme virtudes como la perseverancia, la responsabilidad y la fe de creer en uno mismo, para poder llevar a feliz término este trabajo de investigación.

❖ Es necesario dejar constancia de mis más sinceros agradecimientos a la **Universidad Nacional de Loja**, **al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables**, representada en cada uno de los docentes que en su momento se permitieron impartirme sus conocimientos y apoyo para la formación como futuro profesional.

❖ A mi familia, por siempre estar apoyándome en cada uno de los proyectos que en mi vida he realizado y en especial en este trabajo de tesis, que marcara un comienzo en lo que será mi vida profesional.

❖ De manera especial al ***Ing. Gonzalo Riofrío***, Director de Tesis, por haber colaborado en la realización del presente proyecto.

❖ . De manera especial al ***Ing.*** **Eugenio Sangüesa Subirón**, Asesor de desarrollo del motor Stirling, por haber colaborado en la realización del presente proyecto

❖ A mis amigos que son una de las bases fundamentales en mi vida y el apoyo constante para poder realizar este trabajo de tesis.

❖ Y en fin a todas las personas que de alguna u otra manera fueron participes de la realización de este trabajo de tesis, de las distintas formas en las que supieron brindarme su apoyo, en sentimiento sincero mil gracias.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN _____ ***II***

DECLARACIÓN DE AUTORÍA _____ ***III***

PENSAMIENTO _____ ***IV***

DEDICATORIA _____ ***VI***

AGRADECIMIENTO _____ ***VII***

ÍNDICE GENERAL _____ ***VIII***

ÍNDICE DE FIGURAS _____ ***XI***

ÍNDICE DE FIGURAS _____ ***XI***

ÍNDICE DE TABLAS _____ ***XIV***

SIMBOLOGÍA _____ ***XV***

a. TÍTULO _____ ***1***

b. RESUMEN _____ ***2***

b.1. SUMMARY _____ **3**

c. INTRODUCCIÓN _____ ***4***

d. REVISIÓN DE LA LITERATURA _____ ***6***

d.1.GENERALIDADES _____ **6**

d.2.FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES STIRLING _____ **9**

d.3.TIPOS DE MOTORES STIRLING _____ **12**

d.3.1. Tipo Alfa _____ 12

d.3.2. Tipo Beta _____ 13

d.3.3 Tipo Gama _____ 13

d.4.APLICACIONES DE LOS MOTORES STIRLING _____ **15**

d.4.1. El motor Stirling en la industria automotriz _____ 15

d.4.2. El motor Stirling en la industria naval _____ 16

d.4.3. El motor Stirling en la generación de energía eléctrica _____ 17

d.4.4. Motor Stirling y la energía solar _____ 17

d.4.5. Motores Stirling en el espacio _____ 19

d.5.CICLO STIRLING IDEAL _____ **20**

d.5.1. Procesos del ciclo _____ 23

d.5.2. Eficiencia: _____ 25

d.5.3. Trabajo por ciclo _____ 28

d.6.TEORÍA SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING _____ **28**

d.6.1. Consideraciones: _____ 29

d.6.2. Motor Stirling tipo Gamma 30
d.6.3. Trabajo, potencia y eficiencia 32

d.7.NUMERO DE BEALE 35

d.8.CARRERA Y DIÁMETRO DE LOS PISTONES 36

d.9.CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING 37
d.9.1. Partes que conforman un motor Stirling 38
d.9.1.1. El regenerador 39
d.9.1.1.1. Análisis de regeneración 40
d.9.1.1.2. Regenerador único 41
d.9.1.1.3. Regeneradores en serie 42

d.10. Materiales para la construcción de un motor Stirling 42

d.11. Parámetros de diseño 42

d.12. FORMA DE FABRICACIÓN DEL MOTOR STIRLING TIPO GAMMA 43

e. MATERIALES Y MÉTODOS 45

e.1. DISEÑO DEL MOTOR STIRLING GAMMA 45
e.1.1. Cálculos del motor 45
e.1.2. Cálculos de los sistemas existentes en el motor 54

e.2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL MOTOR STIRLING GAMA 73
e.2.1. Descripción del motor Stirling Gamma 73
e.2.2. Consideraciones para tener el modelo 73
e.2.3. Modelación del sistema 74
e.2.3.1. Modelado del volumen de control variable de la zona fría 78
e.2.3.2. Modelación de los volúmenes de control frío de la región de enlace 82
e.2.3.3. Generalización del modelo para los volúmenes de enlace de la zona fría de i=2 hasta i=m-184
e.2.3.4. Generalización del modelo para los volúmenes de enlace de la zona caliente de i=r+1 hasta i=N-1 85
e.2.3.5. Modelación de los volúmenes de control en el regenerador de i = m hasta i = r 85
e.2.3.6. Modelación del volumen de control caliente i = N 87
e.2.4. Modelación dinámica del motor Stirling tipo Gamma en v 88
e.2.4.1. Ecuaciones que rigen el movimiento del pistón vertical 88
e.2.4.2. Ecuaciones que rigen el movimiento del pistón horizontal 91
e.2.4.3. Ecuaciones que rigen el movimiento rotacional del eje del motor 93

e.3. Materiales 95

e.4. Métodos 96

f. RESULTADOS 99

f.1. Resultado del desarrollo de los objetivos planteados 99

g. DISCUSIÓN 101

g.1. Valoración técnica económica 103

g.2. Valoración ambiental ____ **105**

h. CONCLUSIONES ____ ***106***

i. RECOMENDACIONES ____ ***108***

j. BIBLIOGRAFÍA ____ ***109***

k. ANEXOS ____ ***112***

k.1. Comandos para la realización del programa "Motor Stirling Gamma" ____ **113**

k.1. Comandos para la realización del programa "Motor Stirling Gamma" ____ **114**

k.2. Guía del proceso tecnológico para la fabricación del motor Stirling ____ **136**

k.3. Planos para la fabricación del Motor ____ **154**

k.4. Fotos de fabricación y funcionamiento del motor ____ **155**

k.5. Datos obtenidos de la práctica experimental y la simulación del motor ____ **158**

k.5.1. Potencia experimental del motor ____ **159**

k.6. Asesor en el proceso de creación del motor Stirling Gamma ____ **162**

k.7. Anteproyecto de tesis ____ **164**

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Máquina Stirling de 1699..... 7

Fig.2 Esquema ideal de una máquina Stirling isotérmica 9

Fig. 3 Esquema del ciclo de un motor Stirling..... 11

Fig. 4 Dibujo de un motor Stirling tipo Alfa..... 13

Fig. 5 Dibujo de un motor Stirling tipo Beta..... 13

Fig. 6 Dibujo de un motor Stirling tipo Gamma..... 14

Fig. 7 Motor para camión Stirling..... 15

Fig. 8 Submarino Suizo fabricado con motor Stirling..... 16

Fig. 9 Generación eléctrica con motores Stirling 17

Fig. 10 Motor Stirling usado con energía solar 18

Fig. 11 Generación de energía eléctrica con el uso de un motor Stirling 18

Fig. 12 Motores Stirling utilizados por NASA 19

Fig. 13 Motor Stirling..... 20

Fig. 14 Ciclo ideal Stirling en un diagrama P-V..... 21

Fig. 15 Fase 1 del ciclo Stirling..... 22

Fig. 16 Fase 2 del ciclo Stirling..... 22

Fig. 17 Fase 3 del ciclo Stirling..... 22

Fig. 18 Fase 4 del ciclo Stirling..... 23

Fig. 19 Proceso 1-2 del ciclo Stirling..... 23

Fig. 20 Proceso 2-3 del ciclo Stirling..... 24

Fig. 21 Proceso 3-4 del ciclo Stirling..... 24

Fig. 22 Proceso 4-1 del ciclo Stirling..... 25

Fig. 23 Motor Stirling tipo Gamma..... 30

Figura 24 Carrera del pistón..... 36

Figura 25 Partes del motor Stirling..... 38

Figura 26 El regenerador en un motor Stirling..... 40

Fig. 27 Motor Stirling tipo Gamma..... 45

Figura 28 Motor Stirling Gamma con ángulo de desfase de 90º..... 50

Fig. 29 Esquema cinemático del sistema biela manivela 54

Fig. 30 Graf. Ángulo β en º (y) versus φ en º (x) 56

Fig. 31 Graf. Deslizamiento mm (y) versus φ en º (x) 57

Fig. 32 Diagrama de análisis del sistema biela manivela 57

Fig. 33 Graf. Velocidad m/s (y) versus ϕ en º (x) 59

Fig. 34 Graf. Aceleración m/s^2 (y) versus ϕ en º (x) 61

Fig. 35 Graf. Deslizamiento m, Velocidad m/s, Aceleración m/s^2 (y) versus ϕ en º (x) 62

Fig. 36 Fuerzas de inercia alternativas N (y) versus ϕ en º (x) 66

Fig. 37 Fuerzas de inercia alternativas N (y) versus ϕ en º (x) 67

Fig. 38 Esquema de fuerzas existentes del sistema biela manivela 68

Fig. 39 Motor Stirling Gamma y sus componentes 73

Fig. 40 Motor Stirling Gamma 74

Fig. 41 Variación del volumen con relación al giro del cigüeñal 76

Fig. 42 Distribución gráfica de los volúmenes de control en el motor Stirling Gamma 78

Fig. 43 Esquema del flujo de masa y de energía para el volumen de control i = 1 79

Fig. 44 Flujo de masa y energía en el volumen de control i =2 82

Fig. 45 Esquema del flujo de energía y masa en el volumen de control i = m hasta i =r 86

Fig. 46 Esquema del flujo de masa y energía en el volumen de control de la zona caliente i = N 87

Fig. 47 Cinemática del pistón vertical 89

Fig. 48 Cinemática del pistón horizontal 91

Fig. 49 Cinemática del eje del motor 93

Figura 50 Cilindro para el desplazador 140

Figura 51 Desplazador 141

Figura 52 Tapa del cilindro del desplazador 142

Figura 53 Guía para el desplazador 143

Figura 54 Guía del desplazador 144

Figura 55 Pasador Guía - Biela del desplazador 145

Figura 56 Cigüeñal 146

Figura 57 Pistón de potencia 148

Figura 58 Cilindro del pistón de potencia 149

Figura 59 Tapa del cilindro del pistón de potencia 150

Figura 60 Block 151

Figura 61 Pasador del pistón de potencia 152

Figura 63 Motor Stirling piezas 2 156

Figura 62 Motor Stirling Gamma piezas 1 156

Figura 64 Motor Stirling piezas 3 157

Figura 65 Motor Stirling piezas 4 157

Figura 66 Datos obtenidos con Stirling v1.1 160

Tabla 12 Datos comparativos de la experimentación y la simulación del motor Stirling Gamma 161

Fig. 68. Modelo de un prototipo de motor Stirling tipo Gama 186

Fig. 67. Modelo de un motor Stirling tipo Gamma 186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación cualitativa de los diferentes tipos de motores Stirling_____ 14

Tabla 2 Símbolos utilizados en la teoría Schmidt_____ 29

Tabla 3 Número de Beale según la temperatura del calentador_____ 35

Tabla 4 Datos obtenidos en el diseño del motor Stirling Gamma _____ 72

Tabla 5 Volúmenes distribuidos para cada zona de control del motor_____ 77

Tabla 6 Materiales utilizados en el trabajo de tesis_____ 95

Tabla 7 Gastos del diseño de la investigación _____ 103

Tabla 8 Gastos del diseño del motor Stirling Gamma _____ 103

Tabla 9 Gatos del la modelación matemática del motor Stirling _____ 104

Tabla 10 Gastos de la construcción del motor Stirling Gamma_____ 104

Tabla 11 Resumen de gastos del trabajo de tesis_____ 104

SIMBOLOGÍA

Q_{in} → Calor de entrada.

Q_{out} → Calor de salida.

Q_e → Calor de expansión.

Q_c → Calor de compresión.

T_L → Temperatura fría.

T_H → Temperatura caliente.

T_F → Temperatura fría.

T_C → Temperatura caliente.

η → Rendimiento.

W → Trabajo.

P → Presión.

V → Volumen.

m → Masa.

R → Constante universal de los gases.

T → Temperatura.

C_V → Coeficiente volumétrico del gas.

V_{SE} → Volumen barrido por el pistón de expansión.

V_{SC} → Volumen barrido por el pistón de compresión.

V_{dE} → Volumen muerto del pistón de expansión.

V_{dC} → Volumen muerto del pistón de compresión.

V_r → Volumen del regenerador.

V_e → Volumen actual de la zona caliente.

V_c → Volumen actual de la zona fría.

V → Volumen actual total.

T_r → Temperatura del regenerador.

d_x → Ángulo de fase.

t → Relación de temperaturas.

v → Relación de volúmenes barridos.

X → Relación de volúmenes muertos.

n → Velocidad del motor.

W_E → Trabajo de expansión.

W_C → Trabajo de compresión.

W_I → Trabajo por ciclo.

P_E → Potencia de expansión.

P_C → Potencia de compresión.

P_i → Potencia por ciclo.

L_E → Potencia de expansión.

L_C → Potencia de compresión.

L_i → Potencia por ciclo.

e → Eficiencia.

P_{mean} → Presión media.

$P_{\min}$ → Presión mínima.

P_{max} → Presión máxima.

a → Constante Schmidt

B → Constante Schmidt.

S → Constante Schmidt

c → Relación S/B.

L_s → Potencia en el eje.

B_n → Número de Beale.

N → Velocidad del motor.

$Dist$ → Distancia recorrida por el pistón.

Bi → Número de Biot.

h_c → Coeficiente de transferencia de calor por convección.

K → Conductividad térmica.

L → Longitud del regenerador.

η_T → Rendimiento térmico.

η_M → Rendimiento mecánico.

r → Radio del pistón.

h → Altura del pistón.

r_{comp} → Relación de compresión.

R → Radio de la manivela.

L → Longitud de la biela.

φ → Ángulo de rotación.

β → Ángulo de Oblicuidad.

λ → Relación radio de la manivela/longitud de la biela.

X → Distancia recorrida por el pistón.

v → Velocidad del pistón.

a → Aceleración del pistón.

pms → Punto muerto superior.

pmi → Punto muerto inferior.

ω → Velocidad angular.

F_a → Fuerza de inercia alternativa.

F_c → Fuerza de inercia rotativa.

F → Fuerza total del pistón.

F_g → Fuerza del pistón debido al peso.

F_b → Fuerza en la pared en el cigüeñal.

F_n → Fuerza en la pared del cilindro.

M_t → Momento motor.

T_E → Trabajo de expansión.

W → Fuerza necesaria para el volante.

Q_{ads} → Calor absorbido

V_s → Volumen total.

U → Energía interna.

μ → Energía interna específica.

h → Entalpía.

$\dot{m}$ → Flujo másico.

a. TÍTULO

"DISEÑO, MODELACIÓN MATEMÁTICA Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR STIRLING GAMMA"

b. RESUMEN

El trabajo de tesis expuesto ante ustedes en el presente escrito, posee información acerca de los motores Stirling y en especial del motor **Stirling Gamma,** del cual se ha realizado tres aspectos muy importantes para poder tener una mejor compresión de lo que son y de sus múltiples utilidades.

El primero de los aspectos es el diseño, se realizó el diseño del motor Stirling Gamma para conocer cuáles son los parámetros que comprometen de mayor manera su trabajo y rendimiento.

El segundo de los aspectos comprende lo que es la modelación matemática, útil y muy importante para saber cuáles son las ecuaciones que rigen su comportamiento.

Y como tercero y último aspecto pero no menos importante esta la construcción de un motor Stirling Gamma, se realizó para conocer de una mejor forma la complejidad y ensamble de sus mecanismos y él porque de su diseño, al igual de conocer sus ventajas y desventajas desde el punto de vista de la parte constructiva.

El desarrollo en detalle de todo lo expuesto en los párrafos anteriores lo encontraremos en el desarrollo del presente trabajo expuesto a continuación.

b.1. SUMMARY

The exposed thesis work before you presently written, it possesses information about the motors Stirling and especially of the motor Stirling Gamma, of which has been carried out three very important aspects to be able to have a better compression of what they are and of their multiple utilities.

The first of the aspects is the design, he was carried out the design of the motor Stirling Gamma to know which they are the parameters that commit in a bigger way their work and yield.

The second of the aspects he understands what is the mathematical, useful and very important modelation to know which they are the equations that govern their behavior.

And I eat third and last aspect but not less important this the construction of a motor Stirling Gamma, was carried out to know in a better way the complexity and assemble of its mechanisms and him because of its design, to the similar one of knowing its advantages and disadvantages from the point of view of the constructive part.

The development in detail of all that exposed in the previous paragraphs will find it in the development of the present work exposed next.

c. INTRODUCCIÓN

EL motor Stirling fue creado en 1816 por Robert Stirling y su hermano, nace por la necesidad de disminuir el riesgo que se tenía debido a la utilización de las máquinas de vapor. El motor Stirling es una máquina de combustión externa y basa su funcionamiento en la utilización de cualquier tipo de energía calorífica para su funcionamiento, dígase, combustibles fósiles, biomasa, geotérmica, energía solar, etc.

En los tiempos actuales y con la presencia de factores muy desfavorables para la correcta conservación del ambiente, se reviven los estudios acerca de las energías limpias, en todo ámbito y como no puede ser excluyente entre esas tecnologías encontramos al olvidado motor Stirling, el cual está actualmente en uso, especialmente en lugares en donde la energía del sol se puede obtener con ciertas ventajas, como por ejemplo, el desierto de Mojave – Estados unidos en donde se monta ya una planta de energía limpia en base a estos motores de no menos 500 MW.

El motor creado en 1816 fue el motor Stirling Beta, el cual es la patente original, con el tiempo se desarrolló algunas variantes de esta patente, entre las cuales figuran el motor Stirling Alpha y el Stirling Gamma, esta última variante es el centro de estudio de este trabajo de tesis, este motor (Stirling Gamma) tiene como fluido actuador un gas y se basa su funcionamiento en la compresión y la expansión de dicho gas, entre los gases más utilizados ya sea por su fácil obtención o por factores muy importantes como son el rendimiento y el trabajo obtenido están el aire y el helio.

El motor Stirling Gamma se constituye principalmente de dos cilindros enlazados entre sí por medio de tuberías resistente a altas presiones y alta temperatura, en el interior de dichos cilindros se encuentran pistones convencionales, que serán los encargados de realizar el trabajo, estos pistones se unen como en un motor de combustión interna a un cigüeñal, mediante una biela.

Para hacer más eficiente el trabajo de este motor se utiliza un dispositivo de regeneración, el cual es encargado de extraer calor del gas actuador en una parte del ciclo y devolver dicho calor en otra. Se ha comprobado teóricamente que si este elemento tuviese una eficiencia del 100 % no sería necesaria la compensación de energías en los diversos estados del ciclo, pero en realidad esto no sucede por lo que las compensaciones deben estar presentes.

Conocer acerca de estos motores nos dará las herramientas necesarias para la utilización de esta tecnología en la obtención de energía eléctrica en lugares en los cuales las redes de electrificación no llegan debido a lo accidentado de los territorios o al alto costo que significaría el llevarla a estos lugares, por lo que conocer cómo se diseñan, cuales son las ecuaciones que rigen su funcionamiento y como es su forma de construcción nos ayudara a insertar esta tecnología en el mercado local.

c.1. OBJETIVOS

c.1.1. Objetivo general

Diseñar, modelar matemáticamente y construir un motor Stirling tipo gamma.

c.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma.
- Modelar matemáticamente el motor Stirling tipo gamma.
- Realizar una guía del proceso tecnológico de fabricación del motor Stirling tipo gamma.
- Construir un motor Stirling tipo gamma.
- Comparar los datos experimentales con los datos obtenidos mediante la simulación del motor Stirling tipo gamma.

d. REVISIÓN DE LA LITERATURA

d.1.GENERALIDADES

Se denomina máquina Stirling a cualquier artefacto que sea capaz de transformar calor en trabajo o viceversa, a través de un ciclo termodinámico regenerativo. Con expansiones y compresiones cíclicas del fluido de trabajo, el cual opera entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío.

Cuando la máquina opera de modo volumétrico recibe propiamente el nombre de *máquina Stirling* mientras que si opera mediante flujo permanente continuo se denomina *máquina Ericsson.*

El vocabulario aquí expuesto es fruto de una evolución histórica; el primer nombre que recibieron estos artilugios fue el de motores de aire caliente *(hot-air engines)* porque sólo usaban aire como fluido de trabajo. Posteriormente, el uso de otros gases provocó que se buscaran otros nombres, como motores de gas caliente *(hot-gas engines).* O bien, motores Stirling, en honor a Robert Stirling. Esta última fue la que se impuso, de tal manera que incluso se ha empleado erróneamente para denominar algunas máquinas de tipo Ericsson.

No debe confundirse la máquina Stirling con el ciclo termodinámico Stirling o la máquina Ericsson con el ciclo del mismo nombre. De hecho, la imposibilidad técnica de realizar los procesos teóricos puros motiva que muy pocas máquinas Stirling se acerquen a este ciclo ideal. Debe señalarse también que en gran cantidad de bibliografía se habla de motores Einrici. Robinson. Rankine-Napier, pero no son más que diversas versiones de motores Stirling.

La primera experiencia conocida de los motores Stirling se remonta al 1699. Con un rudimentario artefacto que aprovechaba la expansión de aire caliente para hacer girar un volante, realizada por Amontons, en Francia (véase fig. 1), sólo un año después de que Savery fabricase la primera máquina de vapor para bombear agua. De hecho, el desarrollo de los motores Stirling ha transcurrido siempre paralelo al de la máquina de vapor.

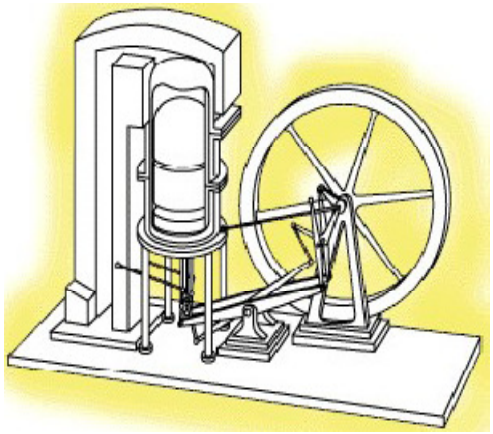


Fig. 1 Máquina Stirling de 1699

En 1759 Wood modificó para aire caliente la máquina de vapor de Newcomen. Glazebrook, él, en 1801 introdujo el ciclo cerrado, y ya en el 1816 los hermanos Robert y James Stirling dieron un gran impulso al ciclo cerrado regenerativo.

Muchas más aportaciones a lo largo de todo el siglo XIX (Ericsson. Cayley...) afinaron los conocimientos teóricos sobre el tema, e inventaron nuevos mecanismos para los motores Stirling. Durante la época de esplendor de las máquinas de vapor, las cuales constituían la fuerza motriz de la mayoría de las industrias del siglo XIX centenares de motores Stirling se utilizaban para el bombeo de agua y otras aplicaciones de menor potencia (0,1, 4 KW) como ventiladores. Se consideraban seguros y silenciosos para estas aplicaciones, pero habían tenido más de un fracaso en las configuraciones de mayor potencia. Hasta 1940 se fabricaban en grandes cantidades.

El gran desarrollo de los motores de combustión interna a partir de la mitad del siglo XIX y la mejora experimentada en el refinamiento de los derivados del petróleo (gasolinas, gasóleos) colocó los motores alternativos al frente de los motores térmicos. Este hecho, acompañado de la invención de los motores eléctricos, 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 fuentes de calor alternativas a los combustibles fósiles de alta calidad son nuevos campos donde los Stirling pueden ser competitivos respecto a otros sistemas.

La actual preocupación ambiental y la cada vez más apremiante escasez de recursos energéticos de carácter fósil han hecho que se haya rescatado del olvido este genial artilugio como una de las posibles soluciones a tales problemas dado su excepcional rendimiento.

En la actualidad el motor Stirling es objeto de muchas investigaciones debido al potencial que tiene para alcanzar altas eficiencias y a su operación silenciosa y limpia.

Los niveles de desempeño de los motores Stirling actuales son bastante buenos gracias al desarrollo de nuevos materiales que soportan altas temperaturas y reducen el desgaste, intercambiadores de calor diseñados por computador y la utilización de hidrógeno o helio a altas presiones como fluido de trabajo.

d.2.FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES STIRLING

El motor Stirling opera con un fluido motor en un ciclo cerrado, obteniendo trabajo a partir de cuatro procesos cíclicos consecutivos: aporte de calor, expansión con el aporte de calor de la fuente de calor, extracción de calor hacia un acumulador térmico regenerativo y compresión con extracción de calor hacia el foco frió.

En un motor Stirling el fluido está confinado dentro de un cilindro entre dos pistones opuestos. En medio, dividiendo el espacio, se coloca el regenerador, que atravesado por el fluido, lo condiciona para adecuarlo a la temperatura de la cámara en la que se encuentra. Aun lado se dispone la cámara de compresión a temperatura baja y en el otro la cámara de expansión, a temperatura alta (véase fig. 2).

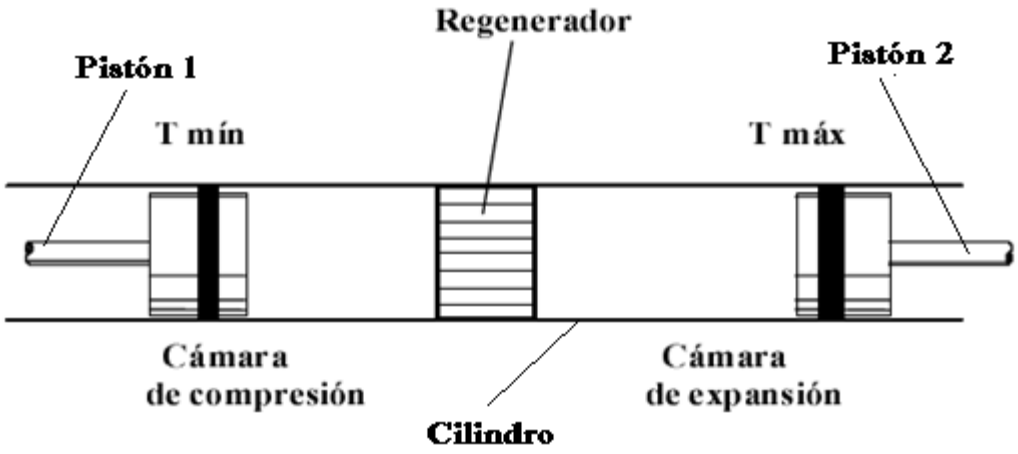


Fig.2 Esquema ideal de una máquina Stirling isotérmica

El proceso al que está expuesto el fluido en el interior de un motor Stirling consta de cuatro pasos:

Primer paso.-

La totalidad del fluido se encuentra a baja temperatura en la cámara fría, por lo que el volumen de esta cámara es máximo, mientras que la cámara caliente está a volumen mínimo.

Evolución 1-2. Se produce un proceso de compresión isotérmica en la cámara fría, por consiguiente debe extraerse calor

Segundo paso.-

El fluido sigue en la cámara fría, el volumen es mínimo para el fluido, pero intermedio para el mecanismo. La cámara caliente continúa a volumen mínimo.

Evolución 2-3. Se produce el trasvase del fluido de la cámara fría a la caliente de forma isocórica. El fluido atraviesa el regenerador, que le aporta calor para alcanzar temperatura alta, entrando, de este modo, en la cámara caliente a su propia temperatura.

Tercer paso.-

Todo el volumen está pasando a la cámara caliente por lo cual la cámara está en volumen intermedio, siendo el volumen del mecanismo volumen intermedio para la cámara caliente, mientras que la fría ha pasado a tener volumen mínimo, es decir, nulo.

Evolución 3-4, Expansión isotérmica en la cámara caliente, por consiguiente debe aportarse calor.

Cuarto paso.-

La cámara caliente y el fluido están a volumen máximo, y mientras que la cámara fría sigue a volumen mínimo.

Evolución 4-1. Se produce el trasvase de fluido de la cámara caliente a la fría de forma isocórica. El fluido atraviesa el regenerador y lo calienta, acumulándose el calor que volverá a recibir el fluido nuevamente en la evolución 2-3.

Esta evolución de los procesos se resume en la fig. 3:

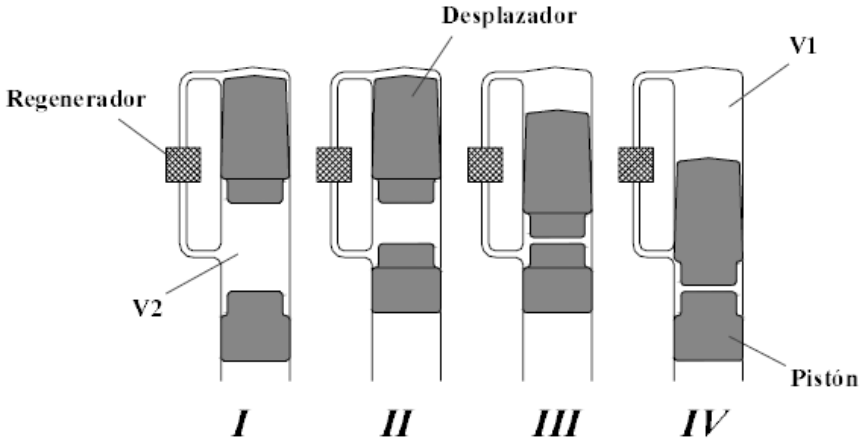


Fig. 3 Esquema del ciclo de un motor Stirling

De este modo existen simetrías en la localización y evolución del fluido, que permite que el fluido deba encontrarse totalmente confinado en la cámara caliente en la expansión y en la fría en la compresión isoterma, mientras que en los trasvases isocóricos evoluciona de una cámara a otra absorbiendo o cediendo calor al regenerador.

La dificultad de realización del ciclo teórico se produce por los requerimientos de desplazamiento de los pistones ya que la evolución 4-1 y 3-4 en la cámara caliente y fría, respectivamente, no tiene tiempo de realizarse para poder mantener el sincronismo

de posición entre ambas cámaras. Esta problemática motiva que la realización práctica de este tipo de motores obligue a renunciar a la correcta realización de alguna de las formas del ciclo para adaptarse al mecanismo.

Una posible implementación puede ser mediante el conocido mecanismo biela-manivela que caracteriza los motores alternativos.(Flóres, 2002)

d.3.TIPOS DE MOTORES STIRLING

Según la forma en que los componentes de un motor Stirling están interrelacionados, estos se pueden clasificar en diferentes tipos. Las tres configuraciones más comunes son la Alfa, Beta y Gama.

d.3.1. Tipo Alfa

Este motor consta de dos pistones de potencia ubicados en cilindros separados. Un cilindro actúa como zona caliente y el otro como zona fría. Este tipo de motor tiene una relación potencia/volumen bastante alta y por lo general ambas bielas se encuentran montadas en el mismo pasador del cigüeñal, lo que hace que el mecanismo de transmisión de potencia sea muy sencillo. Sin embargo presenta grandes dificultades a la hora de mantener el gas dentro de ciclo ya que es muy difícil sellar partes móviles, sobre todo el pistón que trabaja en la zona caliente ya que allí se logran altas temperaturas que deterioran los materiales (véase fig. 4).

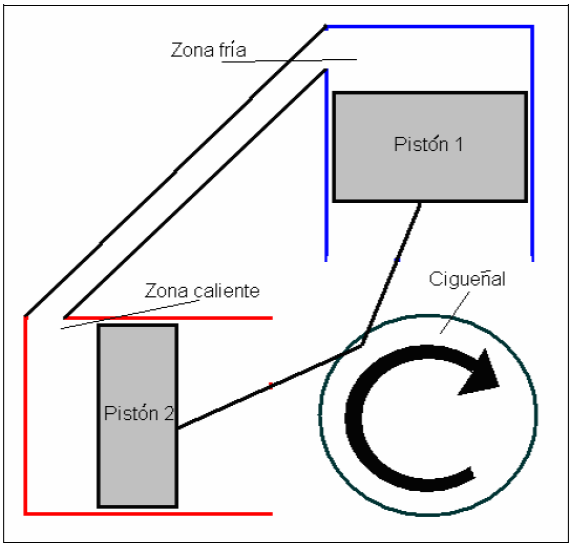


Fig. 4 Dibujo de un motor Stirling tipo Alfa

d.3.2. Tipo Beta

En esta configuración se encuentran montados el desplazador y el pistón dentro de un mismo cilindro, el cual está cerrado en la zona caliente. El pistón de potencia evita que el aire se escape de la zona fría. El principal problema que presenta este motor es la complejidad de mecanismos ya que el eje que transmite la fuerza al desplazador entra al sistema a través del pistón de potencia. Este mecanismo es igual al del primer motor diseñado por Robert Stirling (véase fig. 5).

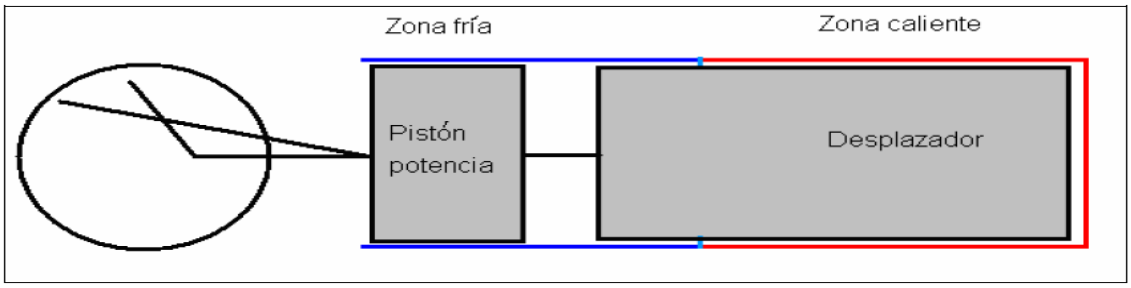


Fig. 5 Dibujo de un motor Stirling tipo Beta

d.3.3 Tipo Gama

Es prácticamente igual al Beta con la diferencia de que el desplazador y el pistón de potencia se encuentran en cilindros separados. Esta configuración tiene una menor

relación de compresión[1] pero sus mecanismos son mucho más simples. Si los cilindros se posicionan a 90 grados uno con respecto del otro (en V), se pueden montar sobre el mismo pasador del cigüeñal haciendo los aun más simples (véase fig.6).

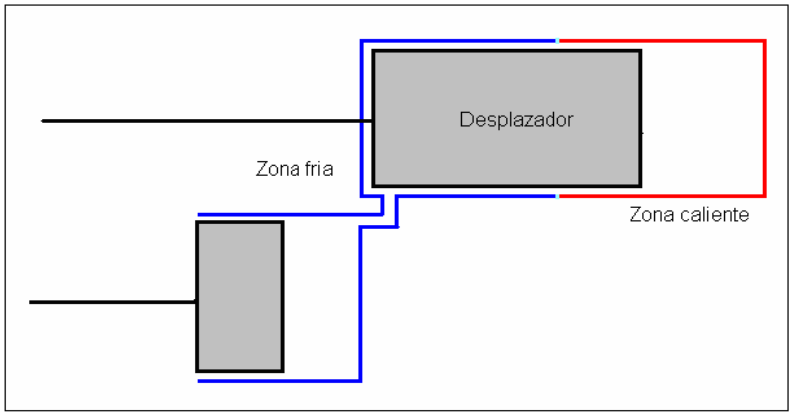


Fig. 6 Dibujo de un motor Stirling tipo Gamma

La siguiente tabla muestra una comparación cualitativa de los diferentes tipos de motores Stirling:

Tabla 1 Comparación cualitativa de los diferentes tipos de motores Stirling

COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MOTOR STIRLING		
Tipo de motor	**Ventajas**	**Desventajas**
Alfa	✓ Alta relación Potencia Volumen ✓ Sencillez de mecanismos	✓ Dificultad para sellar las cámaras

[1] Relación de compresión es la razón entre el volumen máximo y mínimo que se alcanza al interior del motor en un ciclo, es directamente relacionado con el trabajo que puede desarrollar el motor en cada ciclo.

Beta	✓ Recrea el diseño original de Stirling	✓ Mecanismos complejos y voluminosos
Gama	✓ Sencillez de mecanismos ✓ Facilidad de Sellado	✓ Relación de compresión baja

Fuente: El Autor

d.4.APLICACIONES DE LOS MOTORES STIRLING

Los motores Stirling poseen un vasto campo de aplicación, debido a su fácil adaptación en condiciones difíciles, dígase, lugares en donde es poco rentable utilizar la tecnología existente. Sin olvidar que su aplicación es muy importante debido al bajo grado de contaminación que puede llegar a producir.

d.4.1. El motor Stirling en la industria automotriz

Los motores Stirling de la actualidad pueden incluso superar la eficiencia y la relación peso/potencia que los motores de combustión interna y son reconocidos por su baja contaminación. Esto hace que muchos científicos estén haciendo esfuerzos encaminados a adaptar esta tecnología a la industria automotriz para hacer carros eficientes y amigables con el ambiente. Científicos de la empresa Phillips en Holanda también han desarrollado motores para camión (véase fig. 7).

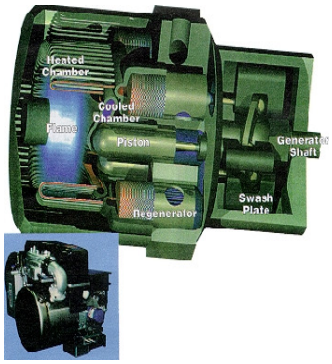


Fig. 7 Motor para camión Stirling

Medis EL, es una empresa israelí que está trabajando en un prototipo de motor Stirling cuyo objetivo es usar el calor de los gases de la combustión de un automóvil para propulsar un sistema de aire acondicionado. Esto incrementaría el rendimiento de combustible ya que los aires acondicionados convencionales trabajan con potencia extraída directamente del motor en cambio este nuevo sistema trabajará con calor de desecho que de otra manera se perdería.(Sarango)

d.4.2. El motor Stirling en la industria naval

Kockums es un astillero Suizo que ha fabricado por lo menos 10 submarinos para la armada de ese país cuyo medio de locomoción es el motor Stirling (véase fig. 8).

Fig. 8 Submarino Suizo fabricado con motor Stirling

La principal innovación en estos submarinos es un sistema de propulsión no dependiente de aire. Este funciona con motores Stirling que queman oxígeno puro y diesel en una cámara de combustión presurizada. La presión de los gases de combustión es más alta que la del agua, por lo cual los gases pueden ser evacuados incluso cuando la nave está sumergida. Esta es una gran ventaja sobre los submarinos que tienen plantas eléctricas con motores diesel, ya que estos deben subir a la superficie mientras las baterías se cargan.

WishperTec. Es una compañía que se especializa en diseñar motores Stirling para la generación de electricidad. Esta empresa fabrica generadores eléctricos para yates donde la operación silenciosa es indispensable para el confort de los tripulantes.(Kockums)

d.4.3. El motor Stirling en la generación de energía eléctrica

Stirling Tecnology inc. Es una compañía que fabrica unos motores de 5Hp para lugares donde no hay redes ni infraestructura de fluido eléctrico. Las ventajas de este motor incluyen la capacidad de funcionar con cualquier combustible, ausencia de bujías, carburadores y otros artefactos que comprometen la confiabilidad, operación silenciosa, poca polución, no necesita lubricación ni cambio de aceite y tiene una larga vida (véase fig. 9).

Fig. 9 Generación eléctrica con motores Stirling

d.4.4. Motor Stirling y la energía solar

Una empresa que tiene una larga trayectoria en el desarrollo de los motores Stirling es SOLO. Con la ayuda de la unión europea han desarrollado un proyecto llamado EuroDISH que consiste en la generación de energía eléctrica por medio de motores Stirling cuya fuente de calor es la energía solar (véase fig. 10).

Fig. 10 Motor Stirling usado con energía solar

No obstante el verdadero futuro de aplicación del motor de Stirling está en aprovechar su característica más notable: su rendimiento. Por ello precisamente, este tipo de máquina térmica es un magnífico conversor de unos tipos de energía en otros, en particular resulta muy eficiente para transformar la energía radiante solar en energía eléctrica usando un alternador o dinamo como elemento intermedio (véasefig.11).

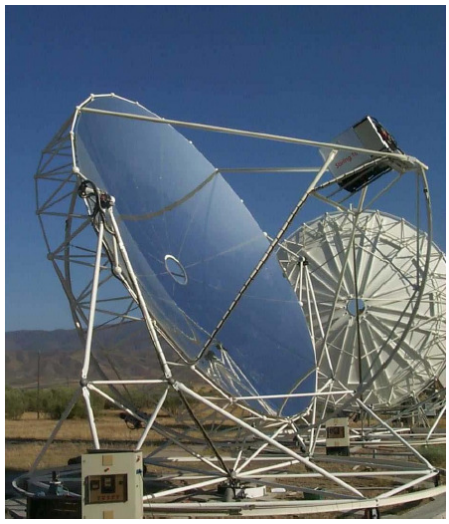


Fig. 11 Generación de energía eléctrica con el uso de un motor Stirling

Si disponemos de una superficie que colecte los rayos solares en forma de espejo orientable, será muy fácil hacer llegar el calor a la cámara caliente del motor y éste se pondrá a funcionar. Al no haber combustión no existe índice de contaminación (gran ventaja contra otros motores). Sin ir más lejos, en la Plataforma Solar de Almería, se

han construido equipos experimentales y demostrativos de gran rendimiento. Conocidos como Distal y EuroDISH formados por grandes discos parabólicos que reflejan y concentran el sol hacia un motor Stirling. (Llave, Clausó, Matellanes, & Martínez-Abarca, 2010)

Hoy en día la tecnología se aplicado para crear la mayor planta termoeléctrica del mundo, dicha planta genera una potencia de 500 MW, está ubicada al sur este de California - Estados Unidos en el desierto de Mojave, cuenta con aproximadamente 1821 hectáreas, con disco de 11 metros de diámetro para cada motor Stirling utilizado, esta planta es un 29% más eficiente que las plantas fotovoltaicas.

d.4.5. Motores Stirling en el espacio

La NASA quiere construir una base en la Luna que dure, sea estable y capaz de mantener se por sí misma. Para ello lo más indicado sería utilizar energía nuclear ya que esta es ligera y compacta, pero es imposible construir un reactor nuclear en la Luna. En el Centro Espacial Marshalld de la NASA los científicos e ingenieros han estado trabajando en cómo encontrar una fuente de energía fiable y que se pueda utilizar en satélites. Dado que en este centro hay una instalación que permite investigar el calor que se produce desde un reactor nuclear a un generador eléctrico, los científicos han experimentado el uso de un motor Stirling que permite que la energía calorífica se transforme en trabajo mecánico (véase fig. 12).

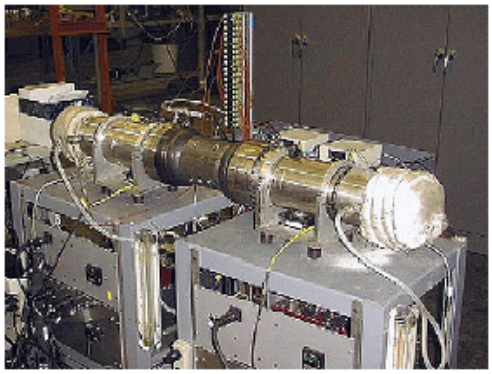


Fig. 12 Motores Stirling utilizados por NASA

Lo que los científicos quieren con esto es que este motor Stirling acompañado de un reactor nuclear reducido que se basa en la fisión, produzcan unos 40 kilovatios de energía suficiente para alimentar a la base lunar. La idea de la NASA se hará realidad a principios del año 2012. (Llave, Clausó, Matellanes, & Martínez-Abarca, 2010)

De la misma manera las agencias espaciales trabajan en la aplicación del motor Stirling en satélites que solucionen sus problemas energéticos en órbita incluyéndolos como elemento intermedio de transformación de la energía entre un reactor de fisión nuclear y el alternador eléctrico.

d.5.CICLO STIRLING IDEAL

El principio básico del ciclo Stirling consiste en un gas encerrado dentro de un cilindro hermético que tiene un extremo caliente y uno frió. Dentro del cilindro se encuentran un pistón de potencia y un pistón desplazador. El pistón de potencia tiene como funciones evitar que el gas salga y transmitir el trabajo al exterior del cilindro. La función del desplazador es hacer que el aire se mueva de la zona fría a la caliente y viceversa (véase fig. 13).

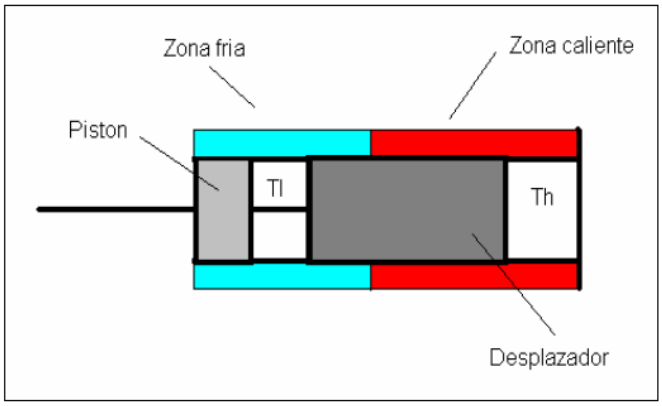


Fig. 13 Motor Stirling

Si el gas es desplazado hacia la parte caliente del cilindro, se expande aumentando la presión interna lo cual permite obtener trabajo. Luego el gas es desplazado a la parte fría donde baja su temperatura y disminuye la presión.

El ciclo se compone de 4 fases que se puede observar claramente en un diagrama P-V (véase fig. 14).

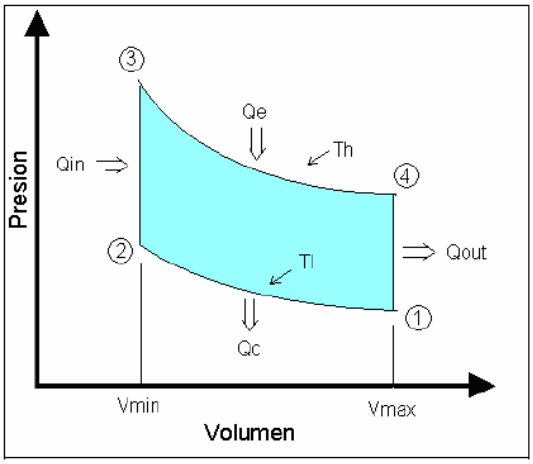


Fig. 14 Ciclo ideal Stirling en un diagrama P-V

Fase 1:

El desplazador se encuentra en la zona caliente y el pistón de potencia se encuentra en el extremo del cilindro por lo que el volumen del gas es máximo. Este se encuentra en la zona fría y la presión es mínima (véase fig. 15).

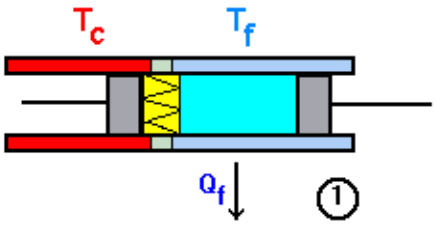


Fig. 15 Fase 1 del ciclo Stirling

Fase 2:

En esta fase el pistón se encuentra totalmente adelante, lo que hace que la presión aumente y el gas permanezca en la zona fría (véase fig. 16).

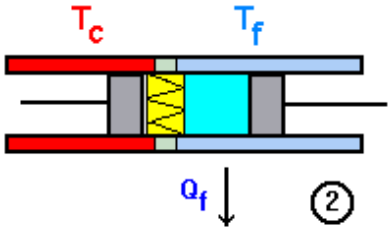


Fig. 16 Fase 2 del ciclo Stirling

Fase 3:

El pistón permanece en su lugar mientras el desplazador se mueve hacia la zona fría haciendo que el gas ocupe la zona caliente. Por lo tanto el volumen sigue siendo mínimo mientras que el gas está a alta temperatura y máxima presión (véase fig. 17).

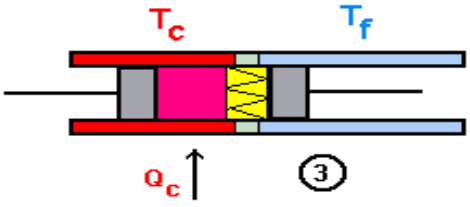


Fig. 17 Fase 3 del ciclo Stirling

Fase 4:

El aire caliente a alta presión mueve el pistón hasta el final del recorrido. En esta fase tenemos máximo volumen y el gas ocupa la zona caliente del cilindro. Luego se mueve el desplazador hacia la zona caliente para volver a iniciar el ciclo (véase fig.18).

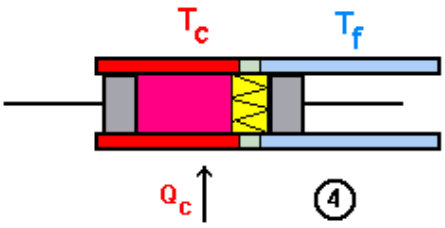


Fig. 18 Fase 4 del ciclo Stirling

Para que este ciclo continúe indefinidamente se le debe proporcionar calor constantemente a la zona caliente y retirárselo a la zona fría.

d.5.1. Procesos del ciclo

Para pasar de una fase a otra de ciclo Stirling debe ocurrir un proceso termodinámico. En total se requieren cuatro procesos para que se complete un ciclo. Estos serán enumerados a continuación:

Si se analiza el proceso 1-2 de la gráfica se observa que se da una compresión isotérmica lo que significa que hay que aplicarle al motor un trabajo externo para pasar de la fase l a la 2. En este proceso se libera una cantidad de calor Qc (véase 19).

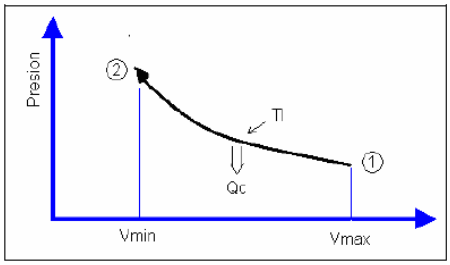


Fig. 19 Proceso 1-2 del ciclo Stirling

En el proceso 2-3 se le entrega al motor una cantidad de calor (Qin) para elevar la temperatura del gas de (T_L) a (TH), todo esto a volumen constante (Proceso isocórico) (véase fig. 20).

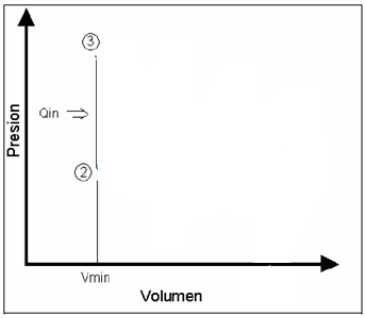


Fig. 20 Proceso 2-3 del ciclo Stirling

Luego, en el proceso 3-4, el aire que estaba a máxima presión hace que el pistón se desplace hasta lograr el volumen máximo, todo esto a temperatura T_H (proceso isotérmico). En esta etapa del ciclo es cuando el motor recibe una cantidad de energía de (Qc). La diferencia entre Qc y Q_E es el trabajo total entregado por ciclo (véase fig.21).

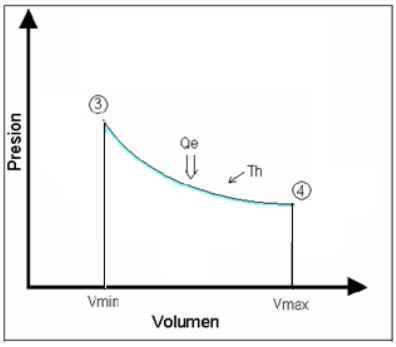


Fig. 21 Proceso 3-4 del ciclo Stirling

Por último el desplazador hace que el aire se mueva de la zona caliente a la zona fría por lo cual la temperatura de este disminuye al perder una cantidad de calor (Qout) y por consiguiente la presión baja (véase 22).

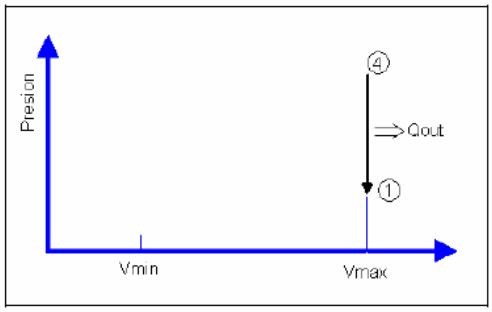


Fig. 22 Proceso 4-1 del ciclo Stirling

d.5.2. Eficiencia:

Para convertir calor en trabajo de forma cíclica se necesita un dispositivo denominado máquina térmica. Este dispositivo toma una cantidad de calor de una fuente de alta temperatura, una parte de este calor la convierte en trabajo y el resto lo desecha a un sumidero de baja temperatura en forma de calor de desecho.

La eficiencia η es la fracción del calor que entró que se pudo convertir en trabajo.

De esta manera:

$$\eta = \frac{W}{Q_{entra}}$$

(Ecu. 1)

$$Q_{in} = W + Q_{out}$$

(Ecu. 2)

$$\boldsymbol{\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}}$$

(Ecu. 3)

Si partimos de la base que el gas se comporta como ideal ***(PV=mRT),*** y analizando el ciclo Stirling, el rendimiento del ciclo será:

$$\boldsymbol{\eta = 1 - \frac{Q_{sale}}{Q_{entra}}}$$

(Ecu. 4)

Lo cual se puede escribir como:

$$\eta = \frac{(Q_E + Q_{in} - Q_E - Q_{out})}{Q_E + Q_{in}}$$

(Ecu. 5)

Se puede demostrar que Qin = Qout en magnitud pues se trata de un calentamiento y un enfriamiento de la misma cantidad de masa a volumen constante entre las mismas dos temperaturas.

$$Q_{in} = C_v \, x \, m \, (T_H - T_L) = -Q_{out} = -C_v \, x \, m(T_H - T_L)$$

(Ecu. 6)

Por lo consiguiente el rendimiento será expresado de esta forma:

$$\eta = \frac{Q_E - Q_C}{Q_E + Q_{in}}$$

(Ecu. 7)

Si hay regenerador se logra recuperar el calor Q_{out} para que sirva como Q_{in}. Además, solo en el primer ciclo será necesario aportar el calor externo Qi_n. De allí en adelante se recupera en forma interna, por lo tanto el rendimiento queda como:

$$\eta = \frac{Q_E - Q_C}{Q_E}$$

(Ecu. 8)

Como la evolución 1-2 es isotérmica a T_L, y teniendo en cuenta que Pi es la presión en el punto i se tiene que:

$$Q_C = R'T_L \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \implies -Q_C = R'T_L \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

(Ecu. 9)

Y

$$Q_E = R'T_H \ln(\frac{p_4}{p_3})$$

(Ecu. 10)

De donde:

$$\eta = R'T_H \ln\left(\frac{p_4}{p_3}\right) - Q_C = \frac{R'T_H \ln({}^{p_1}/_{p_2})}{R'T_L \ln({}^{p_4}/_{p_3})}$$

(Ecu. 11)

Es fácil demostrar que:

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2}$$

(Ecu. 12)

$$pV = R'T \Rightarrow \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} = {}^{V_{min}}/_{V_{max}}$$

(Ecu. 13)

Por lo tanto

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \longrightarrow Que\ es\ el\ redimiento\ de\ Canot$$

(Ecu. 14)

d.5.3. Trabajo por ciclo

El trabajo por ciclo se entiende como la integral de todos los trabajos durante el ciclo y corresponde a su vez al área en la gráfica P-V.

$$dW = PdV$$

(Ecu. 15)

Donde:

P → Presión

W → Trabajo

V → Volumen que ocupa el fluido de trabajo

$$dW = \frac{mR}{V}(T_H - T_L)dV$$

(Ecu. 16)

Donde:

R → Constante del gas

$$W_{ciclo} = \int \frac{mR}{V}(T_H - T_L)dV$$

(Ecu. 17)

$$W_{ciclo} = mR(T_H - T_L)\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

(Ecu 18)

d.6.TEORÍA SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING

La teoría de Schmidt es un método para calcular el desempeño de motores Stirling basado en la ley de los gases ideales.

d.6.1. Consideraciones:

El desempeño del motor puede ser graficado en un diagrama P-V. El volumen del motor es calculado usando la geometría interna y el ángulo en el cual se encuentre el cigüeñal. Cuando se establecen los volúmenes internos, las temperaturas y la masa del fluido de trabajo, la presión puede ser calculada usando la ecuación del gas ideal.

$$PV = mRT$$

(Ecu. 19)

La presión del motor es calculada teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

a. No hay pérdida de presión en los conductos internos y la presión es igual en todo el motor para un instante de tiempo determinado.

b. 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_H, 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.

Tabla 2 Símbolos utilizados en la teoría Schmidt

Nombre	**Símbolo**	**Unidades**
Presión del motor	P	Pa
Volumen barrido por el pistón de expansión o por el desplazador	V_{se}	m^3
Volumen barrido por el pistón de compresión o por el pistón de potencia	V_{sc}	m^3
Volumen muerto de la zona de expansión o zona caliente	V_{de}	m^3
Volumen del regenerador	V_r	m^3

Volumen muerto de la zona de compresión o zona fría	V_{dc}	m^3
Volumen actual de la zona caliente	V_e	m^3
Volumen actual de la zona fría	V_c	m^3
Volumen actual total	V	m^3
Masa del fluido de trabajo	m	Kg
Constante de los gases	R	$J/_{Kg^oK}$
Temperatura del gas en la zona caliente	T_H	ºK
Temperatura del gas en la zona fría	T_l	ºK
Temperatura del gas en el regenerador	T_r	ºK
Ángulo de fase	d_x	
Relación de temperaturas	t	
Relación de volúmenes barridos	v	
Relación de volúmenes muertos	X	
Velocidad del motor	n	Hz
Trabajo de expansión por ciclo	W_e	J
Trabajo de compresión por ciclo	W_c	J
Trabajo total por ciclo	W_i	J
Potencia de expansión	L_e	W
Potencia de compresión	L_C	W
Potencia total	L_i	W
Eficiencia	e	

Fuente: El autor

d.6.2. Motor Stirling tipo Gamma

Las siguientes ecuaciones muestran el modelo de cálculo para el motor Stirling tipo Gamma (véase fig. 23):

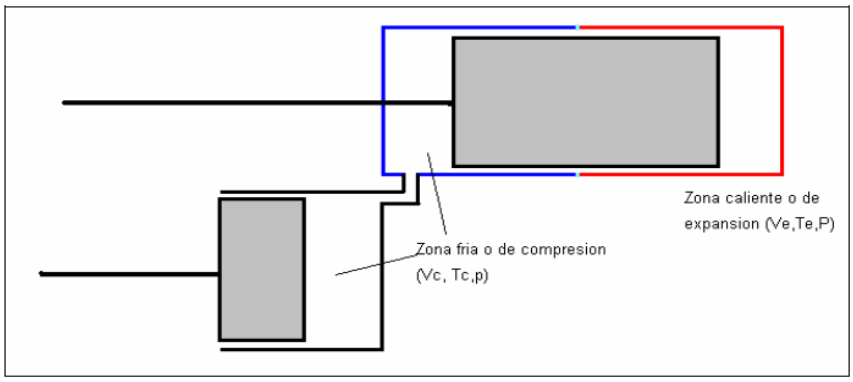


Fig. 23 Motor Stirling tipo Gamma

Cálculo del volumen actual en la zona de expansión:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE}$$

(Ecu. 20)

Cálculo del volumen actual en la zona de compresión:

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC}$$

(Ecu. 21)

Cálculo del volumen total:

$$V = V_E + V_R + V_C$$

(Ecu. 22)

Cálculo de la presión de llenado:

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{1 - c^2}}{(1 - c\,)\{\cos(x - a)\}} = \frac{P_{min}(1 + c)}{(1 - c\,)\{\cos(x - a)\}} = \frac{P_{max}(1 - c)}{(1 - c\,)\{\cos(x - a)\}}$$

(Ecu. 23)

La relación de temperatura t, y el volumen de barrido v y las relaciones de los volúmenes muertos están dados por las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{T_C}{T_E}$$

(Ecu. 24)

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}$$

(Ecu. 25)

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}}$$

(Ecu. 26)

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}}$$

(Ecu 27)

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}}$$

(Ecu. 28)

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1}$$

(Ecu. 29)

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tV_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1$$

(Ecu. 30)

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + +v^2 - 2t + 1}$$

(Ecu. 31)

$$c = \frac{B}{S}$$

(Ecu. 32)

d.6.3. Trabajo, potencia y eficiencia

El trabajo por ciclo (área del diagrama P-V) puede ser calculado con los coeficientes descritos anteriormente.

La energía de expansión W_E (J) basada en la presión media P_{mean} la presión mínima P_{min} y la máxima P_{max} se calcula de la siguiente manera:

$$W_E = \oint P dV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}}$$
$$= \frac{P_{max} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$

(Ecu. 33)

La energía de compresión se calcula de manera similar:

$$W_C = \oint P dV_C = -\frac{P_{mean} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = -\frac{P_{min} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}}$$
$$= -\frac{P_{max} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$

(Ecu. 34)

La energía por ciclo W_i (J) se obtiene de la suma de la energía de expansión y de la energía de compresión:

$$W_i = W_E + W_c$$

(Ecu. 35)

$$= \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c (1 - t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1 - t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}}$$
$$= \frac{P_{max} V_{SE} \pi c \, (1 - t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}}$$

(Ecu. 36)

La relación entre Pmean, Pmin y Pmax se define a continuación:

$$\frac{P_{min}}{P_{mean}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}}$$

(Ecu. 37)

$$\frac{P_{max}}{P_{mean}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}}$$

(Ecu. 38)

La potencia de expansión L_E (W), la de compresión L_C (W) y la potencia del motor L_i (W) se define a continuación utilizando la velocidad del motor (Hz).

$$L_E = W_E n$$

(Ecu. 39)

$$L_C = W_C n$$

(Ecu. 40)

$$L_i = W_i n$$

(Ecu. 41)

La eficiencia del motor se calcula de la siguiente manera:

$$e = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t$$

(Ecu. 42)

d.7.NUMERO DE BEALE

Con las ecuaciones anteriores se puede obtener el trabajo y la potencia del ciclo termodinámico. Sin embargo, al diseñar un motor lo que realmente se busca es una potencia real o útil, en este caso, una potencia en el eje.

Para calcular la potencia efectiva que entregará el motor se deben tener en cuenta irreversibilidades como fricción, caídas de presión en los conductos, etc.

El número de Beale es un factor que ha sido desarrollado con base en la observación de motores ya construidos que ayuda a predecir la potencia útil de un motor teniendo en cuenta el volumen barrido por el pistón de potencia, la presión media y la velocidad del motor.

$$L_s = B_n \cdot P \cdot V \cdot n$$

(Ecu. 43)

Se puede calcular la potencia útil con la fórmula anterior teniendo en cuenta que L_s es la potencia al eje. B_n es el número de Beale, P es la presión media (Pmean), V es el volumen en centímetros cúbicos y n es la velocidad en hertz. El número de Beale va desde 0.011 para motores pequeños hasta 0.015 para motores de alto desempeño y que trabajan a altas temperaturas.

La tabla 3 muestra de manera detallada la explicación de la utilización del número de Beale

Tabla 3 Número de Beale según la temperatura del calentador

Temperatura del Calentador	600K	800K	1000K	1200K

N° de BEALE – Motor bien diseñado	0,008	0,017	0,025	0,030
N° de BEALE – Motor poco optimo	0,002	0,006	0,009	0,010

Fuente: Maquinas Térmicas Motoras 1 - Antonio Márquez Luque, otros - primera edición, 2002

d.8.CARRERA Y DIÁMETRO DE LOS PISTONES

Cuando se escoge una relación Carrera/diámetro[2] hay que tener en cuenta las RPM deseadas, el área superficial, materiales de los anillos y las presiones a las cuales van a trabajar.

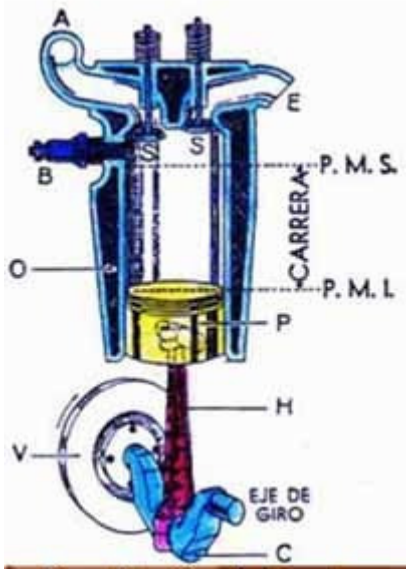


Figura 24 Carrera del pistón

La carrera es la distancia que recorre el pistón desde el punto más bajo del cilindro hasta el más alto, y las RPM son la cantidad de veces que hace esto en un minuto, por lo tanto la distancia total recorrida en un minuto por el cilindro es:

$$Dist = 2 \cdot Carrera \cdot Rpm$$

(Ecu. 44)

[2] Es la relación entre la distancia que recorre el pistón desde el extremo más alto del cilindro hasta el más bajo y el diámetro del mismo.

En la ecuación anterior se observa que la distancia es directamente proporcional a la carrera. Ahora bien, todo el tiempo el dispositivo encargado del sello está montado sobres el pistón y deslizándose sobre el cilindro, lo que genera rozamiento. Es evidente que a mayor distancia recorrida habrá más desgaste.

Carreras largas generan más desgaste que carreras cortas, o mirándolo desde otro punto de vista, para un mismo volumen de motor, una carrera corta permite más RPM.

En lo que respecta al área del cilindro, con carreras pequeñas el diámetro tendrá que ser grande y el área interior será mayor. Para el caso de los motores de combustión externa, es necesario tener áreas grandes de transferencia para poder absorber y retirar calor eficientemente.

Un problema que implican los diámetros grandes es que para una misma presión generan fuerzas mayores que pueden afectar los mecanismos biela-manivela.

d.9.CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING

Antes de empezar con el detalle en sí de lo que sería un esquema adecuado para la construcción de un motor Stirling es importante considerar cuales son las partes que lo conforman y los posibles materiales que se pueden usar para su construcción.

d.9.1. Partes que conforman un motor Stirling

Los motores Stirling y en especial el motor Gamma tienen mecanismos bastantes sencillos pero que a su vez cumplen funciones importantes, las partes que se identifican en el motor Stirling Gamma son:

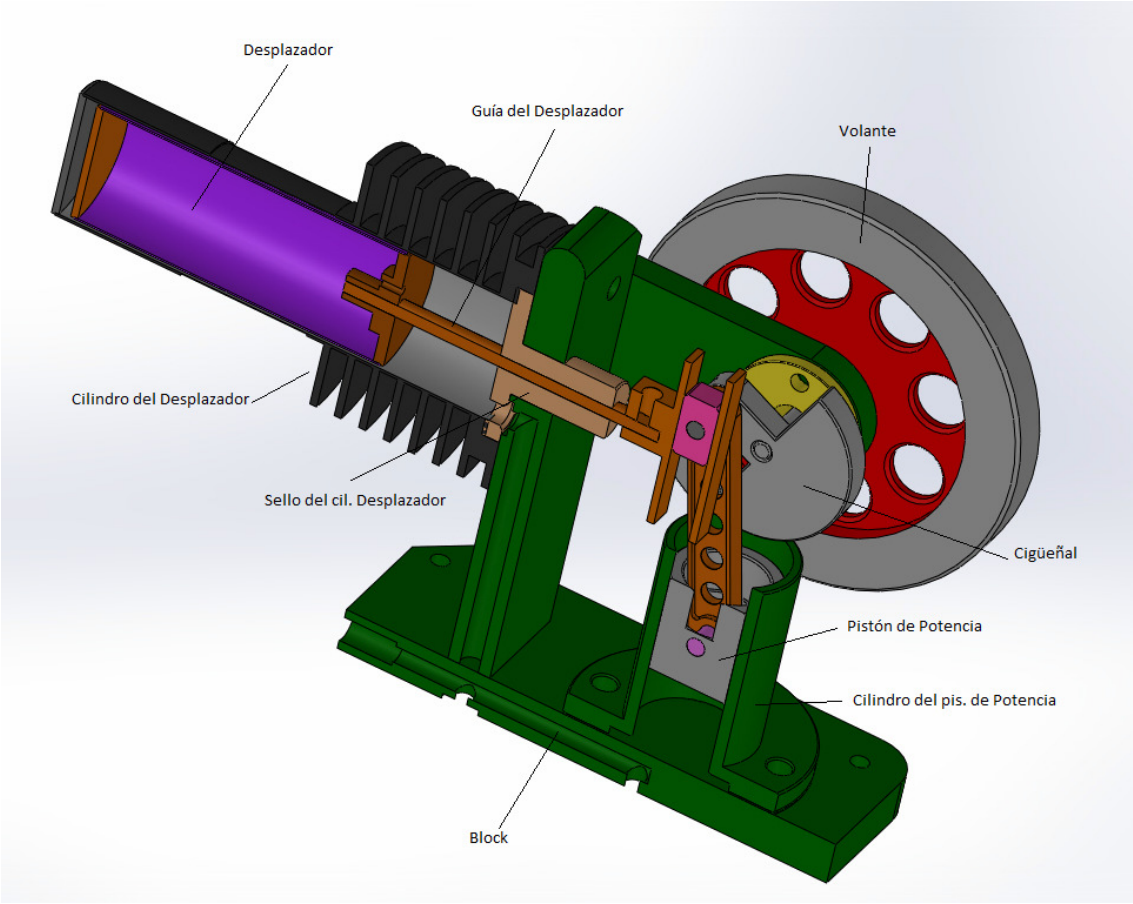


Figura 25 Partes del motor Stirling

- Cilindro de expansión
- Cilindro de compresión
- Regenerador
- Tubería de enlace
- Tapa de cilindros
- El cigüeñal

- Los pistones
- Camisas de los cilindros
- Empaques
- Sellos
- Bulones
- Bielas
- Volante
- Collarines
- Eje principal
- Soporte de cilindros
- Base del motor

Entre todos estos componentes importantes para el motor Stirling se tiene que tener consideraciones especiales con el regenerador, el cual es el encargado de mantener la diferencia de temperatura en el interior del motor.

Pero ¿qué es el regenerador?, ¿Cómo realiza su trabajo? y ¿se puede ubicar varios regeneradores? Serán las inquietudes que se desarrollen en los párrafos siguientes.

d.9.1.1. El regenerador

En un motor Stirling el regenerador tiene como misión ocasionar el salto térmico del fluido de trabajo alternativamente entre T_{max} y T_{min}, sin aportación externa de calor. El calor liberado por el fluido al pasar desde la cámara de expansión hacia la de compresión más fría es almacenado en el regenerador, para ser devuelto al fluido al

pasar en sentido contrario. Este reciclaje energético es fundamental para el buen rendimiento y viabilidad del motor Stirling. Además, el regenerador, situado siempre entre el calentador y el refrigerador, tiene que ser capaz de permitir el paso correctamente del fluido de trabajo entre estos elementos.(Flóres, 2002)

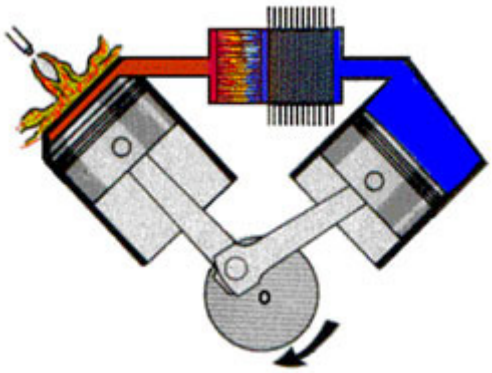


Figura 26 El regenerador en un motor Stirling

d.9.1.1.1. Análisis de regeneración

Tal y como se ha dicho anteriormente el regenerador ideal tiene que enfriar y calentar el fluido hasta las temperaturas T_H y T_L. El análisis del comportamiento del regenerador, que se va a exponer a continuación, parte de dos modelos: el modelo de la capacidad térmica y del modelo de las diferencias finitas (que no se planteará pero ha sido usado en los siguientes resultados).

El modelo de capacidad térmica global asimila un comportamiento homogéneo a un determinado volumen, y se puede aplicar en el caso de que el número de *Biot* sea menor que 0.1, El número de *Biot* se define como:

$$Bi = \frac{h_c L}{k_s}$$

(Ecu. 45)

Donde:

h_c →coeficiente de transferencia de calor por convección. Puede suponerse varias condiciones dependiendo del tipo de flujo (laminar o turbulento). Es función del fluido escogido.

k_s→ Conductividad térmica del material del regenerador.

L →longitud del regenerador

Imponiendo Bi = 0,1se obtiene, para un fluido y unos materiales representativos los siguientes valores indicativos:

Se considera que el flujo es laminar, y por tanto, si se usa el material con elevada conductividad térmica, el modelo de la capacidad térmica global se puede asumir sin inconvenientes. En los otros casos la longitud del regenerador sería más destacable, pero ya permite considerar gradientes de temperatura dentro del regenerador si este no es reducido en exceso.

Por tanto se analiza un conjunto regenerador suficientemente reducido y conductor (respecto la convección) como para considerarlo como un volumen de comportamiento homogéneo (regenerador único).

d.9.1.1.2. Regenerador único

La transferencia de calor entre regenerador y fluido se mantendrá hasta que la temperatura de los dos se iguale. Esta temperatura de equilibrio dependerá de la relación de masa y de la capacidad calorífica entre fluido y regenerador. Además, la temperatura final del regenerador será la temperatura de partida cuando el fluido circule en sentido inverso, de manera que si después de la etapa de enfriamiento del fluido la temperatura resulta muy baja, se producirá una baja aportación de calor en la fase de calentamiento.

d.9.1.1.3. Regeneradores en serie

Una solución posible para intentar sobrepasar el 50% de regeneración sería colocar varios regeneradores separados entre sí. Esto implica reducir la conductividad térmica del regenerador global en el sentido del flujo del fluido. (Flóres, 2002)

d.10. Materiales para la construcción de un motor Stirling

Los materiales para la construcción del motor Stirling tipo Gamma que se va a utilizar en este trabajo de tesis son:

El hierro fundido, para realizar el cilindro de expansión, las bielas, el soporte de los cilindros y otros; esta también el aluminio, con el cual se fabricará el cilindro de compresión y los pistones de trabajo; tenemos acero comercial en la construcción de los bulones, collarines, volante de inercia, cigüeñal y el eje principal; material compuesto de hule para las tuberías de enlace, sellos, etc.; al igual que se utilizará silicona resistente a las altas temperaturas para sellar los cilindros.

d.11. Parámetros de diseño

Considerando que el motor tendrá por misión un buen funcionamiento se determinan las condiciones de operación tales como:

- Temperatura en la zona fría y caliente.
- Presión de llenado.
- Volumen de los cilindros.

En la literatura se pueden encontrar motores que trabajen con calentamientos desde 40 grados centígrados hasta 1200 grados. Para determinar la temperatura a la cual se va a

calentar el motor se tiene que tener en cuenta la resistencia de los materiales con los cuales se va a manufacturar la zona caliente, así como el dispositivo que se va a utilizar para calentarla. En el trabajo de tesis se cree conveniente utilizar una temperatura aproximada de 300 grados centígrados en la zona caliente con el fin de que los materiales que se encuentran en el mercado local puedan ser utilizados.

La zona fría se podrá refrigerar por medio de convección natural o forzada con el fin de obtener una temperatura constante aproximada a los 40 grados centígrados o inferior.

El motor se diseñará teniendo una presión aproximada a 1 atm o lo que sería igual 101 Kpa y también se considerará que el volumen de expansión será igual al volumen de compresión y tendrá una magnitud de 457 centímetros cúbicos aproximadamente.

d.12. FORMA DE FABRICACIÓN DEL MOTOR STIRLING TIPO GAMMA

Para realizar la fabricación de cualquier artefacto es siempre necesario contar con un buen diseño, el mismo que se adapte a las limitaciones económicas y a las limitaciones tecnológicas del lugar en donde se está realizando, por lo que considerando estos importantes puntos de vista y con la experiencia ganada en el desarrollo de este trabajo de tesis, la fabricación del motor Stirling Gamma se desarrollara de la siguiente manera:

- Revisión y análisis de los planos del motor, obtenidos del proceso de diseño.
- Adquisición de los pistones de trabajos con su respectivo bulón y anillos, en el mercado local y que se ajusten a los requerimientos pedidos en el diseño.
- Fabricación de los cilindros de expansión y compresión de acuerdo a los planos de diseño, mediante el proceso de fundido en las industrias locales.
- Fabricación del cigüeñal, las bielas y el volante de inercia mediante el proceso de torneado, pulido y otros que permitan la perfección de las piezas.

- Fabricación y adquisición de accesorios que sirvan para asegurar y equilibrar (si es el caso) las piezas del motor.
- Fabricación de la base para el motor.
- Fabricación de los soportes de los cilindros.
- Ensamblaje del motor en su totalidad.
- Comprobación técnica del funcionamiento del motor.
- Reajuste del motor o de alguna de sus piezas (En caso de ser necesario).

e. MATERIALES Y MÉTODOS

e.1. DISEÑO DEL MOTOR STIRLING GAMMA

e.1.1. Cálculos del motor

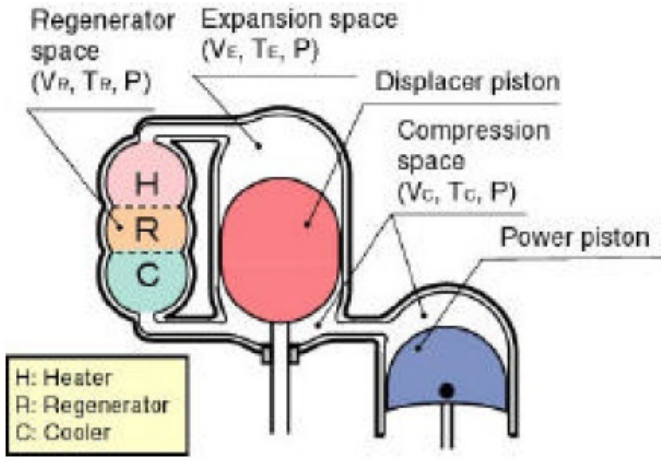


Fig. 247 Motor Stirling tipo Gamma

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones se aplica la teoría Smith para motores Stirling:

a. No hay pérdida de presión en los conductos internos y la presión es igual en todo el motor para un instante de tiempo determinado.

b. 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_H, 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.

Para realizar el diseño de un motor "STIRLING GAMMA" se tiene que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Presión media.
- Relaciones de volúmenes v.
- Relación de temperaturas t.
- Volúmenes muertos.

Para mantener constante la presión media (P_{med}) en todos los puntos del motor, asumiremos como consideración que el volumen barrido por el pistón de expansión V_{SE} será igual al volumen barrido por el pistón de compresión V_{SC}, es decir $V_{SE} = V_{SC}$, lo que traería como consecuencia de que la relación entre los volúmenes barridos (v) sea contante e igual a 1(ecuación 25)

Además que, el volumen muerto en la zona de expansión V_{DE} y el volumen muerto de la zona de compresión V_{DC} tienen un valor igual al 10% del volumen barrido por el pistón de expansión V_{SE}, lo que nos presentaría los siguientes resultados, $V_{DE} = V_{DC} = 0.1V_{SE}$.

Para lograr un adecuado trabajo de regeneración existen criterios que manifiestan que un volumen muerto del 50 a 60 % del volumen de la cámara de expansión sería ideal, por lo cual para este trabajo de tesis por criterio del diseñador se optará por tener un 60% de la cámara de expansión, es decir $V_R = 0.6\ V_{SE}$

Considerando que para este diseño se ha decidido tener una temperatura en la zona fría de 313°K (40ºC) y en la zona caliente de 573°K (300ºC), podemos entonces obtener el

valor numérico de la relación de la temperatura fría y la temperatura caliente (t), igual a 0.55 (ecuación 24)

En los motores Stirling Gamma el ángulo entre el eje del desplazador y el eje del pistón de potencia es de 60º hasta 180grados, logrando mayor desempeño entre los 60 y 120º, para este trabajo de tesis se tendrá un desfasé entre los pistones de 90º.

Se procede a calcular la presión media del motor la misma que como ya se advirtió en momentos anteriores será constante, para esto se necesitará calcular las constantes de Smith S, B, a y c lo cual se ejecuta a continuación:

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1}$$

$$a = \tan^{-1} \frac{1 \sin 90}{0.55 + \cos 90 + 1}$$

$$a = \tan^{-1} 0.645$$

$$a = 32.83\ ° //$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1$$

$$c = \frac{B}{S}$$

$$c = \frac{\sqrt{t^2+2(t-1)v \cos dx + v^2-2t+1}}{t+2tX_{DE}+\frac{4tX_R}{1+t}+v+2X_{DC}+1}$$

$$c = \frac{\sqrt{0.55^2+2(0.55-1)1 \cos 90 + 1^2-2(0.55)+1}}{0.55+2(0.55)(0.1)+\frac{4(0.55)(0.6)}{1+(0.55)}+1+2(0.1)+1}$$

$$c = \frac{1.09}{3.71}$$

$c = 0.29$ //

La presión de carga que se ha creído conveniente para este trabajo, es una presión aproximada de una atmosfera, es decir 101 Kpa, esta presión como es obvio será la presión mínima, desarrollando la ecuación 23 tenemos:

$$P_{medi} = \frac{P_{min}}{(\sqrt{\frac{1-c}{1+c}})}$$

Y desarrollando la ecuación obtenida, el valor de la presión media se define:

$$P_{medi} = \frac{101\ Kpa}{0.741881}$$

$$P_{medi} = 136.14\ Kpa\ //$$

La presión máxima del motor y la presión del motor se definen por lo expresado en la ecuación 23 y 38:

$$P = \frac{P_{min}(1+c)}{1-c*\cos(x-a)}$$

$$P = \frac{101\ Kpa(1+0.29)}{1-0.29*\cos(90-32.83)}$$

$$P = 338.48\ Kpa\ //$$

$$P_{MAX} = P_{med}\sqrt{\frac{1+c}{1-c}}$$

$$P_{MAX} = 136.14\ Kpa\sqrt{\frac{1+0.29}{1-0.29}}$$

$$P_{MAX} = 183.51\ Kpa\ //$$

Como se conoce el valor del volumen de barrido, el de la constante c y se conoce también el valor de la presión media se procede a ejecutar el cálculo del trabajo de entrada (ecuación 33):

$$W_e = \frac{P_{med} x\ V_{SE} x \pi x c x sena}{1+\sqrt{1-c^2}}$$

$$W_e = \frac{136.140 Kpa\ x\ 4.568x10-4x3.14x0.29xsen32.83}{1+\sqrt{1-0.29^2}}$$

$$W_e = \frac{30.70}{1.96}$$

$$W_e = 15.68\ J\ //$$

Conociendo el dato de potencia de entrada del motor se procede a obtener el trabajo de salida del motor ya que se conoce las temperaturas y los rendimientos térmicos y mecánicos, ambos rendimientos tendrán un valor de 0.65(Ecuación 42):

$$\eta = \frac{W_i}{W_e}$$

$$W_i = W_e\ x\ \eta$$

$$W_i = 15.68\ J\ x\ (1 - \frac{T_F}{T_C})\eta_{mec}\eta_{ter}$$

$$W_i = 15.68\ J\ x\ \left(1 - \frac{313ºK}{573ºK}\right) x0.65x0.65$$

$$W_i = 3J\ //$$

Pd: Considerar que de los cálculos obtenidos la eficiencia global del motor es 0.192

Conocido el volumen barrido en la cámara de expansión y teniendo en cuenta la relación de volúmenes barrido, el volumen barrido por la cámara de compresión va ha ser aproximadamente igual al de la cámara de expansión:

$V_{SC} = 456.81\ cc$ //

Como se conoce el volumen de barrido, ya que el mismo es dato de diseño se obtiene también las dimensiones de los cilindros, la mismas que son, 64mm de diámetro por 71mm de altura

Se tomo la altura de 71 mm por criterios de recorrido y desgaste, considerando que una carrera más corta representa un desgaste menor.

Teniendo en cuenta que el ángulo entre las bielas de los dos pistones forman un ángulo de 90° grados, es fácil darnos cuenta que cuando uno de los pistones este en su punto muerto superior o inferior el otro pistón tendrá que encontrarse en la mitad de su carrera, lo cual nos permite conocer cuál es el volumen máximo y mínimo en el motor:

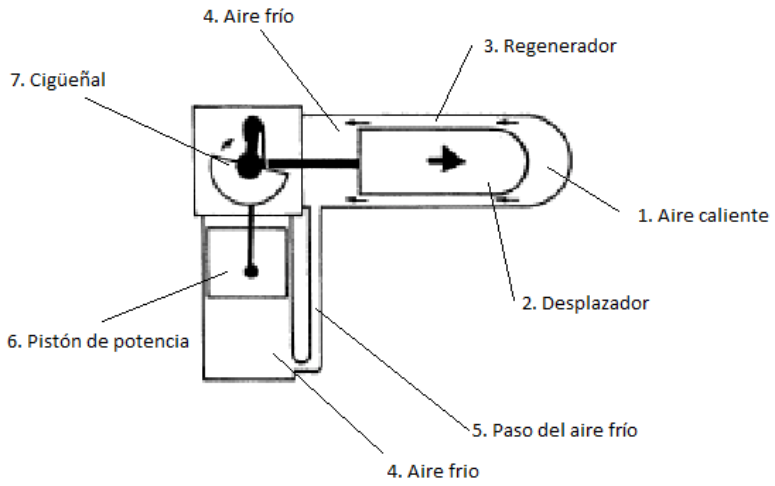


Figura 28 Motor Stirling Gamma con ángulo de desfase de 90º

$$V_{MAX} = V + V/2$$

$$V_{MAX} = 456.81\ cc + \frac{456.81\ cc}{2}$$

$$V_{MAX} = 685.22cc\ //$$

De igual forma el volumen mínimo que podríamos obtener es cuando uno de los dos pistones este en su punto muerto superior lo que dejaría al otro pistón en la mitad de su recorrido:

$$V_{MÍN} = V/2$$

$$V_{MIN} = 456.81\ cc/2$$

$$V_{MÍN} = 228.41\ cc\ //$$

Lo que la teoría expresa, es que para un óptimo funcionamiento del motor la relación de compresión debe comprender los valores de 2 -3.

$$r_{comp} = \frac{V_{MAX}}{V_{MIN}}$$

$$r_{comp} = \frac{685.22\ CC}{228.41\ CC}$$

$$r_{comp} = 3\ //$$

La cilindrada del motor como en la teoría se expresa es el volumen desplazado en un ciclo por el pistón:

$$cilindrada = V_{MIN} x (r_{comp} - 1)$$

$$cilindrada = 228.405\ ccx(3 - 1)$$

$$cilindrada = 456.81cc\ //$$

En este punto se calcula entonces la potencia del ciclo, el trabajo de compresión y la potencia de expansión:

$W_E = \frac{L_e}{n}$

$L_E = W_e \; x \; \eta$

$L_E = 15.68 \, J \; x \; \frac{60 \, rpm}{60 s}$

$L_E = 15.68 \, w$

$\eta = \frac{L_I}{L_E}$

$L_i = L_E x \eta$

$W_i = 15.68 x 0.192$

$W_i = 3 \, w$ //

$W_i = W_E + \; W_C$

$W_c = W_i - \; W_C$

$W_c = 3 \, J - \; 15.68 \, J$

$W_c = -12.68 \, J$ //

La potencia de compresión se la obtiene del trabajo de compresión:

$L_{C=} W_C \; x \; n$

$L_{C=} \; - 12.68 \, J \; x \; 1 \; \frac{1}{s}$

$L_{C=} \; - 12.68 \, w$ //

Avanzando en el diseño se calcula la temperatura en el regenerado, en este trabajo de tesis se va a dejar 0.5 mm de espació entre el desplazador y el cilindro como lo recomienda la literatura.

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2}$$

$$T_R = \frac{573+313}{2}$$

$$T_R = \frac{886}{2}$$

$$T_R = 443\ ºK^{3}\ //$$

Es importante saber cuál es la distancia recorrida por el pistón para saber el desgaste de la parte que intervienen en el mismo:

$$Dist = 2xcarreraxRPM^{4}$$

$$Dist = 2x0.071mx60\ RPM$$

$$Dist = 8.56m^{5}\ //$$

La masa de aire que se encuentra en el motor se calcula cuando el motor está frio, lo que indica que el pistón de potencia tiene que estar en su punto muerto inferior, el desplazador estará en la mitad de su recorrido y el volumen en el regenerador es total, la ecuación es la de los gases ideales y la presión es la presión media, la temperatura es la temperatura de carga 298 ºK

[3] Para poder calcular la temperatura en el regenerador de acuerdo a la formula expuesta se tiene que considerar que el volumen de la cámara de expansión y la de compresión varían según la función coseno.
[4] Según el libro "Manual del automóvil – Mantenimiento y reparación" en su pág. 15 expresa que los motores en los cuales la relación carrera / diámetro sea < 1 el motor es supercuadrado, si fuese =1 serías cuadrado y si es > 1 es alargado, en este caso el motor es alargado con una relación C/D = 1.109.
[5] Mientras la distancia recorrida por el pistón sea la más corta posible se estará asegurando la vida útil de los sellos del pistón.

$$PV = mRT$$

$$m = \frac{136.14KPax9.59306x10^{-4}m^3}{0.287\frac{KJ}{Kg^{o}K}x298^{o}K}$$

$$m = 1.56\ Kg\ //$$

En la ecuación del cálculo de la masa se toma la presión en Kpa y la constante universal del gas ideal con un valor de 0.287 $\frac{KJ}{Kg^{o}K}$.

e.1.2. Cálculos de los sistemas existentes en el motor

Concluido con los cálculos del motor en sí, se procede a los cálculos de los sistemas que en él intervienen, como es el caso del sistema biela manivela y otros:

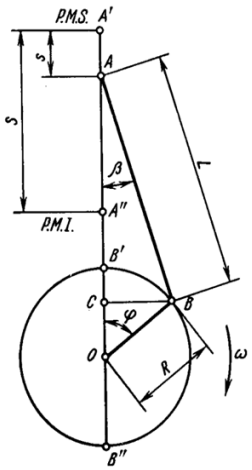


Fig. 25 Esquema cinemático del sistema biela manivela

Donde:

R→ Longitud de la manivela.

L→ Longitud de la biela.

φ→ Ángulo de rotación con respecto al P.M.S.

β→ Ángulo de oblicuidad.

e.1.2.1.Desplazamiento lineal del pistón en función del ángulo φ:

$X = L(1 - \cos\beta) + R(1 - \cos\varphi)$ (1)

$L\sin\beta = R\sin\varphi$

$\sin\beta = \frac{R\sin\varphi}{L}$ Considerando que $\lambda = \frac{R}{L}$ [6]

$\sin\beta = \lambda\sin\varphi \rightarrow$ La ecuación nos permite conocer el valor del ángulo β para cada posición de la manivela. (2)

Para α = 90º se alcanza el máximo valor de β = 14.478º, entonces podemos acotar que el valor del ángulo β está en los rangos de 14.478º y - 14.478º.

[6] La relación radio de la manivela y longitud de la biela λ comprende valores que se encuentran en el rango de 0.25-0.30, en esta tesis dicho valor será 0.25

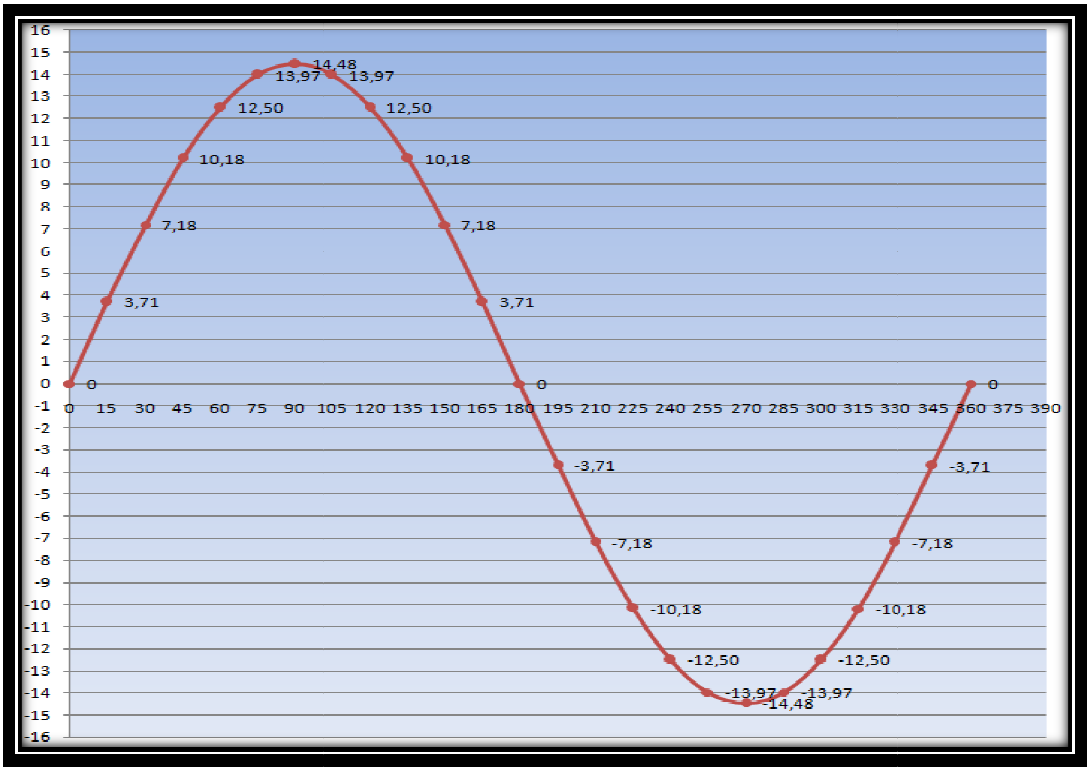


Fig. 30 Graf. Ángulo β en º (y) versus φ en º (x)

Recordando la conocida expresión trigonométrica y remplazando a su vez la ecuación (2) tenemos:

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \sin\beta^2} = \sqrt{1 - \lambda^2(\sin\varphi)^2}$$

Sustituyendo en la ecuación (1) conocemos el valor del deslizamiento del pistón para cada posición de la manivela:

$$X = L\left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2(\sin\varphi)^2}\right) + R(1 - \cos\varphi) \qquad (3)$$

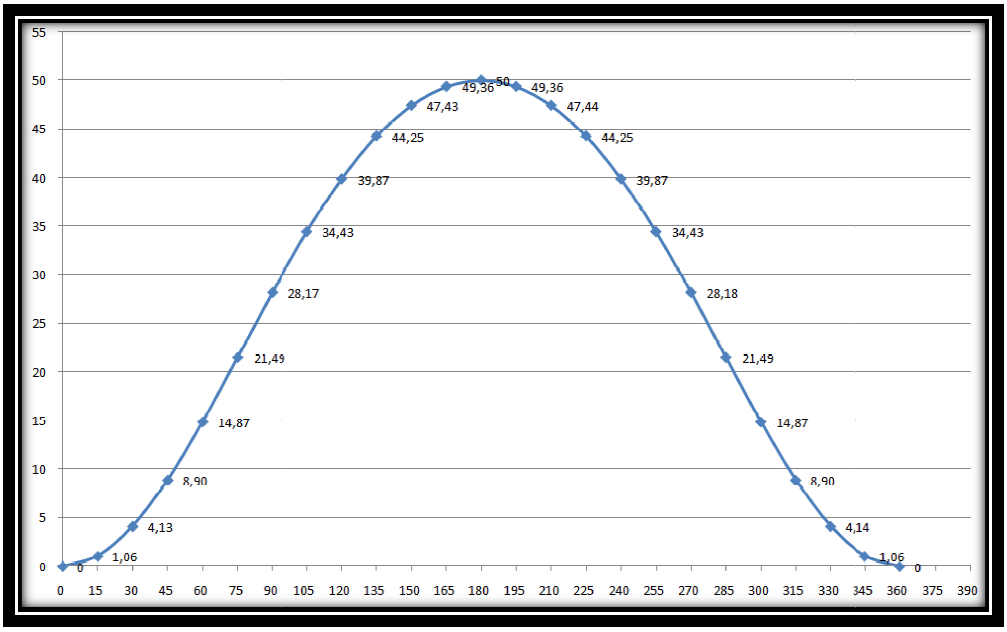


Fig. 31 Graf. Deslizamiento mm (y) versus φ en º (x)

Como:

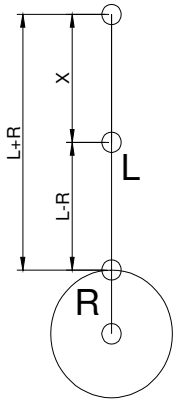


Fig. 32 Diagrama de análisis del sistema biela manivela

$$X = L + R - (L - R) = L + R - L + R = 2R$$

e.1.2.2.Dimensiones del mecanismo:

Como conocemos la carrera que tiene que realizar el pistón en cada cilindro para garantizar el volumen de aire necesario calculamos el radio que necesitamos en cada caso, hay que tener presente la relación $\lambda = \frac{R}{L}$ para calcular las longitudes de las bielas:

Carrera: 7.1 cm

Radio del cigüeñal: 3.55 cm

Longitud de la biela: 14.2 cm

λ: 0.25

e.1.2.3.Cálculo de la velocidad:

La velocidad del pistón se la puede calcular por derivación, sabiendo que la derivada del desplazamiento es precisamente la velocidad:

$$v = \frac{dx}{d\varphi} * \frac{d\varphi}{dt} = R(\sin\varphi + \frac{1\lambda^2 2\sin\varphi\cos\varphi}{2\lambda\sqrt{1-\lambda^2\sin\varphi^2}})\frac{d\varphi}{dt}$$

Conocido es el hecho de que $\frac{d\varphi}{dt} = w$ tenemos:

$$v = wR(\sin\varphi + \frac{1\lambda^2 2\sin\varphi\cos\varphi}{2\lambda\sqrt{1-\lambda^2\sin\varphi^2}})$$

Los términos $\lambda^2\sin\varphi^2$son demasiado pequeños por lo que se puede obviar su utilización sin miedo al error considerable, por lo que el término $\sqrt{1-\lambda^2\sin\varphi^2}$ se considera igual a 1:

$$v = wR(\sin\varphi + \lambda\sin\varphi\cos\varphi)$$

Recordando que $\sin\varphi\cos\varphi = \frac{\sin 2\varphi}{2}$ y que $\varpi = \frac{2\pi n}{60}$

$$v = \frac{\pi n}{30} R(\sin\varphi + \lambda\frac{\sin 2\varphi}{2})$$

Obteniendo la $\nu = \frac{m}{s}$ y el R en mm:

$$v = \frac{\pi n}{30000} R(\sin\varphi + \lambda\frac{\sin 2\varphi}{2})$$

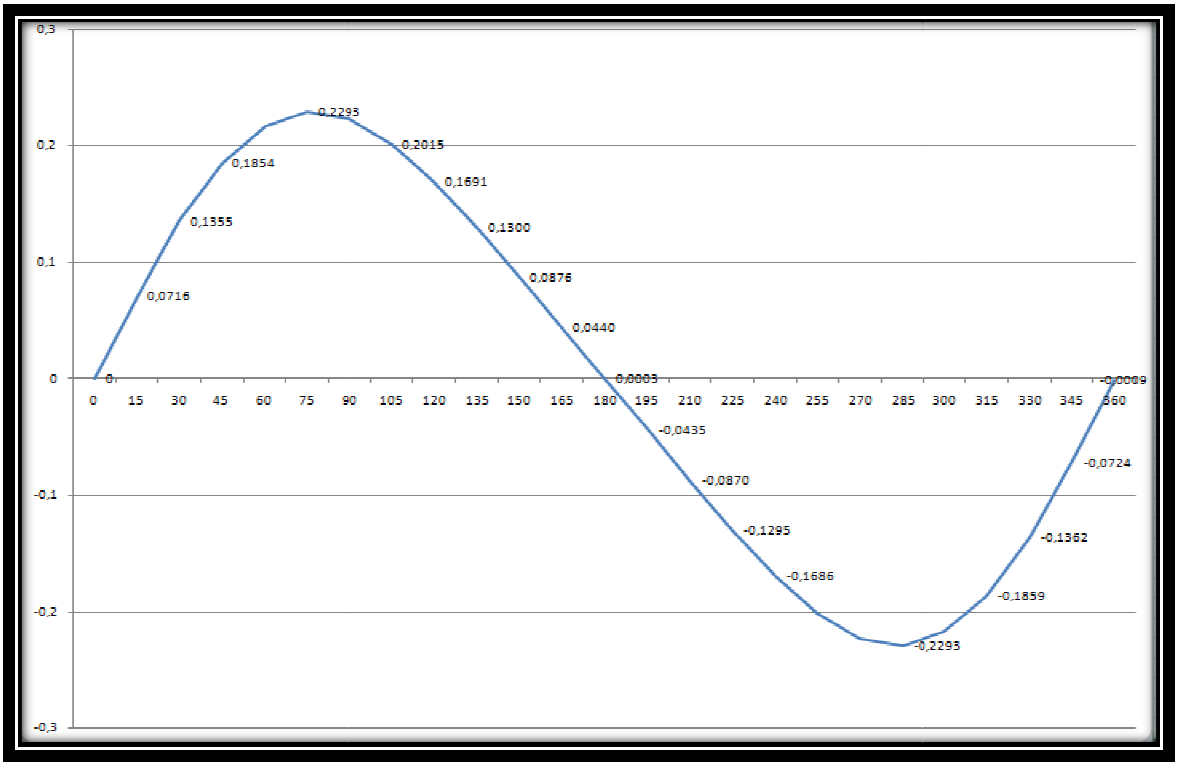


Fig. 33 Graf. Velocidad m/s (y) versus ϕ en º (x)

En la práctica la velocidad del pistón se puede obtener con gran precisión cuando la manivela y la biela son perpendiculares entre sí; del grafico anteriormente expuesto decimos que:

$$\varphi]_{U\,max} \cong \tan^{-1}\frac{L}{R} = \tan^{-1}\lambda^{-1}$$

De lo cual:

$$\varphi = \tan^{-1} 4$$

$$\varphi = 75.96375653°$$

Entonces la velocidad máxima será:

$$v = 3.55cm \frac{2\pi 60rpm}{71*100}\left(\sin 75.96 + \frac{0.25}{2}\sin 2(75.96)\right)$$

$$v = 0.229\ \frac{m}{s}$$

La velocidad media se calcula con una gran precisión:

$$\mu = \frac{Cn}{30000}$$

$$\mu = \frac{71mm\ x\ 60rpm}{30000}$$

$$\mu = 0.142\ \frac{m}{s}$$

e.1.2.4.Cálculo de la aceleración:

La aceleración del pistón como se conoce podemos obtenerla mediante la derivación de la ecuación de la velocidad o por la segunda derivada del desplazamiento:

$$a = \frac{dv}{d\varphi} * \frac{d\varphi}{dt} = wR(\sin\varphi + \lambda\frac{\sin 2\varphi}{2})\frac{d\varphi}{dt}$$

De lo que resulta que:

$$a = R\omega^2(\cos\varphi + \lambda\cos 2\varphi)$$

El valor máximo positivo de la aceleración se da en el P.M.S. debido a que $\cos\varphi = 1$ y $\cos 2\varphi = 1$ lo que expresa que:

$$a = R\omega^2(1 + \lambda)$$

Por lo que la aceleración máxima positiva es 1.25 $\frac{m}{s^2}$, mientras que la aceleración máxima negativa se da en el P.M.I., debido a que $\cos\varphi = -1$ y $\cos 2\varphi = 1$ lo que expresa que:

$$a = -R\omega^2(1 - \lambda)$$

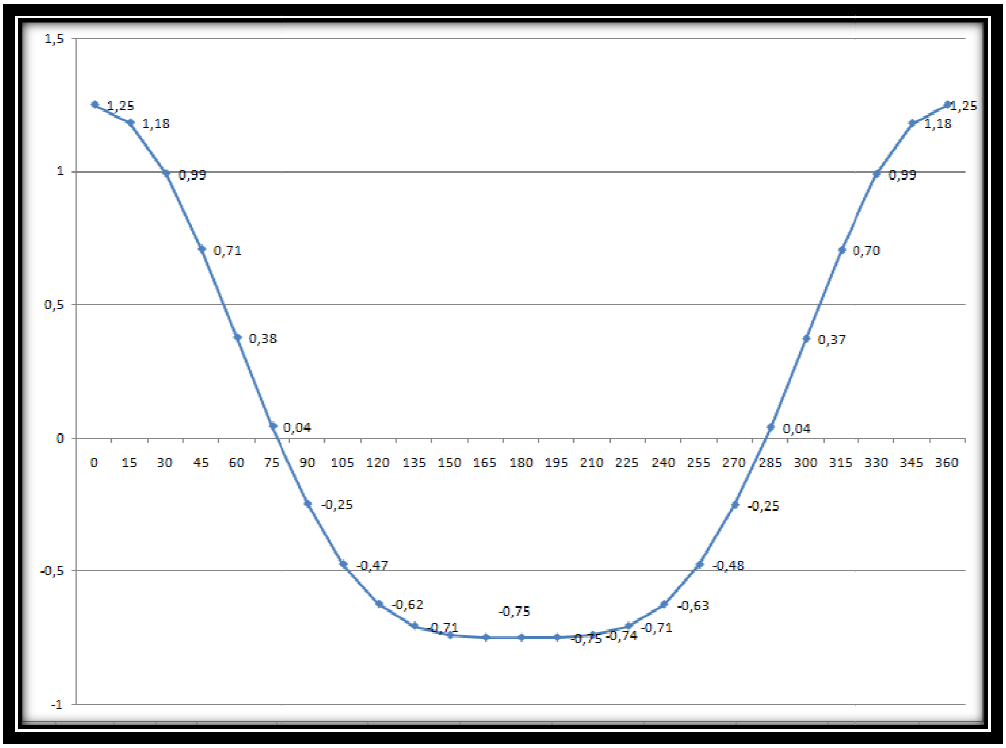


Fig. 264 Graf. Aceleración m/s^2 (y) versus ϕ en º (x)

Por lo que la velocidad máxima será -0.75 $\frac{m}{s^2}$, importante denotar que la aceleración es 0 cuando la velocidad del pistón es máxima.

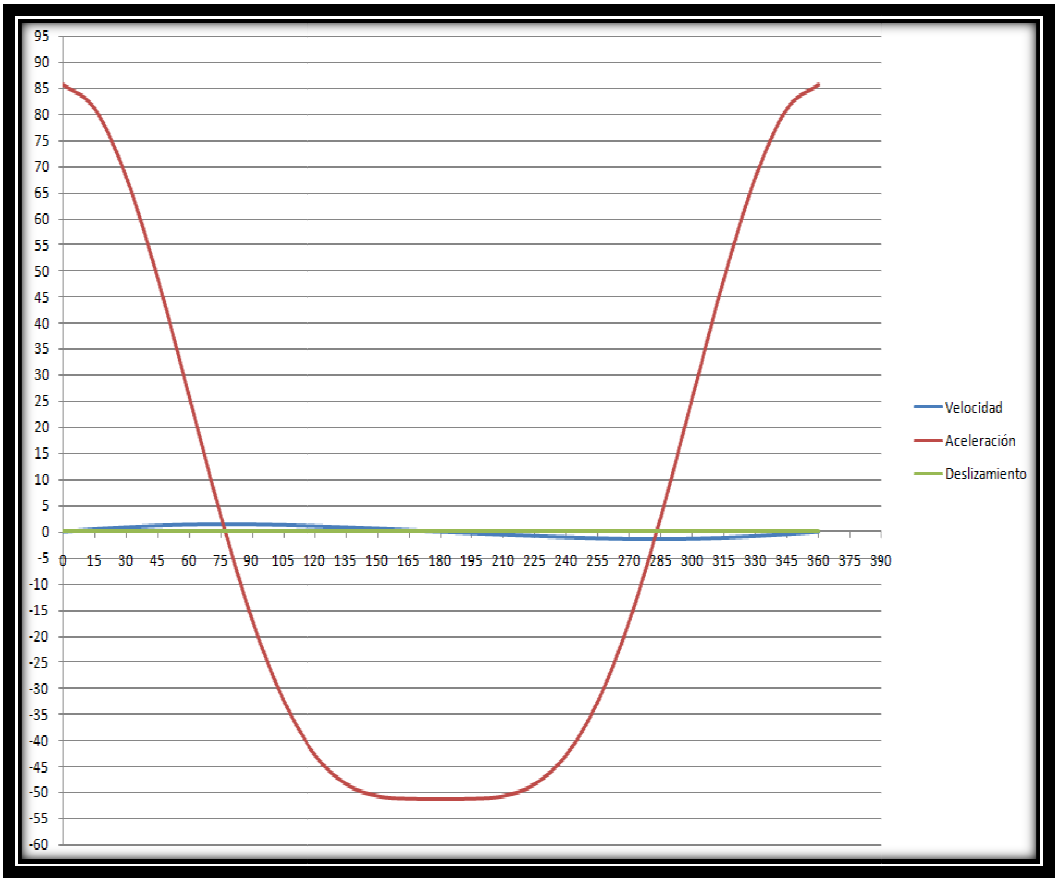


Fig. 275 Graf. Deslizamiento m, Velocidad m/s, Aceleración m/s^2 (y) versus ϕ en º (x)

Para el cálculo de las fuerzas de inercia se necesita saber la masa de los elementos a los cuales se le va a calcular dicha fuerza, para lo cual se realizó un modelo preliminar 3D en el software AutoCAD 2009 en el cual mediante la utilización de un comando denominado "propfis" se puede encontrar las propiedades físicas de la pieza construida.

---------- PISTÓN DE POTENCIA ----------

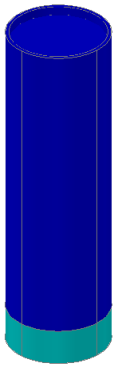
Volumen: 275255.6425 mm^3

Masa: 0.74 kg

Material: Aluminio 6061-T6

Densidad: 2.70 kg/dm^3

---------- **DESPLAZADOR** ----------



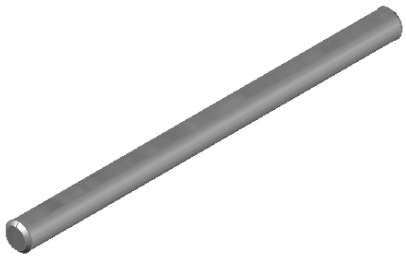
Volumen: 318873.4862 mm^3

Masa: 0.86 kg

Material: Aluminio 6061-T6

Densidad: 2.70 kg/dm^3

º---------- **BULÓN DEL DESPLAZADOR** ----------



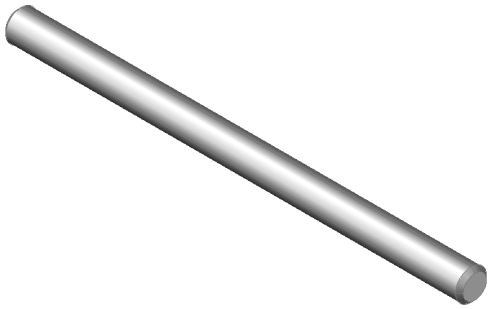
Volumen: 5710.1588 mm^3

Masa: 0.044 kg

Material: Acero ASTM –A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3

---------- **BULÓN DEL PISTÓN DE POTENCIA** ----------



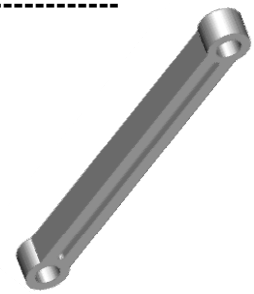
Volumen: 5810.6898 mm^3

Masa: 0.046 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3

---------- **BIELA DEL PISTÓN DE POTENCIA** ----------



Volumen: 11768.3285 mm^3

Masa: 0.092 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3

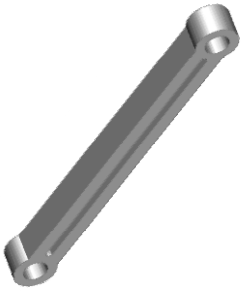
---------- BIELA DEL DESPLAZADOR ----------

Volumen: 16838.1827 mm^3

Masa: 0.13 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3



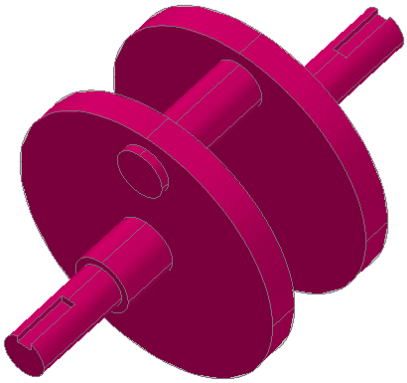
---------- CIGÜEÑAL ----------

Volumen: 23564.7578 mm^3

Masa: 0.185 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3



---------- EJE DE CONTRAPESO ----------

Volumen: 1229.3983 mm^3

Masa: 0.00965 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3

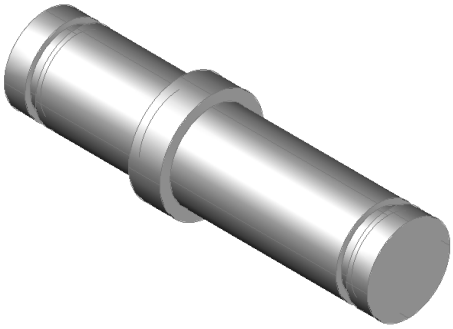
---------- PERNO DEL CIGÜEÑAL ----------

Volumen: 1821.0532 mm^3

Masa: 0.014 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3



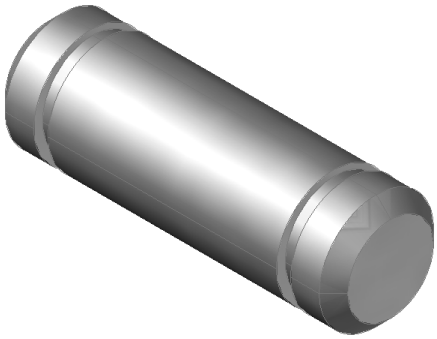
---------- PASADOR DE LA GUÍA DEL DESPLAZADOR ----------

Volumen: 1082.8770 mm^3

Masa: 0.0085 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3



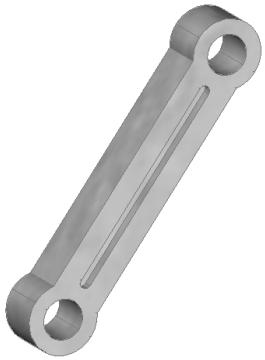
---------- GUÍA DEL DESPLAZADOR ----------

Volumen: 6706.7893 mm^3

Masa: 0.053 kg

Material: Acero A36

Densidad: 7.85 kg/dm^3



Las fuerzas de inercia en este tipo de mecanismos son dos, las que obedecen a fuerzas por movimiento alternativo y las que obedecen a fuerzas por movimiento circular.

Las partes que obedecen fuerzas debido a movimiento alternativo son:

Pistón completo con sus aros.

Perno del pistón y partes externas.

Pie de biela y 2/3 de la caña.

Las fuerzas que obedecen movimientos alternativos se calculan:

$$F_a = -m_a a$$

$$F_a = -0.8473\ Kg\ \frac{35.5}{1000}\left(\frac{\pi x 60}{30}\right)^2 (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi)$$

$$F_a = -1.19N\ (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi)$$

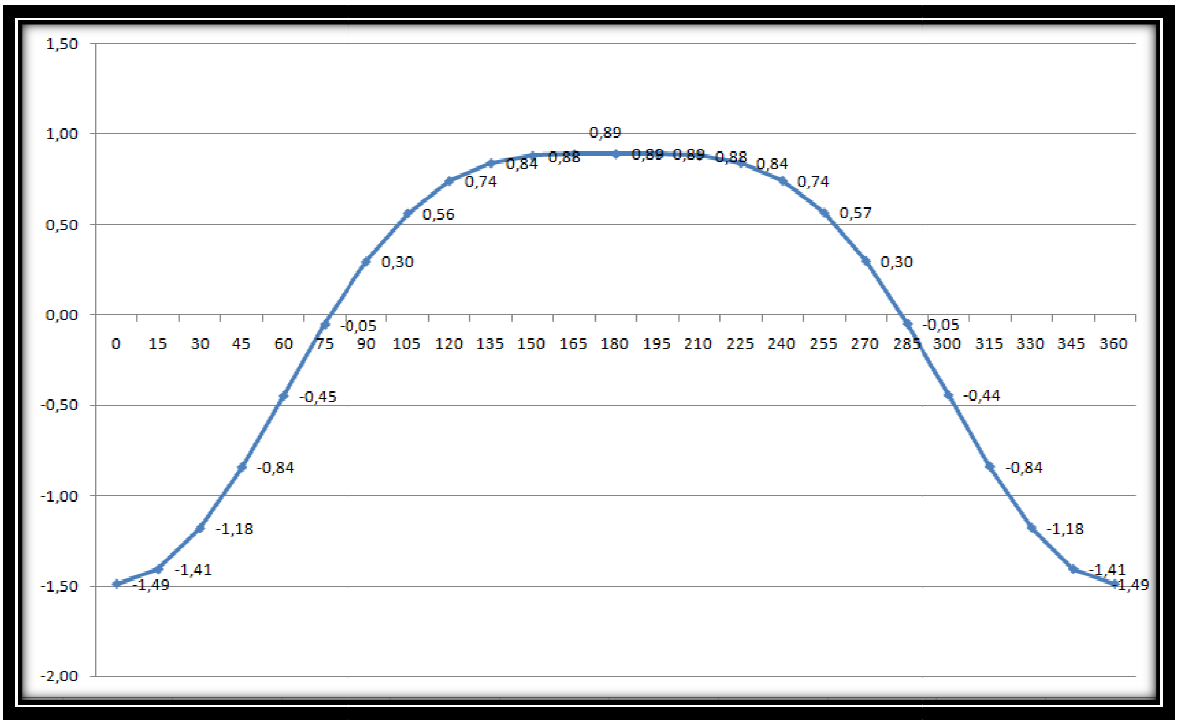


Fig. 286 Fuerzas de inercia alternativas N (y) versus ϕ en º (x)

Las fuerzas de inercia alternativas llegan a su punto máximo cuando la aceleración llega a su máximo negativo, lo que concurre en que el valor máximo de las fuerzas de inercia alternativa sea 0.89 N, alcanzan su punto máximo negativo cuando la aceleración alcanza su máximo positivo, el valor máximo negativo de las fuerzas de inercia es -

1.48 N, y como es evidente las fuerzas de inercias alternativas llegan a 0 cuando la aceleración es 0.

Las fuerzas alternativas de los dos pistones son distintas debido a que el desplazador lleva una guía y un tipo diferente de biela, por lo que la masa varía y es igual a 0.9257 kg

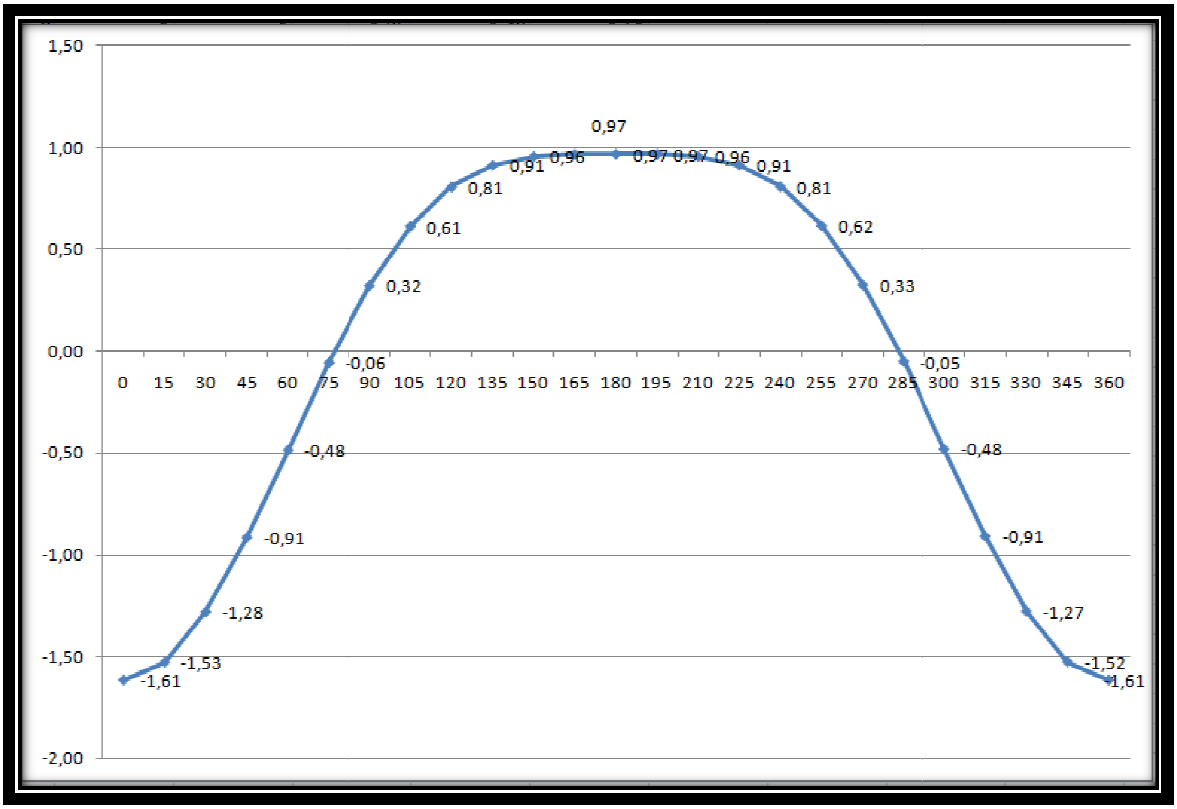


Fig. 297 Fuerzas de inercia alternativas N (y) versus ϕ en º (x)

Las partes que obedecen fuerzas debido a movimiento circular son:

Perno de la manivela.

Cabeza completa de la biela y 1/3 de la caña

Dichas fuerzas son calculables de la siguiente manera:

$F_C = m_C \varpi^2 R$

$$F_C = 0.088Kg\left(\frac{\pi x60}{30}\right)^2 \frac{35.5}{1000}$$

$$F_C = 0.12\ N\ //$$

Con el análisis de las fuerzas de inercia estamos prestos para poder hacer un análisis de las fuerzas resultantes y del momento motor:

$$F = F_a + F_g$$

$$F = 0.89\ N + \ P_{MAX} * \pi R^2$$

$$F = 0.89\ N + \ 183510\ \frac{N}{m^2} * \pi 0.0355^2$$

$$F = 0.89\ N + 756.55\ N$$

$F = 727.44\ N \rightarrow$ Pistón de potencia (Fuerza sobre el bulón)//

$F = 757.52\ N \rightarrow$ Desplazador.//

La fuerza resultante F es máxima cuando tienen la misma dirección la fuerza debida a la presión del gas y las fuerzas de inercia alternativas.

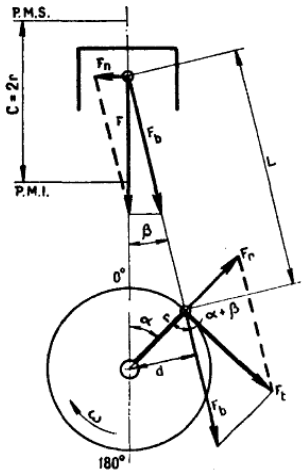


Fig. 30 Esquema de fuerzas existentes del sistema biela manivela

La fuerza ejercida sobre el perno del cigüeñal:

$$F_b = \frac{F}{\cos\beta} + \frac{F}{cos\beta}$$

$$F_b = \frac{752.52\ N}{\cos 14.47} + \frac{727.44\ N}{\cos 0}$$

$$F_b = 1553.72\ N$$

$F_b = 776.86\ N$ → Desplazador

$F_b = 727.44\ N$ // →Pistón de potencia

Dicha fuerza llega a su valor máximo cuando el valor de oblicuidad de la biela es el máximo positivo o negativo.

Se puede ver en la fig. 34 que se ejerce una fuerza sobre la pared del cilindro, dicha fuerza es mayor cuanto mayor sea la oblicuidad de la biela.

$$F_n = F\tan\beta$$

$$F_n = 727.44\ N \tan 14.47$$

$F_n = 704.36\ N$ → Pared del cilindro del pistón de potencia.

$F_n = 752.23\ N$ → Pared del cilindro del desplazador.

El momento encargado del movimiento es el momento motor el cual se analiza:

$$M_t = F_b\,\mathrm{R}\sin(\alpha + \beta)$$

El momento es el máximo cuando el valor de la oblicuidad de la biela llega a su máximo lo que quiere decir que α=90º y β=14.47

$$M_t = 776.86N \frac{\sin(90+14.47)35.5}{1000}$$

$$M_t = 20.70\ Nm\ //$$

Nota: debido a las pequeñas fuerzas encontradas se puede concluir que ningún material fallará debido a sus propiedades.

Cálculo de la masa del volante de inercia:

$$L_E = 15.68\ w = T_E w_1$$

$$T_E = \frac{L_E}{w_1}$$

$$T_E = \frac{15.68\frac{J}{s}}{6.28\frac{rad}{s}}$$

$$T_E = 2.50\ J\ //$$

Tenemos que:

$$L_i = 3\ w = T_i w_2$$

$$w_2 = \frac{L_i}{T_i}$$

$$w_2 = \frac{3\frac{J}{s}}{3\ J}$$

$$w_2 = 1\ \frac{rad}{s}\ //$$

El volante que se colocará en el motor será del tipo de disco sólido, para lo cual tenemos:

$$W = \frac{4gE}{r_o^2(w_1^2 - w_2^2)}$$

$$W = \frac{4\ x\ 32.2\ \frac{pie}{seg^2}\ 0.2 lbf\ pie}{(0.164\ pie)^2\left(\left(6.28\frac{rad}{seg}\right)^2 - \left(1\frac{rad}{seg}\right)^2\right)}$$

$$W = \frac{26.51\ \frac{lbf\ pie^2}{seg^2}}{1.03\frac{pie^2}{seg^2}}$$

$$W = 25.75\ lbf = 114.57\ Kg\ \frac{m}{seg^2}$$

$$m = \frac{W}{g}$$

$$m = \frac{114.57\ Kg\ \frac{m}{seg^2}}{9.81\ \frac{m}{seg^2}}$$

$$m = 11.67\ Kg\ //$$

Para un acero con densidad de 7.85kg/dm^3 se necesita un volumen de 174.52 cm^3, teniendo en cuenta que el radio medio es igual a 5cm el radio exterior será 9.25cm y el radio interior 0.75cm, lo cual nos dice que el espesor del volante será 2.79 cm.

El calor demandado por el motor se lo obtiene de la formula:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{ads}}$$

$$Q_{ads} = \frac{W_{neto}}{\eta}$$

$$Q_{ads} = \frac{15.68\ J}{0.192}$$

$$Q_{ads} = 81.67\ J\ //$$

Tabla 4 Datos obtenidos en el diseño del motor Stirling Gamma

DATOS OBTENIDOS DEL MOTOR STIRLING GAMMA POR MEDIO DE LA TEORÍA SMITH	
Presión media	136.14 Kpa
Volumen en la cámara de expansión	456.81 cc
Volumen en la cámara de compresión	456.81 cc
Volumen muerto de la cámara de expansión	45.68cc
Volumen muerto de la cámara de compresión	45.68 cc
Volumen del regenerador	274.08 cc
Trabajo de la cámara de expansión	15.68 J
Trabajo de la cámara de compresión	-12.68 J
Trabajo del motor	3 J
Potencia en la cámara de expansión	15,68 w
Potencia en la cámara de compresión	-12.68 w
Potencia del motor	3 w
Eficiencia	0.192
Temperatura en la zona caliente	300ºC
Temperatura en la zona fría	40ºC
Temperatura del regenerador	170ºC
Distancia recorrida por el pistón en un minuto	8.54 m
Calor demandado por el motor	81.67 J
Masa del motor	1.56 kg

Fuente: El Autor

e.2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL MOTOR STIRLING GAMA

e.2.1. Descripción del motor Stirling Gamma

El motor Stirling Gamma está constituido por un pistón de potencia y un desplazador ubicados en la zona fría y en la zona caliente respectivamente, es uno de los tipos de motores más prácticos de armar técnicamente, por su sencillez de diseño y su facilidad de sellado, ante una desventaja notoria que es la relación de compresión baja. En el motor Gamma el desplazador se encuentra sometido a grandes cambios de temperatura que van de la temperatura fría a la temperatura caliente, en cambio el pistón de potencia se encuentra sometido a grades cambios de presión desde P_{min} hasta $P_{max,}$ en la figura 35 se encuentra detallado el motor Stirling Gamma y sus componentes:

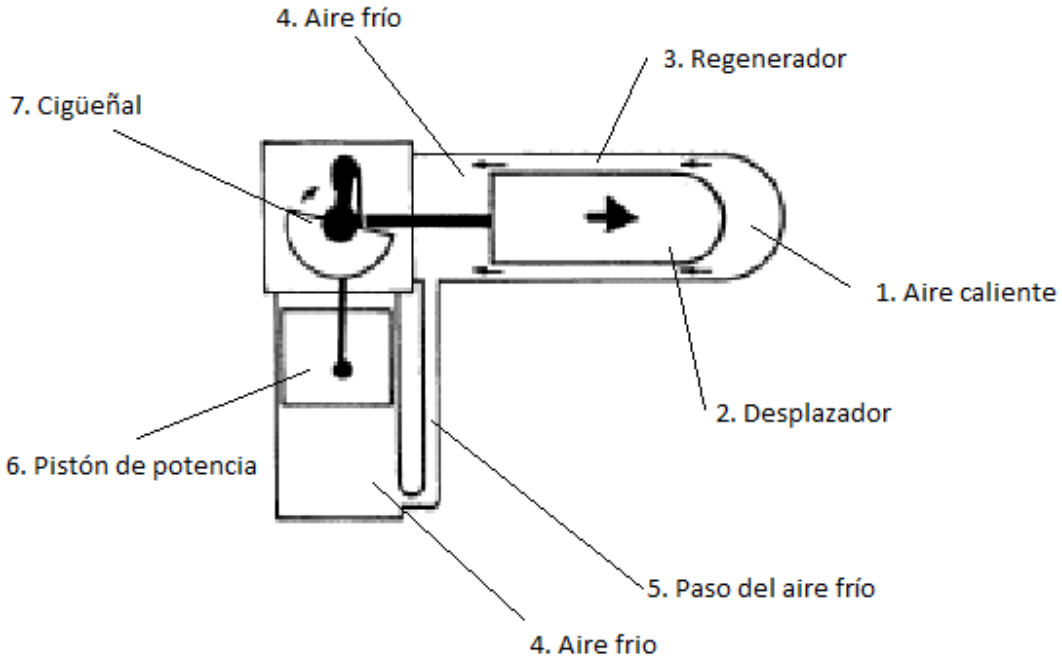


Fig. 319 Motor Stirling Gamma y sus componentes

e.2.2. Consideraciones para tener el modelo

Para obtener el modelado del motor se asume un grupo de consideraciones puntualizadas a continuación:

a. La sustancia de trabajo es gas ideal, teniendo en cuenta que el fluido de trabajo es aire u otro gas ideal y que las presiones a las que opera son relativamente bajas.

b. La masa del gas en el motor es constate, se considera un circuito cerrado.

c. Los calores específicos del gas son considerados constantes.

d. El flujo del gas a través de todos los conductos se considera unidimensional, es decir, que en cada sección transversal del flujo la velocidad es normal a la misma y las propiedades sobre ella son constantes.

e. Temperatura uniforme en todo el volumen de control.

f. La temperatura del foco frío y caliente se asumen constantes.

g. Las perdidas por fricción son despreciables, lo que significa que la presión en todo el sistema es constate.

e.2.3. Modelación del sistema

La fig. 36 muestra un esquema que sirve para el desarrollo de todas las ecuaciones del modelado.

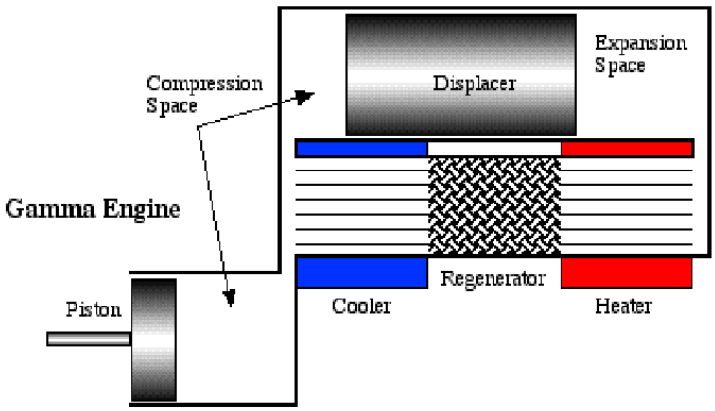


Fig. 40 Motor Stirling Gamma

Se empieza planteando ecuaciones correspondientes al volumen frío $V_{C\ y}$ al volumen caliente V_H.

$$V_C^{MAX} = V_{dc} + \frac{1}{2}V_s(1 + \cos\varphi) \quad (1.1)$$

$$V_H^{MAX} = V_{dH} + \frac{1}{2}V_s(1 + (\cos(\varphi + 90) \quad (1.2)^7$$

El volumen desplazado total:

$$V_s = V_C^{MAX} + V_H^{MAX} \quad (1.3)$$

El volumen muerto del motor V_d viene determinado por la suma de todos los volúmenes muertos del motor:

$$V_d = V_{dC} + V_{dH} + V_R \quad (1.4)$$

Los términos $V_{dC}\ y\ V_{dH}$ representan al espacio muerto de la zona fría y caliente respectivamente, y es el fluido de trabajo que no participa en los procesos realizados por el fluido de trabajo común cuando el motor se encuentra en funcionamiento, el término V_R representa al espacio muerto existente en el regenerador.

En la interpretación de las ecuaciones es evidente la variación de los volúmenes barridos en el motor y su relación con el ángulo de variación del cigüeñal, además se observa la presencia del desfase de 90º que es el que permite que el motor pueda realizar su función, la fig. 37 muestra la variación de los volúmenes y su relación con el ángulo formado por el cigüeñal en su comportamiento habitual.

[7] $V_C^{MAX} = V_H^{MAX}$ Es el volumen desplazado en cada cilindro

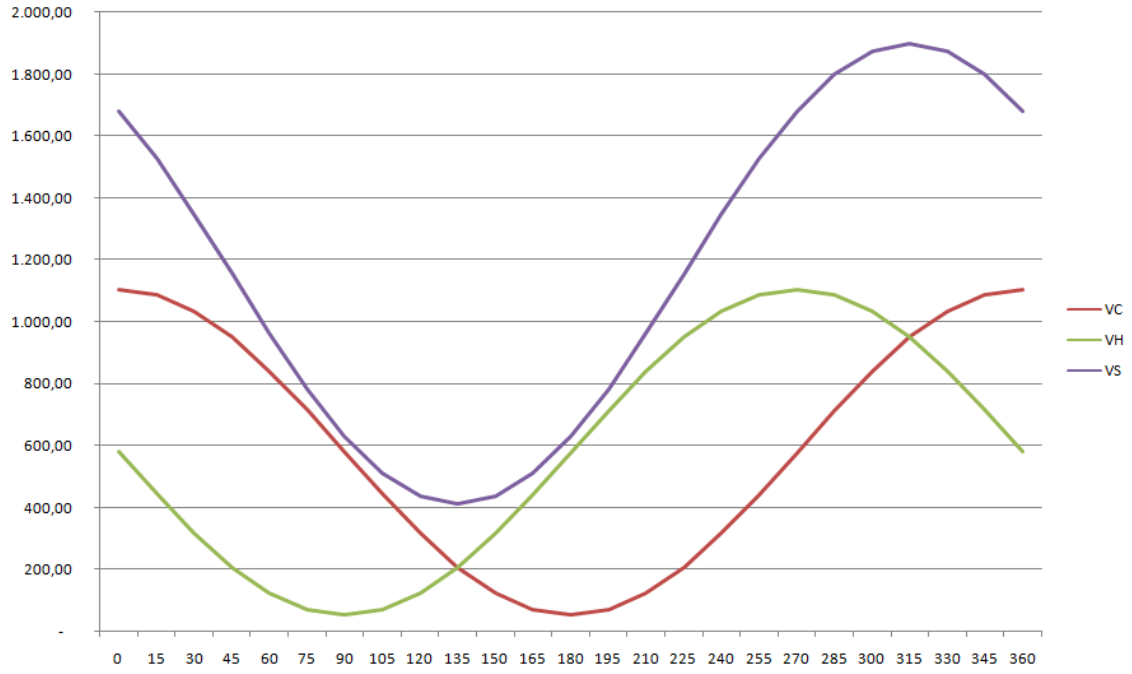


Fig. 41 Variación del volumen con relación al giro del cigüeñal

El modelo físico – matemático del motor se desarrolla dividiéndolo por regiones. De lo que se ha decidido dividir al motor en tres sectores o regiones:

a. Zona fría, todo lo concerniente al espacio del aire frío y al enlace con el regenerador de la zona fría.

b. Zona de regeneración

c. Zona caliente, lo concerniente al espacio del aire caliente y al enlace de la parte caliente con el regenerador.

El sistema del motor es cerrado, pero para la modelación se ha dividido en N volúmenes debido a que el fluido de trabajo se encuentra circulando de un lado a otro durante la ejecución del ciclo.

El volumen 1 y el volumen N son volúmenes variables y corresponde con el volumen barrido del cilindro frío y el cilindro caliente, respectivamente. En la región del regenerador también se subdivide en volúmenes de control con índices que van desde m hasta r. La tercera región corresponde a los enlaces entre el regenerador y los volúmenes variables de expansión y compresión. Estos volúmenes de enlace son volúmenes constantes y corresponden con los volúmenes fríos con índices desde i=2 hasta m – 1 y los calientes con índices desde r+1 hasta N-1. En la tabla 5 y en la fig. 39 se nuestra una distribución de los volúmenes por regiones.

Tabla 5 Volúmenes distribuidos para cada zona de control del motor

Volumen frío variable	i=1
Volumen constante (enlace fío)	2 : m - 1
Regenerador	m : r
Volumen constante (enlace caliente)	r + 1 : N - 1
Volumen caliente variable	i = N

Fuente: El Autor

En la zona fría existen dos volúmenes de control uno que es variable y corresponde al volumen barrido por el pistón y el espacio muerto y el segundo es el volumen constante que se encuentra en el tubo de enlace del regenerador, lo mismo ocurre en la zona caliente. En el regenerador todos los volúmenes son constantes, cabe indicar que los volúmenes de control los fijan quienes realizan el modelo, pero en la parte del

regenerador dicho volumen tienen que ser mayor a 3 para poder garantizar que se pueda tomar el efecto de regeneración de otra manera solo se verá un salto térmico.[8]

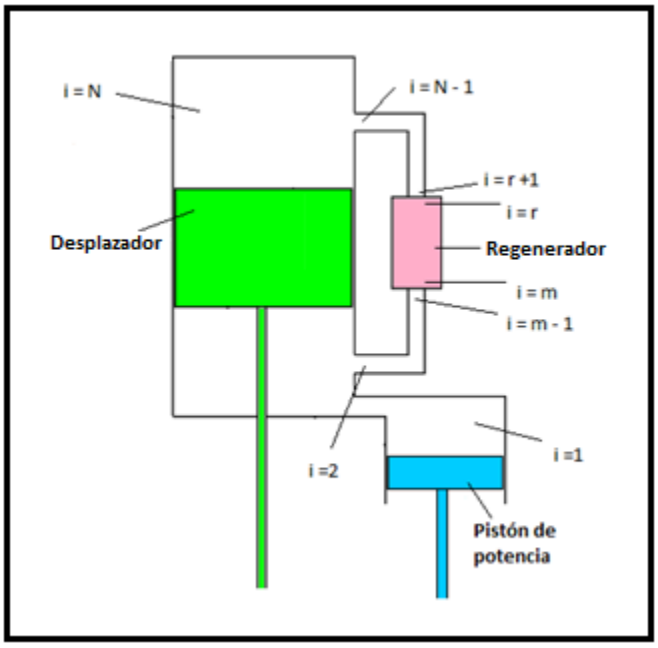


Fig. 42 Distribución gráfica de los volúmenes de control en el motor Stirling Gamma

e.2.3.1.Modelado del volumen de control variable de la zona fría

Para esta modelación matemática se comenzara por la zona fría pues se puede comenzar de la zona caliente sin ningún problema, pero por referencias y por decisión del modelador se comenzará por la zona fría, por ende el volumen de control variable i = 1.

En la fig. 40 se muestra en detalle el flujo de masa y la energía para el volumen variable de la zona fría i = 1.

[8] Antes de ir más lejos en este modelado es preciso indicar que la referencia literaria utilizada en este modelado es la tesis de "modelación matemática y simulación de un motor tipo alfa", realizada en cuba cuyo autor es el señor Michel Batista Castillo del instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría

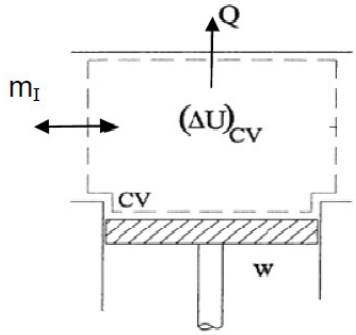


Fig. 43 Esquema del flujo de masa y de energía para el volumen de control i = 1

Como este volumen de control es variable existe intercambio de trabajo entre las fronteras, además de la posibilidad de intercambio de masa con el volumen de control i = 2.

Para obtener el modelo de este volumen las ecuaciones fundamentales son las de conservación de la energía, que no es sino la aplicación de la primera ley de la termodinámica, la ecuación de estado y el balance de masa.

$$\Delta U_1 = \dot{Q}_1 \Delta t - W_1 - \dot{m}_1 h_1 \Delta t \qquad (1.5)$$

Donde:

$\boldsymbol{\Delta U_1}$ → Variación de la energía.

$\boldsymbol{W_1}$ → Trabajo intercambiado

$\boldsymbol{m_1 h_1}$ → Energía que porta el fluido que entra y sale en cada instante de tiempo.

Como es conocido:

$U_1 = m_1 \mu_1$ → Variación de energía (1.6)

$\mu_1 = c_V T_1$ → Energía interna específica (1.7)

$h = c_p T$ → Entalpía (1.8)

$W_1 = p_1 \Delta V_c = p_1 A_c \Delta X_c$ → Trabajo intercambiado (1.9)

$Q_1 = k_c A_1 (T_1 - T_{fc}) \Delta t$ → Calor intercambiado (1.10)

Sustituyendo los términos en la ecuación 1.5 tenemos:

$$\Delta(m_1 c_V T_1) = -k_c A_1 (T_1 - T_{fc}) \Delta t - p_1 A_c \Delta X_c - \dot{m}_I c_p T_I \Delta t \quad (1.11)$$

Hay que tener en cuenta que el flujo másico $\dot{m}_I$ que entra o sale del volumen de control depende del sentido de movimiento de gas en el motor, por lo que es necesario establecer una regla de signos:

$\dot{m}_I = \dot{m}_{12} > 0$ → Si el flujo sale del volumen 1 y entra en el volumen 2.

$\dot{m}_I = \dot{m}_{21} < 0$ → Si el Flujo sale del volumen 2 y entra en volumen 1.

Dividiendo la ecuación 1.11 para un Δt consideramos:

$$\frac{\Delta(m_1 c_V T_1)}{\Delta t} = -k_c A_1 (T_1 - T_{fc}) - p_1 \frac{\Delta V_C}{\Delta t} - \dot{m}_I c_p T_I \quad (1.12)$$

Pasando de incrementos finitos de tiempo a incrementos diferenciales tenemos:

$$c_V T_1 \frac{dm_1}{dt} + c_V m_1 \frac{dT_1}{dt} = -k_c A_1 (T_1 - T_{fc}) - p_1 \frac{dV_C}{dt} - \dot{m}_I c_p T_I \quad (1.13)$$

Es evidente indicar que el balance de masas del volumen muestra que la variación de masa en el volumen de control en el tiempo es igual al flujo que sale o entra en el mismo.

$$\dot{m}_I = -\frac{dm_1}{dt}$$

(1.14)

Resalta ser necesario una regla o convención de signos para T_I:

$T_I = T_1 \rightarrow$ Si $\dot{m}_I > 0$

$T_I = T_2 \rightarrow$ Si $\dot{m}_I < 0$

Remplazando loa ecuación 1.14 en la ecuación 1.13 tenemos:

$$c_V m_1 \frac{dT_1}{dt} = -k_c A_1 (T_1 - T_{fc}) - p_1 \frac{dV_C}{dt} - \dot{m}_I c_p T_I + \dot{m}_I c_V T_1 \quad (1.15)$$

Conociendo que:

$$c_p = c_v + R$$

La ecuación 1.15 resulta:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_V m_1}\left(-k_c A_i (T_i - T_{fc}) - p_i \frac{dV_C}{dt} + \dot{m}_I c_v (T_i - T_I) - \dot{m}_I R T_I\right) \quad (1.16)$$

Considerando que como información adicional sobre este volumen de control tenemos la ecuación de estado y de la variación que toma en cuenta la variación del volumen con relación al tiempo a partir de la cinemática del pistón:

$$m_1 = \frac{P_1 V_1}{R T_1} \quad (1.17)$$

$$\frac{d\,V_C}{dt} = \frac{1}{2} V_S (-\sin\varphi) \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.18)$$

e.2.3.2.Modelación de los volúmenes de control frío de la región de enlace

Para realizar esta modelación se toma como muestra i = 2 y luego se generaliza para todos los volúmenes de esta región. El procedimiento a seguir es el mismo que para el volumen anterior marcándose la diferencia por el esquema de la figura 7 que indica los movimientos de masa y de calor en dicho volumen.

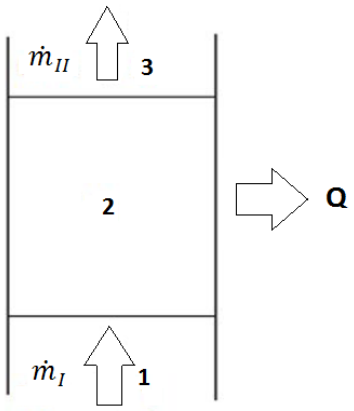


Fig. 324 Flujo de masa y energía en el volumen de control i =2

Considerando que no existe trabajo en las fronteras debido a que todos los volúmenes que ingresan a esta zona son constantes, por lo que en la ecuación de balance de energía este término no aparece. Otra característica de estos volúmenes es que siempre sale y entran hacia sus vecinos tanto i = 1 como i = N, en los cuales solo entra o sale el fluido de trabajo.

Cabe anotar:

$W = \int pdv$ Conocido es el hecho de que el volumen es constante lo que trae como consecuencia de que $W = 0$

Para desarrollar el balance de energía en este volumen es necesario establecer una regla de signos para el flujo másico que además debe ser congruente con la establecida anteriormente para el volumen de control i =1:

$$\dot{m}_{II} = \dot{m}_{23} > 0 \; T_{II} = T_2$$

$$\dot{m}_{II} = \dot{m}_{32} < 0 \; T_{II} = T_3$$

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{12} > 0 \; T_I = T_1$$

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{21} < 0 \; T_I = T_2 \tag{1.19}$$

Aplicando la ecuación de la conservación de la energía al volumen de control i=2 tenemos:

$$\Delta U_2 = \dot{Q}_2 \Delta t + \left(\dot{m}_I c_p T_I - \dot{m}_{II} c_p T_{II}\right) \tag{1.20}$$

Remplazando como en el volumen de control i=1 tenemos:

$$\frac{d(m_2 c_V T_2)}{dt} = -k_2 A_2 \left(T_2 - T_{fc}\right) + \dot{m}_I c_p T_I - \dot{m}_{II} c_p T_{II} \tag{1.21}$$

Organizando el término de la izquierda tenemos:

$$c_V T_2 \frac{dm_2}{dt} + c_V m_2 \frac{dT_2}{dt} = -k_2 A_2 \left(T_2 - T_{fc}\right) + \dot{m}_I c_p T_I - \dot{m}_{II} c_p T_{II} \tag{1.22}$$

El balance de masa en el volumen de control i=2 resultaría:

$$\frac{dm_2}{dt} = \dot{m}_I - \dot{m}_{II} \tag{1.23}$$

Sustituyendo el balance de masa en la ecuación 1.22 resulta:

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{c_V m_2}\left\{-k_2 A_2 \left(T_2 - T_{fc}\right) + \dot{m}_I c_p T_I - \dot{m}_{II} c_p T_{II} - c_V T_2 \dot{m}_I + \dot{m}_{II} c_V T_2\right\} \tag{1.22}$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{c_V m_2}\{-k_2 A_2(T_2 - T_{fc}) + \dot{m}_I c_v (T_I - T_2) - \dot{m}_I R T_I + c_V (T_2 - T_{II})\dot{m}_{II} - \dot{m}_{II} R T_{II}\} \quad (1.23)$$

e.2.3.3.Generalización del modelo para los volúmenes de enlace de la zona fría de i=2 hasta i=m-1

Considerar nos queda que los volúmenes concernientes a este enlace son de la misma forma que el volumen de control i=2, por lo tanto la ecuación de estado sería la misma y únicamente sería necesario modificar el índice correspondiente a cada volumen para expresarla. Por lo que la ecuación de estado resulta generalizada así:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_V m_i}\{-k_i A_i(T_i - T_{fc}) + \dot{m}_{I-1} c_v (T_{I-1} - T_i) - \dot{m_{I-1}} R T_{I-1} + c_V (T_i - T_I)\dot{m}_I - \dot{m}_I R T_I\} \quad (1.24)$$

La regla de signos para los flujos se mantiene igual y las temperaturas se mantienen iguales a las tratadas para el volumen de control i=2 y solo se generaliza el empleo de subíndices:

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{i(i+1)} > 0 \; T_I = T_i$$

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{i(i+1)} < 0 \; T_I = T_{i+1}$$

$$\dot{m}_{I-1} = \dot{m}_{i(i-1)} > 0 \; T_{I-1} = T_{i-1}$$

$$\dot{m}_{I-1} = \dot{m}_{i(i-1)} < 0 \; T_{I-1} = T_i \quad (1.25)$$

El balance de masas generalizado resulta:

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_{I-1} - \dot{m}_I \quad (1.26)$$

e.2.3.4.Generalización del modelo para los volúmenes de enlace de la zona caliente de i=r+1 hasta i=N-1

El tratamiento de estos volúmenes es similar al realizado en la zona fría lo único que cambia es que ellos toman calor del foco caliente por lo que la ecuación de esta es la misma

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_V m_i}\{-k_i A_i(T_i - T_{fh}) + \dot{m}_{I-1} c_v (T_{I-1} - T_i) - \dot{m_{I-1}} R T_{I-1} + c_V (T_i - T_I)\dot{m}_I - \dot{m}_I R T_I\} \quad (1.27)$$

El convenio de signos se mantiene igual que el tratado en la zona fría:

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{i(i+1)} > 0 \; T_I = T_i$$

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{i(i+1)} < 0 \; T_I = T_{i+1}$$

$$\dot{m}_{I-1} = \dot{m}_{i(i-1)} > 0 \; T_{I-1} = T_{i-1}$$

$$\dot{m}_{I-1} = \dot{m}_{i(i-1)} < 0 \; T_{I-1} = T_i \quad (1.28)$$

Y el balance de masas también es el mismo:

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_{I-1} - \dot{m}_I \quad (1.29)$$

e.2.3.5.Modelación de los volúmenes de control en el regenerador de i = m hasta i = r

El regenerador al igual que los demás volúmenes de control se divide en regiones que van desde r – m, pero merece un análisis especial, puesto que no solo se debe realizar un balance de masas y energía del volumen, sino que también debe considerarse el balance de energía en la matriz de regenerador, es decir en el sólido poroso que intercambia energía con el fluido de trabajo.

Por lo que en este volumen de control se hace necesario tener dos balances de energía, uno que es el del fluido de trabajo y otro que es el del sólido poroso intercambiador de energía.

Para los volúmenes de control en el regenerador que van desde i = m hasta i = r, teniendo en cuenta que el fluido de trabajo cambia en las ecuaciones únicamente la fuente de absorción de energía que en este caso no es ni el foco caliente y ni mucho menos el foco frío, en realidad se trata de la temperatura del sólido poroso intercambiador de energía.

Lo expresado anteriormente se ve con mayor claridad con la asistencia de la fig.42 que es la que presenta esquemáticamente la energía y la masa expuestas en este volumen de control.

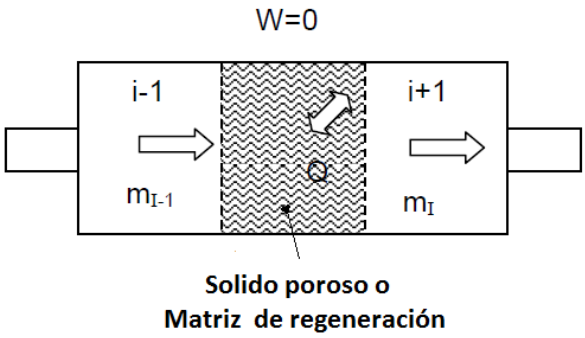


Fig. 335 Esquema del flujo de energía y masa en el volumen de control i = m hasta i =r

El balance de energía queda constituido en la siguiente ecuación:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_V m_i}\{-k_i A_i(T_i - T_{MI}) + \dot{m}_{I-1} c_v (T_{I-1} - T_i) - \dot{m_{I-1}} R T_{I-1} + c_V (T_i - T_I)\dot{m}_I - \dot{m}_I R T_I\} \quad (1.30)$$

Donde:

$T_{MI}\rightarrow$ Temperatura de la matriz del regenerador.

El balance de masas es:

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_{I-1} - \dot{m}_I \tag{1.31}$$

El balance de energía formado por la matriz del elemento i queda de la siguiente manera:

$$\frac{dT_{MI}}{dt} = \frac{1}{c_{MI}m_{MI}}\{-k_i A_i (T_i - T_{MI})\} \tag{1.32}$$

e.2.3.6.Modelación del volumen de control caliente i = N

Este modelo es el mismo presentado para el volumen de control del foco frío con la diferencia de que la temperatura proviene del foco caliente a demás el sentido es contrario puesto que el calor no abandona el sistema si no que ingresa al mismo en la figura 9 se observa un esquema de lo anteriormente descrito.

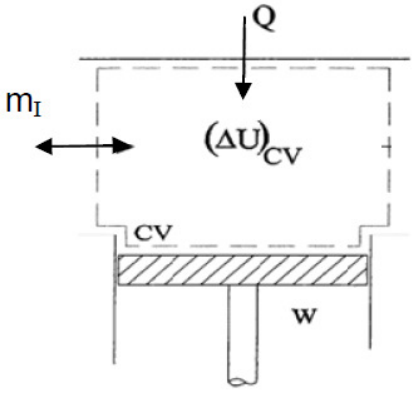


Fig. 346 Esquema del flujo de masa y energía en el volumen de control de la zona caliente i = N

$$c_V T_i \frac{dm_i}{dt} + c_V m_i \frac{dT_i}{dt} = -k_h A_h (T_1 - T_{fh}) - p_1 \frac{dV_h}{dt} - \dot{m}_{I-1} c_p T_{I-1} \quad (1.33)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_V m_i}\left(-k_h A_h (T_i - T_{fh}) - p_i \frac{dh}{dt} + \dot{m}_{I-1} c_v (T_{I-1} - T_i) - \dot{m}_{I-1} R T_{I-1}\right) \quad (1.34)$$

La regla de los signos aplicados al volumen de control de la zona caliente i = N es:

$$\dot{m}_{I-1} = \dot{m}_{i(i-1)} > 0 \rightarrow T_{I-1} = T_{i-1}$$

$$\dot{m}_{I-1} = \dot{m}_{i(i-1)} < 0 \rightarrow T_{I-1} = T_i \quad (1.35)$$

El balance de masas para el volumen de control i = N resulta:

$$\dot{m}_{I-1} = \frac{dm_i}{dt} \quad (1.36)$$

e.2.4. Modelación dinámica del motor Stirling tipo Gamma en v

Para realizar la modelación dinámica del motor se ve necesario aplicar la segunda ley de Newton aplicada a cada uno de los elementos que caracterizan el movimiento del motor, es decir, al pistón vertical, al pistón horizontal y al eje del motor:

Pues es necesario recordar que la segunda ley de Newton se expresa:

$$\boldsymbol{F = m\alpha} \quad (2.1)$$

e.2.4.1.Ecuaciones que rigen el movimiento del pistón vertical

En la figura 44 se muestra un esquema de la cinemática característica del pistón vertical para poder desarrollar su modelo dinámico.

$$\sum \boldsymbol{F} = \boldsymbol{m_p} \frac{\boldsymbol{d^2x}}{\boldsymbol{dt^2}} \tag{2.2}$$

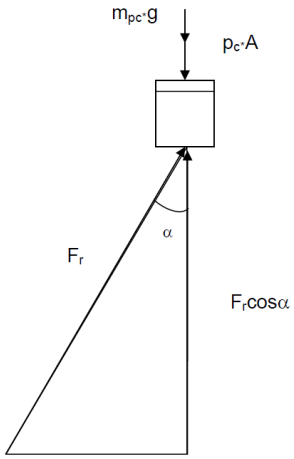


Fig. 357 Cinemática del pistón vertical

Sustituyendo las fuerzas aplicadas al pistón tenemos:

$$\boldsymbol{m_p} \frac{\boldsymbol{d^2x}}{\boldsymbol{dt^2}} = \boldsymbol{F_r} \cos \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{p_c A_c} - \boldsymbol{m_p g} \tag{2.3}$$

Despejando $\boldsymbol{F_r}$ tenemos:

$$\boldsymbol{F_r} = \frac{\boldsymbol{m_p} \frac{\boldsymbol{d^2x}}{\boldsymbol{dt^2}} + \boldsymbol{p_c A_c} + \boldsymbol{m_p g}}{\cos \boldsymbol{\alpha}} \tag{2.4}$$

Considerando que al desplazamiento del pistón lo podemos expresar de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{X_p} = \frac{\boldsymbol{X_{max}}}{\mathbf{2}} (\mathbf{1} + \cos \boldsymbol{\varphi}) \tag{2.5}$$

$$\boldsymbol{R} = \frac{\boldsymbol{X_{pmax}}}{\mathbf{2}} \tag{2.6}$$

Donde:

R → El radio de giro o punto de unión de la manivela y el eje del motor.

La velocidad del pistón en función del ángulo de giro queda:

$$\frac{dX_p}{dt} = \frac{X_p}{d\varphi}\frac{d\varphi}{dt} \tag{2.7}$$

Lo que derivando nos daría como resultado la expresión de la aceleración:

$$\frac{dX_p}{dt} = -R[(\sin\varphi)]\frac{d\varphi}{dt}$$

$$\frac{dX_p}{dt} = \frac{d^2X_p}{d\varphi^2}\frac{d\varphi}{dt} + \frac{dX_p}{d\varphi}\frac{d\varphi^2}{dt^2}$$

$$\frac{d^2X_p}{dt^2} = -R[(\cos\varphi)]\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - R[(\sin\varphi)]\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{2.8}$$

Analizando la geometría del pistón tenemos que:

$$\sin\alpha = \frac{R}{L}\cos\varphi \tag{2.9}$$

$$\cos\alpha = \left[1 - \frac{R^2}{L^2}\cos^2\varphi\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.10}$$

Remplazando las ecuaciones 2.8 y 2.10 en la ecuación 2.4 tenemos:

$$F_r = \frac{m_p\left(-R[(\cos\varphi)]\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - R[(\sin\varphi)]\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) + p_cA_c + m_pg}{\left[1-\frac{R^2}{L^2}\cos^2\varphi\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.11}$$

Lo que nos demuestra que la F_r en el pistón de desplazamiento vertical está en función de la presión en el interior del motor p_c y del ángulo de giro de cigüeñal φ, es decir, $F_r = f(\varphi, p_c)$

e.2.4.2.Ecuaciones que rigen el movimiento del pistón horizontal

En la figura 45 se muestra la cinemática del pistón horizontal que servirá de análisis para el modelado dinámico del mismo:

$$\sum \boldsymbol{F} = \boldsymbol{m_p} \frac{\boldsymbol{d^2x}}{\boldsymbol{dt^2}} \tag{2.2}$$

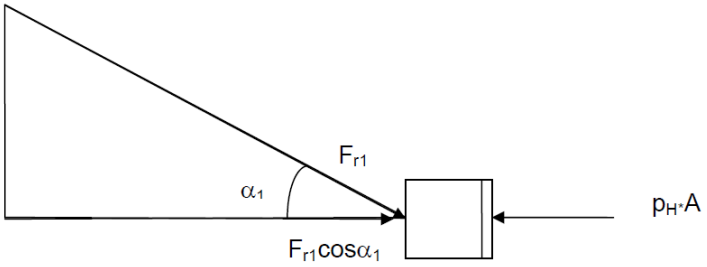


Fig. 368 Cinemática del pistón horizontal

Sustituyendo las fuerzas aplicadas al pistón tenemos:

$$\boldsymbol{m_p} \frac{\boldsymbol{d^2x}}{\boldsymbol{dt^2}} = \boldsymbol{F_{r_1}} \cos \boldsymbol{\alpha_1} - \boldsymbol{p_c A_c} \tag{2.12}$$

Despejando $\boldsymbol{F_r}$ tenemos:

$$\boldsymbol{F_{r_1}} = \frac{\boldsymbol{m_p} \frac{\boldsymbol{d^2x}}{\boldsymbol{dt^2}} + \boldsymbol{p_c A_c}}{\cos \boldsymbol{\alpha_1}} \tag{2.13}$$

Considerando que al desplazamiento del pistón lo podemos expresar de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{X_h} = \frac{\boldsymbol{X_{hmax}}}{\boldsymbol{2}} (\boldsymbol{1} + \cos(\boldsymbol{\varphi} + \boldsymbol{90})) \tag{2.14}$$

$$\boldsymbol{R} = \frac{\boldsymbol{X_{hmax}}}{\boldsymbol{2}} \tag{2.15}$$

La velocidad del pistón en función del ángulo de giro queda:

$$\frac{dX_h}{dt} = \frac{X_h}{d\varphi}\frac{d\varphi}{dt} \tag{2.16}$$

Lo que derivando nos daría como resultado la expresión de la aceleración:

$$\frac{dX_h}{dt} = -R[(\sin(\varphi + 90))]\frac{d\varphi}{dt}$$

$$\frac{dX_h}{dt} = \frac{d^2X_h}{d\varphi^2}\frac{d\varphi}{dt} + \frac{dX_h}{d\varphi}\frac{d\varphi^2}{dt^2}$$

$$\frac{d^2X_h}{dt^2} = -R[(\cos(\varphi + 90))]\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - R[(\sin(\varphi + 90))]\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{2.17}$$

Analizando la geometría del pistón tenemos que:

$$\sin\alpha_1 = \frac{R}{L}\sin\varphi \tag{2.18}$$

$$\cos\alpha_1 = \left[1 - \frac{R^2}{L^2}\sin^2\varphi\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.19}$$

Remplazando las ecuaciones 2.17 y 2.19 en la ecuación 2.13 tenemos:

$$F_{r_1} = \frac{m_p\left(-R[(\cos(\varphi+90))]\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - R[(\sin(\varphi+90))]\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) + p_c A_c}{\left[1-\frac{R^2}{L^2}\sin^2\varphi\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.20}$$

Lo que nos permite manifestar que F_{r_1} también es función de la presión interna del motor p_c y del ángulo de giro del cigüeñal φ, es decir, $F_{r_1} = f(\varphi, p_c)$.

e.2.4.3.Ecuaciones que rigen el movimiento rotacional del eje del motor

Como para los pistones utilizamos la segunda ley de Newton arreglada para el análisis rotacional del eje, a demás en la figura 46 se muestra un esquema de la cinemática del eje.

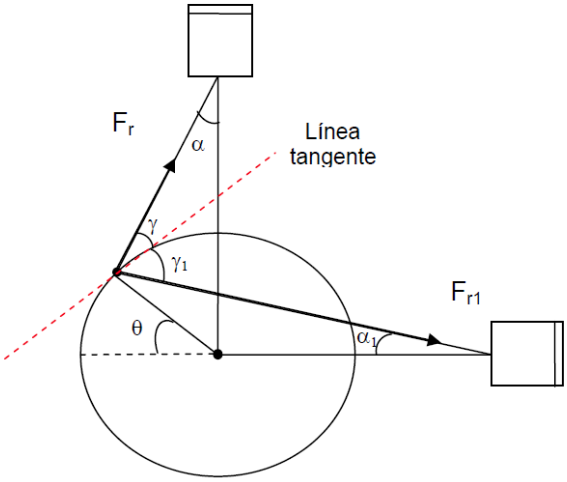


Fig. 379 Cinemática del eje del motor

$$\sum T = I\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{2.21}$$

Analizando el esquema de fuerzas tenemos:

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \boldsymbol{F_r R\cos\gamma + F_{r_1} R\cos\gamma_1 - K\frac{d\varphi}{dt}} \tag{2.22}$$

Sustituyendo los valores de $\boldsymbol{F_r}$ y $\boldsymbol{F_{r_1}}$ en la ecuación 2.22 tenemos:

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{m_p\left(-R[(\cos\varphi)]\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - R[(\sin\varphi)]\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) + p_c A_c + m_p g}{\left[1-\frac{R^2}{L^2}\cos^2\varphi\right]^{\frac{1}{2}}} R\cos\gamma + \frac{m_p\left(-R[(\cos(\varphi+90))]\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - R[(\sin(\varphi+90))]\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) + p_c A_c}{\left[1-\frac{R^2}{L^2}\sin^2\varphi\right]^{\frac{1}{2}}} R\cos\gamma_1 - K\frac{d\varphi}{dt} \quad (2.23)$$

e.3. Materiales

Los materiales utilizados en la realización del presente trabajo de tesis, van desde materiales de escritorio, hasta grandes hornos fundidores de hierro, en fin han sido muchos y muy diversos los cuales se detallan a continuación:

Tabla 6 Materiales utilizados en el trabajo de tesis

Materiales	**Usos**
Materiales de escritorio:	
Papel	Tomar apuntes, realizar cálculos, crear borradores de documentos
Lápices	Tomar apuntes, realizar cálculos, crear borradores de documentos
Bolígrafos	Tomar apuntes, realizar cálculos, crear borradores de documentos
Libros	Realizar consultas, comprobar datos obtenidos, obtener datos verdaderos
Computadora	Realizar borradores, documentos finales, modelación, etc.
Calculadora	Realizar cálculos
Borrador	Corregir errores
Corrector	Corregir errores
Compas	Realizar graficas del motor
Reglas	Realizar graficas del motor
Materiales de taller mecánico:	
Amolador	Trozar piezas
Esmeril	Limpiar y pulir superficies
Torno	Crear pieza
Taladro	Perforar piezas
Brocas	Perforar piezas
Hornos fundidores	Crear piezas
Limas	Pulir superficies

Lijas	Pulir superficies
Grasa	Lubricar la unión de las piezas
Gel sellador	Hermetizar los cilindros
Calibrador	Medir y comprobar las piezas fabricadas
Flexómetro	Medir y comprobar las piezas fabricadas
Soldadora	Crear soporte de los cilindros
Cierra de madera	Crear la base del motor, moldes para la fundición
Software:	
Microsoft Word	Crear documentos
Microsoft Excel	Realizar cálculos, crear gráficas
Microsoft PowerPoint	Realizar presentación de documentos
Pain	Editar imágenes
AutoCAD 2011	Realizar planos, graficas 3D, obtener propiedades del dibujo
Microsoft visual estudio 2008	Realizar el programa de simulación
Matlab	Realizar cálculos, graficas, etc.
Mozilla Fire Fox	Realizar consultas virtuales
Language Engineering Power Translator	Traducir documentos
MDESIGN	Diseñar y comprobar piezas
SolidDocuments	Transformar documentos
Adobe Reader 11	Leer documentos
Solidworks	Realizar graficas 3D, Simular funcionamiento
Windows Media Player	Revisar videos correspondiente a los motores

Fuente: El autor

e.4. Métodos

Para la realización del presente trabajo de tesis se utilizaron varios métodos de investigación, de los cuales se describe su nombre y la tarea en la que fueron empleados.

Para empezar con la creación de esta tesis se empezó utilizando la asistencia de una técnica de investigación como lo es la entrevista, la cual se realizó a profesionales conocedores del diseño de maquinas, para definir lo que serán los primeros pasos para la realización del trabajo de tesis.

Luego y con la ayuda de la consulta sistematizada y organizada se recolectó la información expuesta en libros y en zonas virtuales, para posteriormente analizarla, organizarla y clasificarla.

Con la información necesaria y la asistencia del método descriptivo, el método analítico y la apreciación técnica del autor, se logró enlistar los requisitos y las funciones necesarias para el diseño del motor Stirling; es decir, la determinación de los parámetros que el diseñador impondrá para la elaboración del diseño y el resultado que espera tener con dicho diseño.

Definido los parámetros de diseño, las funciones del motor y mediante la asistencia del método descriptivo, método analítico, método gráfico y el análisis matemático se realiza el primer diseño de lo que será el motor Stirling, el cual pasará previamente a revisión para poder ejecutar el diseño final.

Con la colaboración del método analítico, el método deductivo y el método descriptivo se realiza la revisión del primer diseño y se estable el diseño final del motor Stirling Gamma.

Con el diseño final establecido y con la ayuda del método analítico, el análisis matemático y el método descriptivo se realiza la modelación matemática, logrando así obtener las ecuaciones que rigen el comportamiento del motor y entender la forma en la que cada parámetro está actuando.

Con la asistencia del software Visual Estudio 2008, se realiza la simulación matemática de lo que es el motor Stirling, siendo necesario el ingreso de datos previos de diseño para obtener datos del comportamiento final del motor y un gráfica en donde se representan los cuatro puntos críticos del diagrama P – V.

Con el método analítico, el método cuantitativo y el método cualitativo, se procede a enlistar e identificar, cuantas y cuáles son las partes y piezas necesarias para la fabricación del motor.

Conociendo cuales y cuantas son las piezas que se necesitan para fabricar el motor y con la colaboración del método cuantitativo, cualitativo y experimental se procede a la fabricación y adquisición de dichas piezas.

Mediante el método experimental y contando con todas las piezas necesarias para la creación del motor se procede a ensamblarlo para poder realizar la pruebas de funcionamiento.

Con la asistencia del método experimental de procede a realizar pruebas de funcionamiento y a obtener datos para la comparación que se realiza con los datos de la simulación matemática.

Y finalmente con los datos obtenidos y con la ayuda del método comparativo y experimental se procede a la comparación de datos y a la aceptación del prototipo del motor Stirling.

f. RESULTADOS

f.1. Resultado del desarrollo de los objetivos planteados

Con la asistencia de los materiales obtenidos mediante las consultas realizadas en bibliotecas, páginas virtuales y entrevistas a profesionales conocedores del diseño mecánico, se logro establecer todos los parámetros de diseño, identificar y establecer funciones y realizar en si el diseño del motor Stirling gamma que genere 40 vatios.

En cuanto a la modelación matemática se realizo tomando en cuenta, la formula de conservación de la energía, la ecuación de estado y el balance de masa. Las cuales permitieron modelar el sistema en todos los puntos para así poder saber cuál es su comportamiento en un instante dado.

La simulación del motor Stirling se realizo con la ayuda de un software programador llamado "**Microsoft Visual Studio 2008",** el cual permitió la creación del programa llamado **"Motor Stirling Gamma",** programa que realiza los cálculos necesarios para saber con qué parámetros podemos obtener un motor Gamma de ciertas características.

La construcción del motor Stirling Gamma se realizó con éxito gracias al buen diseño realizado y al cuidado en el momento de fabricar y elaborar las piezas, los ajustes en la construcción fueron pocos, los cuales se realizaron exitosamente.

.

La guía de proceso tecnológico se realizó antes, durante y después de la fabricación del motor Stirling Gamma, la cual cuenta con todos los detalles necesarios para poder fabricar un motor Stirling Gamma en el país y con materiales accesibles.

Los datos obtenidos con el programa de simulación, están cerca a los valores obtenidos con la experimentación del motor, lo que nos expresa claramente de que la teoría se acerca a la práctica; y así convalidar el diseño del motor en mención(anexo k5).

g. DISCUSIÓN

La información para realizar el trabajo de tesis aquí presente fue amplia, redactada en varios idiomas y de fuentes muy aceptables, dicha información dejaba siempre muy presente el punto de vista de su autor, las diversas formas de realizar este tipo de motores y los inconvenientes que se presentaban al realizar los mismos; de toda la información se seleccionó lo que se consideró de mayor importancia, resaltando la parte en la que se reflejaba en si la configuración o manera de desarrollar las ecuaciones concernientes a este tipo de motores, la forma de realizar el diseño, las posibles variables que afectan el trabajo de este motor y en fin parámetros que de alguna manera ayudarían a desarrollar este trabajo de tesis.

El diseño se empieza revisando primeramente libros que hable sobre lo que es el diseño de una máquina, la forma de análisis de sus partes y la manera o punto de vista de cómo se analiza todo en conjunto, seguidamente de esto y conociendo ya de manera clara, precisa y profunda la manera de realizar un diseño mecánica, sus parte, especificaciones y funciones, se procede a realizar el análisis de los parámetros que determinan de forma influyente el funcionamiento del motor Stirling Gamma.

Posteriormente y con la ayuda del análisis matemático se determina todos los parámetros que influyen en el motor y en qué forma lo hacen, entre los más importantes, se encontraron la temperatura del foco frío y caliente, la presión, la capacidad de intercambiar el calor en el regenerador. La presión interviene de forma directa en la geometría del motor puesto que a mayor presión de llenado menor será el volumen general de las cámaras de trabajo de los cilindros, el trabajo del motor se ve afectado de manera directa por la presión; por su parte la temperatura tanto del foco frío como del foco caliente afectan de forma directa a la eficiencia y trabajo del motor; lo propio hace la capacidad de intercambiar calor de regenerador por lo que es la encargada de entregar al fluido el calor necesario para su ingreso en las diferentes cámaras de trabajo.

Con todos los parámetros del motor conocidos y establecidos se realiza en si lo que es el diseño preliminar y tras días de revisión lo que es el diseño final del motor, el mismo que será validado con la construcción del motor y reforzado con la realización de la modelación matemática y el programa de simulación.

Realizado el diseño y conociendo sus parámetros de funcionamiento se analiza la manera de realizar lo modelación matemática, llegando a la conclusión que lo mejor sería analizar todo lo que intervenía en el funcionamiento del motor, dígase de esto; balance de energía, intercambio de trabajo, intercambio de masa. Con los términos claros, conocimientos y ecuaciones necesarias se realiza el modelado del motor Stirling Gamma.

Con la ayuda del software programador denominado "**Microsoft Visual Estudio 2008",** el diseño y de la modelación matemática se crea el programa simulador denominado **"Motor Stirling Gamma"** el mismo que servirá para realizar la simulación de lo que sería el motor trabajando, permitiendo la obtención de datos para la comparación futura de los obtenidos en el diseño y en el análisis experimental del motor.

La construcción del motor se realiza luego de tener los planos de construcción productos del diseño del motor Stirling Gamma, con los planos impreso se procede a enlistar los componentes necesarios para la fabricación del motor, y posteriormente a la creación de dicha lista vendría lo que será el análisis de las parte que se pueden obtener en el mercado común, y las partes que se tendría que fabricar.

Teniendo las listas de piezas que serán compradas y piezas que serán fabricadas se procede de forma inmediata a la obtención de la mismas para posteriormente lograr el ensamblaje del motor.

Con el motor ensamblado y revisado una y otra vez se procede a las pruebas de funcionamiento para verificar el estado del mismo y recolectar datos que servirán para la validación del diseño. Conjuntamente con la fabricación de piezas, ensamblaje del motor pruebas de funcionamiento se realiza el proceso tecnológico que explica cual es el procedimiento a seguir para realizar la fabricación de un motor de este tipo, analizados, completados, y verificado la ejecución de todos los objetivos se culmina el trabajo experimental de tesis.

g.1. Valoración técnica económica

En las tablas 7, 8, 9, 10 y 11 expuestas a continuación se exponen los gastos realizados en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Tabla 7 Gastos del diseño de la investigación

Denominación	Cantidad	Tiempo (h)	Valor ($)	Total Unitario
Internet	1	100	0.5	50
Copias e Impresiones	1000	80	0.05	50
Diseño	2	300	20	40
Materiales de oficina y otros	50	30	1	50
Transporte	100	50	0.25	25
			Total	215

Fuente: El autor

Tabla 8 Gastos del diseño del motor Stirling Gamma

Denominación	Cantidad	Tiempo (h)	Valor ($)	Total Unitario
Internet	1	300	0.5	150
Copias e Impresiones	2000	100	0.05	100
Diseño	2	500	100	200
Materiales de oficina y otros	100	60	1	100
Transporte	400	200	0.25	100
			Total ($)	650

Fuente: El autor

Tabla 9 Gatos del la modelación matemática del motor Stirling

Denominación	Cantidad	Tiempo (h)	Valor ($)	Total Unitario
Internet	1	400	0.5	200
Copias e Impresiones	1000	100	0.05	50
Modelado	1	500	200	200
Materiales de oficina y otros	100	60	1	100
Transporte	400	200	0.25	100
			Total ($)	650

Fuente: El autor

Tabla 10 Gastos de la construcción del motor Stirling Gamma

Denominación	Cantidad	Tiempo (h)	Valor ($)	Total Unitario
Fabricación de cilindros	2	1200	175	350
Pistones	2	5	20	40
Bielas y accesorios	20	100	6	120
Cigüeñal	1	150	20	20
Volante de Inercia	1	200	25	25
Resto de piezas del motor	30	400	10	300
Impresiones	20	500	5	100
Transporte	400	200	0.25	100
			Total ($)	1055

Fuente: El autor

Tabla 11 Resumen de gastos del trabajo de tesis

Denominación	Cantidad	Tiempo (h)	Valor ($)	Total Unitario
Diseño del proyecto	1	560	215	215
Diseño del motor Stirling Gamma	1	1160	650	650
Modelación del motor Stirling Gamma	1	1260	650	650
Construcción del motor Stirling Gamma	1	2752	1055	1055
Otros	1	1000	500	500
			Total ($)	3070

Fuente: El autor

g.2. Valoración ambiental

Con el desarrollo del proyecto de tesis se logra brindar una alternativa a muchos problemas, el principal una fuente alternativa que sirva para la generación de energía eléctrica, energía mecánica y otras, con un bajo índice de contaminación ambiental, el cual puedes reducir a un mínimo con el uso de energías limpias, como lo son: la energía solar, la eólica, la geotérmica y otras.

El impacto creado por la presencia del motor es mínimo, puesto que es muy compacto y no crea mayor interferencia, su funcionamiento es silencioso, por lo que el ruido no es un impacto creado por él, el funcionamiento se realiza con combustión externa por lo que se pueden controlar los contaminantes enviados a las atmosfera, como se expreso en el párrafo anterior, también se utiliza para su funcionamiento la energía solar, la energía geotérmica (en todos los casos la energía eólica para enfriar el motor) que permiten la reducción de contaminantes al ambiente obteniendo de esta manera un impacto ambiental mínimo.

h. CONCLUSIONES

Se concluye en lo siguiente:

- ❖ Se ha logrado cumplir con los objetivos de este trabajo de tesis al diseñar, modelar y construir un motor Stirling Gamma.

- ❖ Se logró saber cuáles son los parámetros que influyen directamente en el funcionamiento de estos tipos de motores, dichos parámetros son la temperatura del foco frío y caliente, la presión de llenado, las revolución por minuto y el volumen de la cámara de expansión.

- ❖ Se logró reunir una gran cantidad de información que sirvió para la realización del diseño del motor Stirling Gamma.

- ❖ Con la utilización de los principios básicos de la Termodinámica, la Mecánica de los Fluidos, la Transferencia de Calor y las leyes de la Mecánica se obtuvo el modelo matemático del motor Stirling Gamma(Materiales y métodos, sección e.2.).

- ❖ Partiendo del diseño, la modelación matemática y con la ayuda del software Microsoft Visual 2008, se logró realizar el programa de simulación del motor Stirling Gamma.

- ❖ El uso del programa de simulación permite, variando los diferentes parámetros y condiciones iníciales establecidas, el análisis del funcionamiento del motor antes de ser construido

- ❖ Se puede realizar estos motores en el país ya que no requieren de una muy avanzada tecnología. (para motores de baja potencia)

- ❖ El motor Stirling Gamma es la alternativa ideal para aplicaciones de baja potencia (en un rango de 0-4kw), que busque el decrecimiento de la contaminación ambiental, y que requieran de un bajo ruido de funcionamiento.

- ❖ La mejor opción para la generación de energía eléctrica en lugares en donde no llegan las redes de electrificación pública.

- ❖ Se logró la realización del proceso tecnológico del motor(Anexo K2).
- ❖ Se pudo obtener los datos experimentales y los datos productos de la simulación para poder realizar la comparación de los mismos y establecer el error relativo y la variación porcentual (Anexo K5).

i. RECOMENDACIONES

- Emplear el motor como elemento demostrativo para las clases de la disciplina de Energías alternativas.

- Aplicar las experiencias de este trabajo en el diseño de máquinas Stirling tipo γ de mayor potencia.

- Realizar el estudio considerando las pérdidas de presión en el sistema y la utilización del software, elaborado para realizar la simulación de los motores de Stirling Gamma antes de ser construidos, pues facilita la obtención de datos que validen la construcción del mismo.

- Tener claro los conceptos de fabricación de maquinas y una ligera experiencia en este tipo de campo para poder intuir lo que pasaría en ciertos momentos de la fabricación.

- Buscar información práctica de estos motores antes de entrar en su diseño y construcción

j. BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- Blank DA, Wu C. Finite-time power limit for solar-radiant Ericsson engines in space applications. Appl Therm Eng 1998; 18: 1347–57.
- Blank DA, Wu C. Power optimization of an extra-terrestrial, solar-radiant Stirling heat engine. Energy 1995; 20(6): 523–30.
- Blank DA, Wu C. Power potential of a terrestrial solar-radiant Stirling heat engine. Int J Ambient Energy 1994; 15 (3): 131–9.
- Blank DA. Universal power optimized work for reciprocating internally reversible Stirling-like heat engine cycles with regeneration and linear external heat transfer. J Appl Phys 1998; 84 (5): 2385–92.
- Chuse, R y Carson, B (1992). Recipientes de presión, el código de ASME simplificado. Capítulo 1, historia del código de ASME. Graw-Colina de Mc. ISBN 0070109397.
- Dixit DK, Ghodke SV. Renewable energy powered Stirling engines-a viable energy alternative. In: Sayigh AAM, editor. Renewable energy technology and the environment. Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress, vol. 2, 1992. p. 934–8.
- Finkelstein, T y órgano, A.J (2001). Motores del aire del capítulo 2.2. El publicar profesional de la ingeniería. ISBN 1-86058-338-5.
- Flóres, J. Á. (2002). *Máquinas termicas motoras - 2.* Barcelona: Copistería Miracles.SL.
- Hargreaves, Clifford M. “Chapter2, sección 4”, El motor de Philips Stirling, 63. ISBN 0-444-88463-7.
- Hargreaves C.M. (1991). El capítulo 2.5 del motor de Philips Stirling. Elsevier.

- Kongtragool B, Wongwises S. A review of solar powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. Renew Sust. Energy Rev 2003; 7:131–54.
- Llave, C., Clausó, P., Matellanes, E., & Martínez-Abarca, C. (2010). *LA MÁQUINA OLVIDADA RESCATADA PARA EL FUTURO EL MOTOR STIRLING DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL.* Madrid: I.E.S. Leonardo Da Vinci.
- Martini WR. Stirling engine design manual, report no. NASA CR-135382. In: M. J. Collie, editor. Stirling engine design and feasibility for automotive use. New Jersey: Noyes data corp.; 1979. p. 60 see also pages 64, 67, 70, and 77.
- *Robert L. Mott, P. E. Diseño de elementos de máquinas. Cuarta edición, 2004, Pearson Educacación.*
- Roberto Sier (1999). Motores caloricos y Stirling del aire caliente. Vol.1, historia de A, 1ra edición (revisada), L.A. Mair. ISBN 0-9526417-0-4.
- Roberto Sier (1995). Revolución Roberto Stirling D.D de la página 93-94. L.A Mair. ISBN 0-9526417-0-4.
- Sarango, J. E. *Diseño y fabricación de un prototipo de motor Stirling.*
- Stine WB. Stirling engines. In: Kreith F, editor. The CRC Handbook of mechanical engineers. Boca Raton: CRC Press; 1998. p. 8–67.
- Teoría de Schmidt para los motores de Stirling
- Walker G. Stirling engines. Oxford: Clarendon Press; 1980 p. 24–5.

Páginas Web:

- ttp://www.asme.org/Communities/History/Resources/Long_Arduous_March_To war d.cfm
- http://www.ingenia.org.uk/ingenia/articles.aspx?Index=108
- http://mac6.ma.psu.edu/stirling/simulations/isothermal/schmidt.html
- www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/misc/subm.html
- http://www.woodheadpublishing.com/EN/book.aspx?bookID=1293

k. ANEXOS

k.1. Comandos para la realización del programa “Motor Stirling Gamma”

k.1. Comandos para la realización del programa “Motor Stirling Gamma”

```
Public Class MotorStirlingGamma

    Public n As Double

    Public Tc As Double

    Public Tf As Double

    Public nt As Double

    Public nm As Double

    Public a As Double

    Public v As Integer

    Public t As Double

    Public B As Double

    Public S As Double

    Public Xde As Double

    Public Xdc As Double

    Public Xr As Double

    Public Dp As Double

    Public Dd As Double

    Public Cp As Double

    Public Cd As Double

    Public Vp As Double

    Public Vd As Double

    Public c As Double
```

```
Public Pre As Double

Public Pmed As Double

Public Pmax As Double

Public We As Double

Public Vo As Double

Public Wi As Double

Public Vmax As Double

Public Vmin As Double

Public Te As Double

Public Ti As Double

Public Trc As Double

Public Wc As Double

Public Tr As Double

Public Qabs As Double

Public Md As Double

Public Mtf As Double

Public Mr As Double

Public Mtc As Double

Public Mc As Double

Public Vtf As Double

Public Vtc As Double

Public Vr As Double
```

```
    Public DT As Double
    Public Dtf As Double
    Public Dtc As Double
    Public Ltf As Double
    Public Ltc As Double
    Public Lr As Double
    Public Dr As Double
    Public Rg As Integer
    Public Cv As Integer
    Public Cpa As Integer
    Public Porosidad As Double
    Public Mtotal As Double
    Public Vtotal As Double
    Public Landa As Double
    Public LB As Double
    Public lm As Double
    Public nmol As Double

    Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
        ComboBox1.Items.Add("Aire")
        ComboBox1.Items.Add("Helio")
```

```
End Sub

Private Sub Simular_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Simular.Click

    If ComboBox1.Text = "Aire" Then

        Cv = 717 'J/KgºK

        Rg = 287 'J/KgºK

        Cpa = Cv + Rg

    ElseIf ComboBox1.Text = "Helio" Then

        Rg = 8314.2 / 4.003 'J/KgºK

        Cv = 1.5 * Rg 'J/KgºK

        Cpa = Cv + Rg

    End If

    Dp = TextBox1.Text / 1000 'm

    Dd = Dp 'm

    Cp = TextBox2.Text / 1000 'm

    Cd = Cp 'm

    Pre = TextBox16.Text 'Kpa

    Tc = TextBox14.Text + 273 'ºk

    Tf = TextBox13.Text + 273 'ºK

    v = 1

    DT = 25 'ºk

    Vo = TextBox17.Text / 60 'rad/s
```

```
nm = TextBox18.Text / 100 '%

nt = TextBox15.Text / 100 '%

Vp = Math.Atan(1) * (Dp ^ 2) * Cp 'm^3

Vd = Math.Atan(1) * (Dd ^ 2) * Cd 'm^3

Xde = (TextBox3.Text / 100) * (Vp / Vp)

Xdc = (TextBox4.Text / 100) * (Vp / Vp)

Xr = (TextBox11.Text / 100) * (Vp / Vp)

t = (Tf / Tc)

a = Math.Atan((v * (Math.Sin(1.57077))) / (t + (Math.Cos(1.57077)) + 1))

B = Math.Sqrt((t ^ 2) + (2 * (t - 1) * v * (Math.Cos(1.57077)) + (v ^ 2) - (2 * t) +
1))

S = t + 2 * t * Xde + ((4 * t * Xr) / (1 + t)) + v + 2 * Xdc + 1

c = B / S

Pmed = (Pre * (1 + c) / Math.Sqrt(1 - (c ^ 2))) 'Kpa

Pmax = Pmed * (Math.Sqrt((1 + c) / (1 - c))) 'Kpa

We = ((Pmed * 1000 * Vp * 4 * Math.Atan(1) * c * (Math.Sin(a)) / (1 +
(Math.Sqrt(1 - c ^ 2)))) * Vo) ' W Potencia de entrada

n = (1 - (Tf / Tc)) * nt * nm 'Rendimiento

Wi = n * We 'W Potencia de salida

Vmax = Vp + Vp / 2 'm`3

Vmin = Vp / 2 'm^3

Te = We / Vo 'J

Ti = Te * n 'J
```

```
Trc = Ti - Te 'J

Wc = Trc * Vo 'W

Tr = (Tc + Tf) / 2 'ºK

Qabs = Te / n 'J/s

Ltc = TextBox6.Text / 100 'm

Ltf = TextBox5.Text / 100 'm

Dtc = TextBox8.Text / 100 'm

Dtf = TextBox7.Text / 100 'm

Porosidad = TextBox12.Text / 100 '%

Dr = TextBox10.Text / 100 'm

Lr = TextBox9.Text / 100 'm

Vtc = Math.Atan(1) * (Dtc ^ 2) * Ltc 'm^3

Vtf = Math.Atan(1) * (Dtf ^ 2) * Ltf 'm^3

Vr = Math.Atan(1) * (Dr ^ 2) * Lr * Porosidad 'm^3

Md = Vd * Pmed / Rg * Tc

Mtc = Vtc * Pmed / Rg * (Tc - DT)

Mr = Vr * Pmed / Rg * Tr

Mtf = Vtf * Pmed / Rg * (Tf + DT)

Mc = Vp * Pmed / Rg * Tf

Mtotal = (Md + Mtc + Mr + Mtf + Mc) * 1000 'g

Vtotal = (Vp + Vd + Vtf + Vtc + Vr) * 1000000 'cm^3

lm = TextBox19.Text / 10 'cm
```

```
Landa = 0.25

LB = Lm / Landa 'cm



TextBox20.Text = Format(Qabs, "#0.00")

TextBox21.Text = Format(Te, "#0.00")

TextBox22.Text = Format(n, "#0.00")

TextBox23.Text = Format(Wi, "#0.00")

TextBox24.Text = Format(Mtotal, "#0.00")

TextBox25.Text = Format(Vtotal, "#0.00")

TextBox26.Text = Format(LB, "#0.00")

TextBox31.Text = Format(Pmed, "#0.00")



nmol = ((Pmax * 1000 * 0.00001) * (Vmin * 1000000)) / ((Rg * Tc))

TextBox27.Text = ((nmol * Rg * (Tf / ((Vmax * 1000000)))) / 0.00001) / 1000

TextBox28.Text = ((nmol * Rg * (Tf / ((Vmin * 1000000)))) / 0.00001) / 1000

TextBox29.Text = ((nmol * Rg * (Tc / ((Vmin * 1000000)))) / 0.00001) / 1000

TextBox30.Text = ((nmol * Rg * (Tc / ((Vmax * 1000000)))) / 0.00001) / 1000



End Sub
```

```
Private Sub Salir_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Salir.Click
    End
End Sub

Private Sub TextBox1_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox1.KeyPress
    If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
        e.Handled = True
        SendKeys.Send("{TAB}")
    End If
    If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    Else
        e.Handled = True
    End If
End Sub
```

```
    Private Sub TextBox2_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox2.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox3_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox3.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
```

```
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub

    Private Sub TextBox4_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox4.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
```

```
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox5_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox5.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
```

```
    Private Sub TextBox6_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox6.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox7_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox7.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
```

```
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub

    Private Sub TextBox8_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox8.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
```

```
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox9_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox9.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub

    Private Sub TextBox10_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox10.KeyPress
```

```
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox11_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox11.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
```

```
    ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    Else
        e.Handled = True
    End If
  End Sub

  Private Sub TextBox12_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox12.KeyPress
    If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
        e.Handled = True
        SendKeys.Send("{TAB}")
    End If
    If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    Else
```

```
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox13_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox13.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub

    Private Sub TextBox14_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox14.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
```

```
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox15_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox15.KeyPress
        If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
            e.Handled = True
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
```

```
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    Else
        e.Handled = True
    End If
End Sub

Private Sub TextBox16_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox16.KeyPress
    If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
        e.Handled = True
        SendKeys.Send("{TAB}")
    End If
    If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
        e.Handled = False
    Else
        e.Handled = True
```

```
    End If
  End Sub
  Private Sub TextBox17_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox17.KeyPress
    If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
      e.Handled = True
      SendKeys.Send("{TAB}")
    End If
    If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
      e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
      e.Handled = False
    ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
      e.Handled = False
    Else
      e.Handled = True
    End If
  End Sub

  Private Sub TextBox18_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox18.KeyPress
    If e.KeyChar = ChrW(Keys.Enter) Then
      e.Handled = True
```

```
            SendKeys.Send("{TAB}")
        End If
        If (Char.IsDigit(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsControl(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        ElseIf (Char.IsSeparator(e.KeyChar)) Then
            e.Handled = False
        Else
            e.Handled = True
        End If
    End Sub

    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
        Label78.Visible = True
        Label77.Visible = True
        Label76.Visible = True
        Label75.Visible = True

        Label73.Visible = True
        Label72.Visible = True
```

```
        Label71.Visible = True
        Label70.Visible = True
        Label69.Visible = True
        Label68.Visible = True
        Label67.Visible = True
        Label66.Visible = True
        Label65.Visible = True
        Label64.Visible = True
        Label63.Visible = True
        Label62.Visible = True
        Label61.Visible = True
        Label60.Visible = True
        TextBox27.Visible = True
        TextBox28.Visible = True
        TextBox29.Visible = True
        TextBox30.Visible = True
        PictureBox2.Visible = True
        PictureBox1.Visible = True
    End Sub
End Class
```

k.2. Guía del proceso tecnológico para la fabricación del motor Stirling

Guía del proceso tecnológico para la fabricación del motor Stirling

El proceso tecnológico de fabricación, la parte en la que seguramente se encontrara la manera de realizar el motor, pues bien, este proceso empieza en el escritorio cuando estamos pensando en la manera de dar los primeros pasos en lo que será el boceto del motor.

Pues bien entendido que para la iniciación del proceso tecnológico necesitamos tener listo el diseño final del motor, empezamos a analizar las posibles piezas que necesitaran para llevar a la realidad lo que tenemos expresado en papel, es decir cuáles son las piezas que componen el diseño, bien con esto procedemos a enlistar todas las piezas que necesitaremos:

- Un cilindro para el desplazador (Zona caliente)
- Un Desplazador
- Una tapa - acople para el desplazador
- Una tapa para el cilindro del desplazador
- Un sello para el cilindro del desplazador
- Una guía para el desplazador
- Una biela para el desplazador
- Un pasador de unión entre la guía y la biela del desplazador
- Dos collarines para asegurar el pasador guía - biela
- Tres rodamiento de fricción para la guía y la biela del desplazador
- Material lubricante para las partes en fricción
- Un cigüeñal

- Una biela para el pistón de potencia
- Un pistón de potencia
- Un pasador para la biela y el pistón de potencia
- Dos rodamientos para la biela del pistón de potencia
- Un cilindro para el pistón de potencia (Zona fría)
- Una tapa para el cilindro del pistón de potencia
- Pernos para el acople del cilindro del pistón de potencia
- Pernos para el cilindro del desplazador
- Dos entradas de aire para los dos cilindros
- Un conducto de unión para los dos cilindros
- Una válvula para el llenado de aire
- Un block para todos los complementos
- Dos rodamientos para el acople del cigüeñal
- Un volante motor
- Una chaveta para el acople del volante motor

Una vez enlistadas todas las piezas que posiblemente se van a utilizar en la fabricación del motor, se tendrá que tratar de enlistar las herramientas que se necesitaran en la fabricación de todas las piezas:

- Un torno
- Una fresadora
- Un esmeril

- Un taladro
- Un martillo
- Un alicate
- Destornilladores
- Juego de llaves
- Mesa de trabajo y pruebas
- Manguera de agua
- Fuente generadora de calor
- Tenazas
- Brocas
- Cierra
- Balanza de gancho
- Amianto
- Pasta selladora
- Lija
- Una soldadora, otras

Como es obvio la lista refleja muchas de las piezas básicas que encontramos en un taller mecánico y otras en un taller especializado en el mecanizado de piezas, si bien es bastante básico es muy necesario para darnos cuenta como se trabajara cada pieza y en qué momento interviene cada material y cada herramienta.

bien ahora que tenemos la idea global de cuáles son las piezas y las posibles herramientas a usarse, se empieza la realización de cada una de las piezas:

Cilindro para el desplazador.-

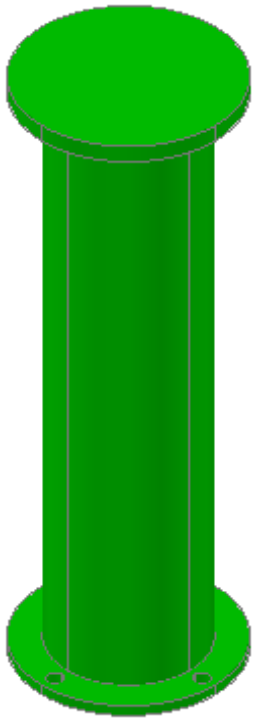


Figura 50 Cilindro para el desplazador

La fabricación de esta pieza se realiza con 32 cm aproximadamente de tupo para vapor de 60 mm de diámetro interior y de un espesor de 7mm, dos rectángulos de placa de aproximadamente 120 x 120 mm y 8 mm de espesor.

Con el material lo que nos queda es procesarlo, empezamos por el tubo vapor, el cual mediante un torneado, esmerilado y perfecta calibración lo llevaremos hasta las siguientes medidas diámetro interior 63 mm, longitud 29.2 mm y tanto la parte interior como ambos finales tienen que estar algo pulidos.

una vez trabajado el tubo de vapor procesamos una de las placas y la llevamos a una forma circular con 8 mm de espesor y con un diámetro de aproximadamente 110mm,

realizado esto procesamos la segunda placa, la cual tiene que tener las siguientes características su diámetro debe ser de aproximadamente 110 mm, debe tener una perforación en el centro la cual le permita atravesar el tubo de vapor, y finalmente

deberá tener 4 perforaciones con la medida de 5/16" aproximadamente 8 mm ubicadas dos a lo horizontal y dos a lo vertical.

Teniendo estas tres piezas lo que haremos es que la pieza de 110 mm de diámetro y sin perforaciones será soldada en la parte superior del tubo de vapor de manera que no deje escapar el aire en su interior y la pieza que puede atravesar el tubo vapor la soldamos a 5mm del borde inferior del tubo vapor, hecho esto obtendremos el cilindro para el desplazador.

Desplazador.-

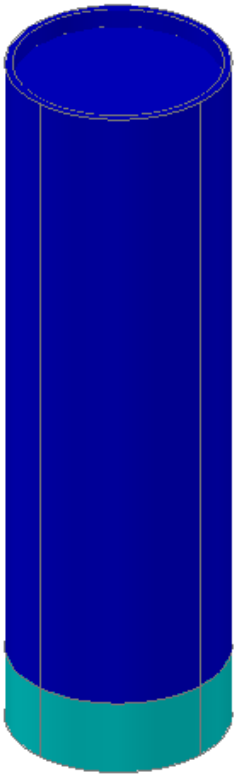


Figura 51 Desplazador

Para la fabricación del desplazador vamos a utilizar tres materiales, el primero un tubo de acero dulce con diámetro interior de 53 mm, espesor de 4 mm y una longitud de aproximadamente 172mm, la segunda una pieza redonda de aluminio de aproximadamente 58 mm de diámetro y un espesor de 25mm y la tercera una pieza

redonda de acero dulce de 53mm de diámetro aproximadamente (tapa - acople) y 3 mm de espesor.

Con estas dos piezas listas para el procesamiento, empezamos la creación del desplazador y lo haremos por el tubo el cual después de un proceso de torneado y lijado lo dejaremos con las siguientes medidas, diámetro interior 53 mm, espesor 1.8 mm aproximadamente, en este punto el espesor será el menor posible en el proceso de torneado sin sobrepasar los límites ya que deberá soportar la presión de aire caliente pero deberá ser lo más delgado posible y su longitud 170mm.

La pieza de aluminio después de un proceso de torneado, taladrado y lijado, deberá en la parte superior tener un diámetro de 53mm y un espesor de 5mm y en su parte restante tendrá 57 mm de diámetro y como es obvio 20mm de espesor, pero en la parte central tendrá una perforación de 20 mm de profundidad y un roscado para el acople de la guía del desplazador.

Teniendo esto procedemos de la siguiente manera, soldamos la pieza de 53 mm de diámetro y 3 mm de espesor a 5mm de la parte superior del tubo y la pieza de aluminio procesada la insertamos en la parte inferior del tubo a presión y de esta forma tendríamos listo el desplazador.

Tapa para el cilindro desplazador.-

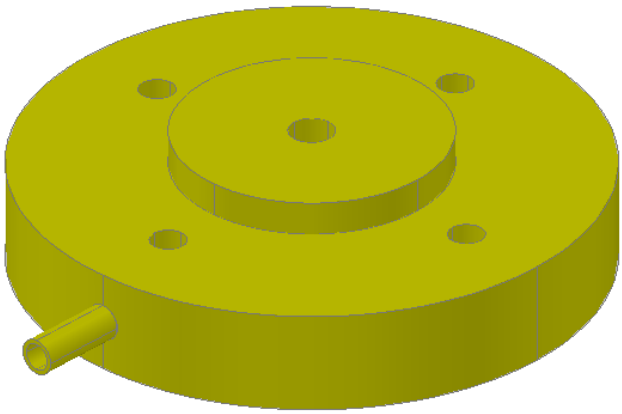


Figura 52 Tapa del cilindro del desplazador

Para realizar esta pieza se necesita dos materiales, el primero una pieza de aluminio de 112 mm de diámetro aproximadamente y 30 mm de espesor y la segunda una entrada de 5/16 x 1/2 " roscada.

Con estas dos piezas lista, procesamos la pieza de aluminio la cual luego del proceso de torneado lijado debe tener las siguientes características, en la parte superior un diámetro de 63 mm aproximadamente con un espesor de 7.5mm, la parte inferior tendrá un diámetro de 112mm aproximadamente y un espesor de 22.5, se taladrará esta pieza de la siguiente manera: una perforación en el centro con diámetro aproximado a 10mm y cuatro perforaciones dos a lo horizontal y dos a lo vertical con medida de 5/16" , 8 mm aproximadamente, además de llevar una perforación en la cara lateral que permita el ingreso de aire y salga al cilindro, todas las perforaciones a acepción de la entrada de aire pasaran toda la pieza.

y con esta pieza mecanizada acoplamos la entrada de aire para tener la tapa del cilindro del desplazador, importante decir que el paso de aire entra en la cara lateral de la pieza y sale en la cara superior(no se muestra en la fig. 48).

Guía para el desplazador.-

Figura 53 Guía para el desplazador

Se la realiza con un eje de acero dulce de 140mm de longitud y 10mm de diámetro, una pieza de acero dulce de 25 mm de diámetro y 16 mm de espesor y un rodamiento de

fricción de bronce pre lubricado de 21mm de diámetro exterior y 15 mm de diámetro interior que se encuentra en casa comercial.

Se procesa el eje de acero con un proceso de roscado, pulido y cortado hasta conseguir las siguientes medidas, longitud 135mm, en la parte superior un roscado que se acople con la tapa-acople del desplazador y que tenga 20 mm de espesor, luego con la pieza de acero redonda se procede a crear un anillo de 25 mm de diámetro exterior y 21mm de diámetro interior, el rodamiento de fricción se acopla a presión sobre el anillo de acero luego de haber soldado el anillo al eje de acero.

Biela del desplazador

Figura 54 Guía del desplazador

La Biela del desplazador es de las mismas características que la biela del pistón de potencia y su modo de fabricación es muy similar a la de la guía del desplazador pero a esta no se le hace el roscado y se le suelda en ambos extremos el anillo de acero y se le coloca a la biela del desplazador los rodamientos de fricción y a la biela del pistón de potencia los rodamientos de agujas.

Importante la distancia entre centros de los anillos de aceros soldados a ambos extremos es de 142 mm y el diámetro del eje de acero es de 1/2 " 13mm aproximadamente.

Pasador biela- guía del desplazador.-

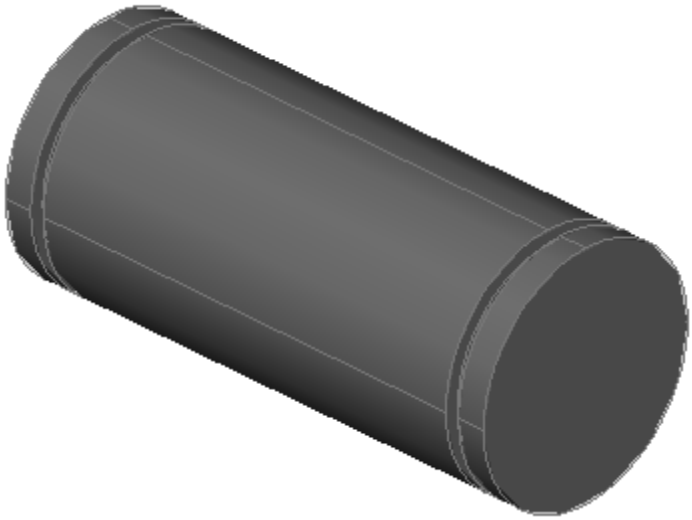


Figura 55 Pasador Guía - Biela del desplazador

Se realiza con una pieza de eje de acero dulce de 38 mm de longitud y 15mm de diámetro aproximadamente, y se crea un canal de 1mm a 2mm de ambos extremos.

Cigüeñal.-

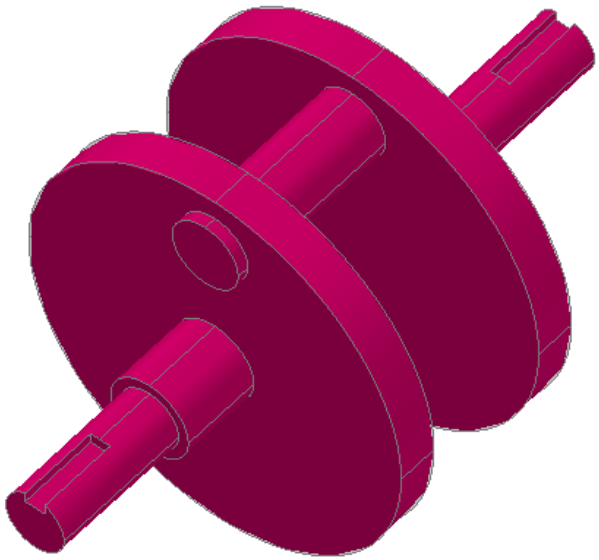


Figura 56 Cigüeñal

Para la fabricación del cigüeñal necesitaremos los siguientes materiales: dos placas cuadradas de 100 x 100mm y 10 mm de espesor, un eje de acero de 20mm de diámetro y 160 mm de longitud.

Con los materiales listos empezamos la construcción del cigüeñal, empezaremos procesando las placas de 100 x 100mm, las cuales pasaran por el proceso de torneado y taladrado hasta obtener las siguientes características: tendrán un diámetro de 95 mm aproximadamente, un espesor de 10mm, en el centro de cada placa tendrán una perforación de 20 mm aproximadamente y en su extremo una perforación de 15 mm, importante: entre la perforación central y la del extremo tendrá que haber una distancia de 35.5 mm de centro a centro, aportar que para la construcción de las placas se las une entre si con suelda para que el procesado sea idéntico en las dos.

E l eje de acero pasara por un proceso de torneado, lijado y cortado hasta que se den las siguientes condiciones: Se crearan tres piezas, la primera es un eje de 55mm de longitud y 15mm de diámetro aproximadamente, la segunda y la tercera serán piezas idénticas las cuales tendrán la siguiente característica: en su extremo inferior tendrá un diámetro de 20mm y una longitud de 20 mm, en su extremo superior tendrán un diámetro de 15mm y una longitud de 35mm, luego de tener las dos piezas idénticas se las somete a un proceso de fresado para crear en su extremo superior un canal de 55mm de ancho, 3mm de profundidad y 25mm de longitud

con todas las piezas creadas el ensamblaje del cigüeñal se realizará de la siguiente manera: las piezas idénticas y de 20mm de diámetro en su extremo se incrustaran a presión en cada uno de las piezas redondas, luego de revisar su correcto centrado y su perfecta alineación se procede a soldarlas, para la unión del cigüeñal en su totalidad se deberá contar ya con el block que se verá más adelante, con los rodamientos de bolas de 47 x 15 mm para su ensamble en el block y con las dos bielas.

Pistón de potencia.-

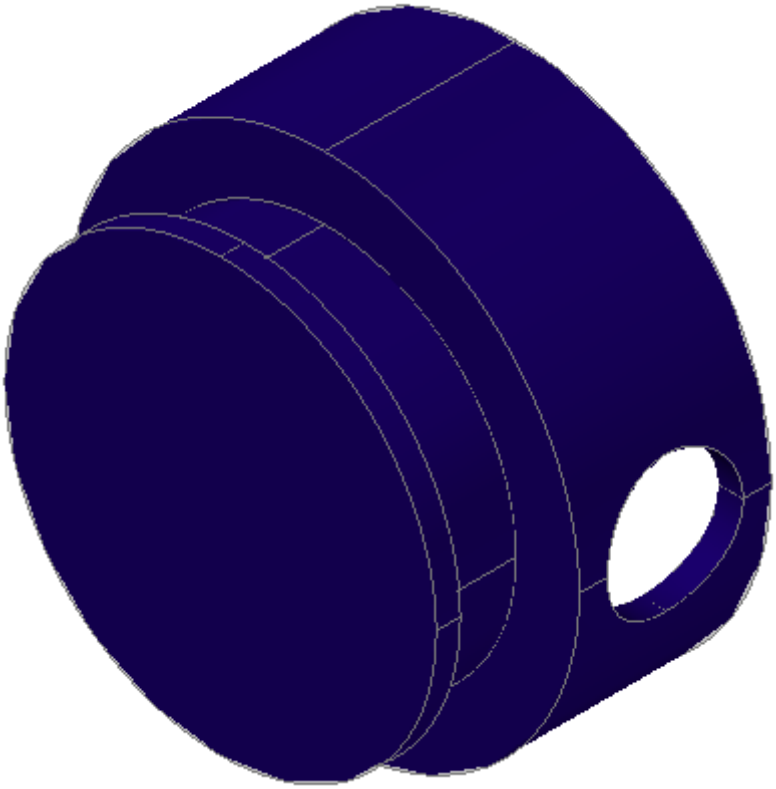


Figura 57 Pistón de potencia

Se realiza con una pieza de aluminio de 64mm de diámetro y 40mm de espesor,

es una pieza un poco complicada de construir, puesto que necesita de un poco de habilidad, pues bien, en su parte superior tendrá un diámetro de 63.8mm aproximadamente y una longitud de 24 mm, en su parte intermedia tendrá un diámetro de 48mm y una longitud de 10mm en su parte inferior tendrá un diámetro de 54mm y 3mm de longitud, la parte intermedia e inferior servirán para el acople del sello del pistón de potencia, en la parte superior se creará una perforación de 15mm aproximadamente que servirá para la unión del pistón con la biela a través del pasador.

en la parte superior tendrá una perforación interna de manera que la biela unida por el pasador al pistón se pueda mover con toda libertad.

Cilindro del pistón de potencia.-

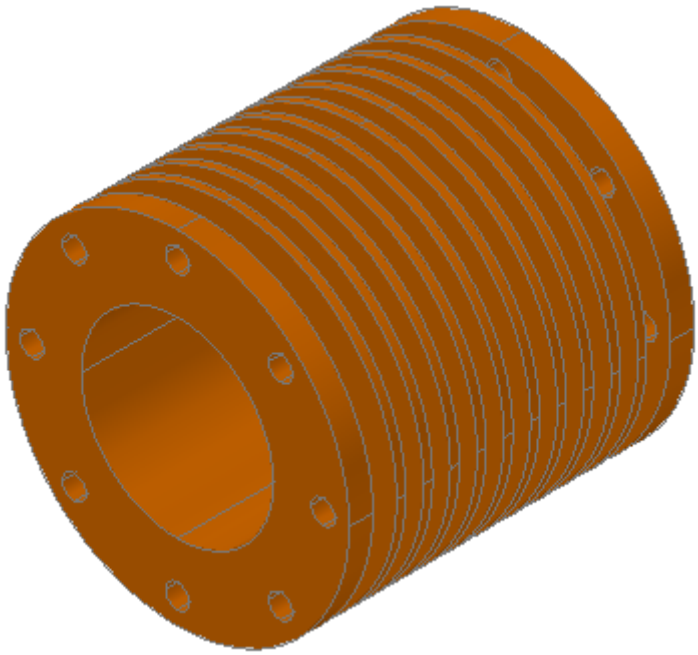


Figura 58 Cilindro del pistón de potencia

Esta pieza se puede hacer de varias formas, una de ellas es con un plano de diseño y mandarla a fundir y la segunda es con un eje de fundición y someterla a un proceso de torneado que es como se realizó, para esto se necesito un eje de fundición de 112mm de diámetro aproximadamente y 120 mm de longitud, pues bien , por todo el eje se realizará una perforación de 64 mm de diámetro y en su exterior tendremos un sin número de anillos los que tendrán las siguientes características en inferior y el superior tendrán un espesor de 8mm y un diámetro de 112mm, la separación del primero y del último de los demás será de 8mm, los anillos que componen el cuerpo tendrán 112mm de diámetro y 3mm de espesor con una separación de 6mm y se realizaran 8 perforaciones alrededor del primer y último anillo para acoplarlo a la tapa y al block respectivamente, dichas perforaciones tendrá 5/16" de diámetro aproximadamente 8 mm y de esta forma tendremos el cilindro del pistón de potencia.

Tapa del cilindro del pistón de potencia.-

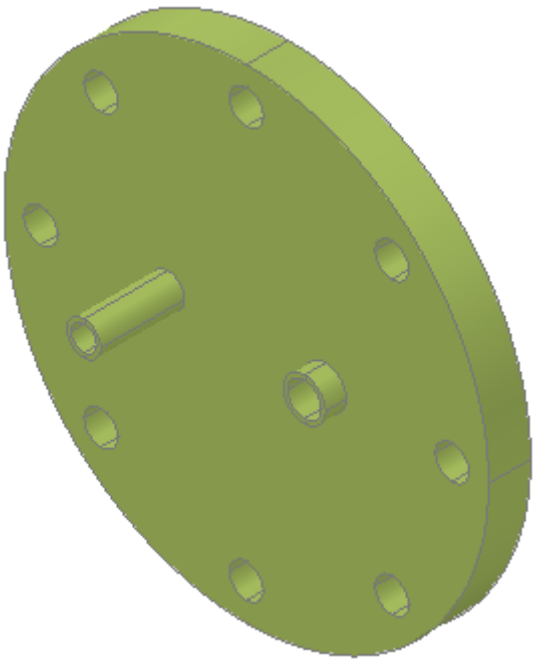


Figura 59 Tapa del cilindro del pistón de potencia

Se realiza con una placa cuadrada de 1152 x115mm y un espesor de 10mm, se la tornea hasta que se encuentre en forma circunferencial con un diámetro de 112 mm y 10mm de espesor además se la perforará 8 veces con un diámetro de 5/16" aproximadamente 8 mm de tal forma que estas perforaciones coincidan con las existentes en el cilindro del pistón de potencia, también se perforará cerca al centro con un diámetro de 5/16" para acoplar el paso de aire, al igual que tendrá cerca del centro una perforación de aproximadamente 10mm de diámetro para incrustarle a presión una válvula de llenado de aire.

Block.-

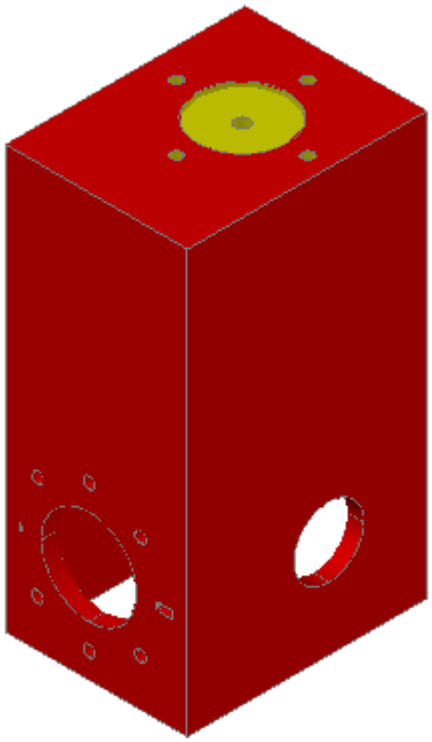


Figura 60 Block

Se realizará con la unión de varias placas, la cuales tienen las siguiente medidas:

La cara frontal: 112x274mm y espesor de 10mm, en esta cara se perforará a 8mm del centro y a 66m de la parte inferior con un diámetro de 64mm al rededor de esta perforación se realizara 8 perforaciones de manera que coincidan con el cilindro del pistón de potencia.

La cara lateral: cantidad 2 serán de 161x274mm y espesor 10mm, se perforará a 66mm de la parte inferior y a 66 mm de una cara lateral con 47mm de diámetro de manera que entre con una pequeña dificulta el rodamiento de bolas de 47 mm.

La cara superior: 161x112mm y espesor de 10mm, tendrá una perforación de 68mm a 8 mm del centro y a 66 mm de su parte inferior, que no pase por toda la placa sino que tenga una profundidad de 3mm , en el centro de esta perforación habrá otra que pase oda la placa con un diámetro de 10mm, al rededor de la perforación mayor se realizará cuatro perforaciones con diámetro de 5/16" de man3era que coincidan con la tapa del cilindro del desplazador.

con estas 4 placas creadas procedemos a soldarlas bajo la placa superior para darle la forma al block, en la parte posterior donde no hay ninguna placa se soldarán apoyos de 8mm de diámetro tanto arriba como abajo para asegurar la estabilidad del block a la presiones.

Pasador del pistón de potencia.-

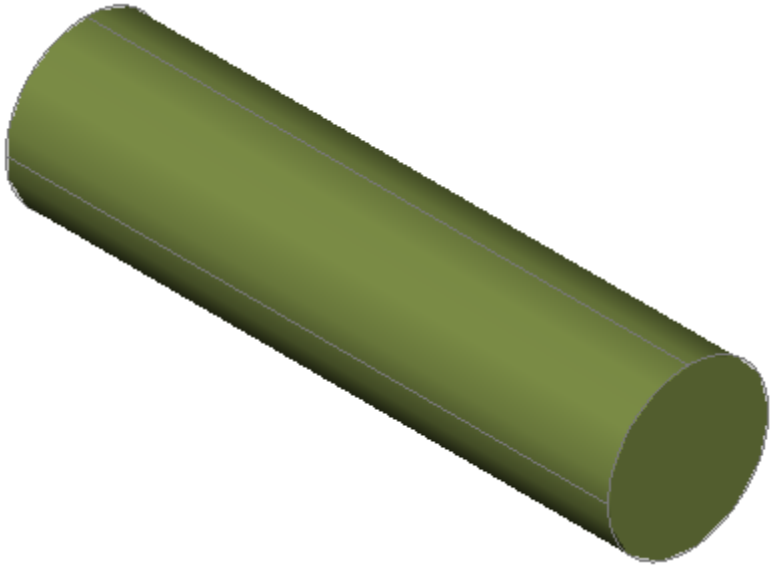


Figura 61 Pasador del pistón de potencia

Una pieza muy sencilla la cual es de un eje de acero dulce de 64mm de longitud y de 15 mm de diámetro aproximadamente.

las piezas en su totalidad se ensamblan conforme los planos, y de esta manera tendremos lo que es el motor, que obviamente luego de su construcción deberá ir a las pruebas de funcionamiento y a los acoples finales, con esto se daría por terminada la guía del proceso de fabricación del motor Stirling Gamma. Para acabados estéticos va de acuerdo al gusto del fabricante.

k.3. Planos para la fabricación del Motor

k.4. Fotos de fabricación y funcionamiento del motor

Figura 62 Motor Stirling Gamma piezas 1

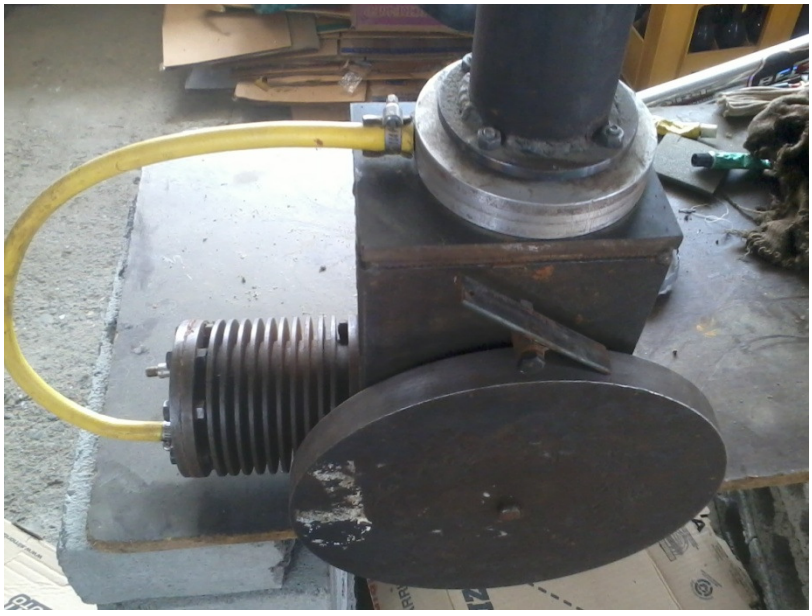


Figura 63 Motor Stirling piezas 2

Figura 64 Motor Stirling piezas 3

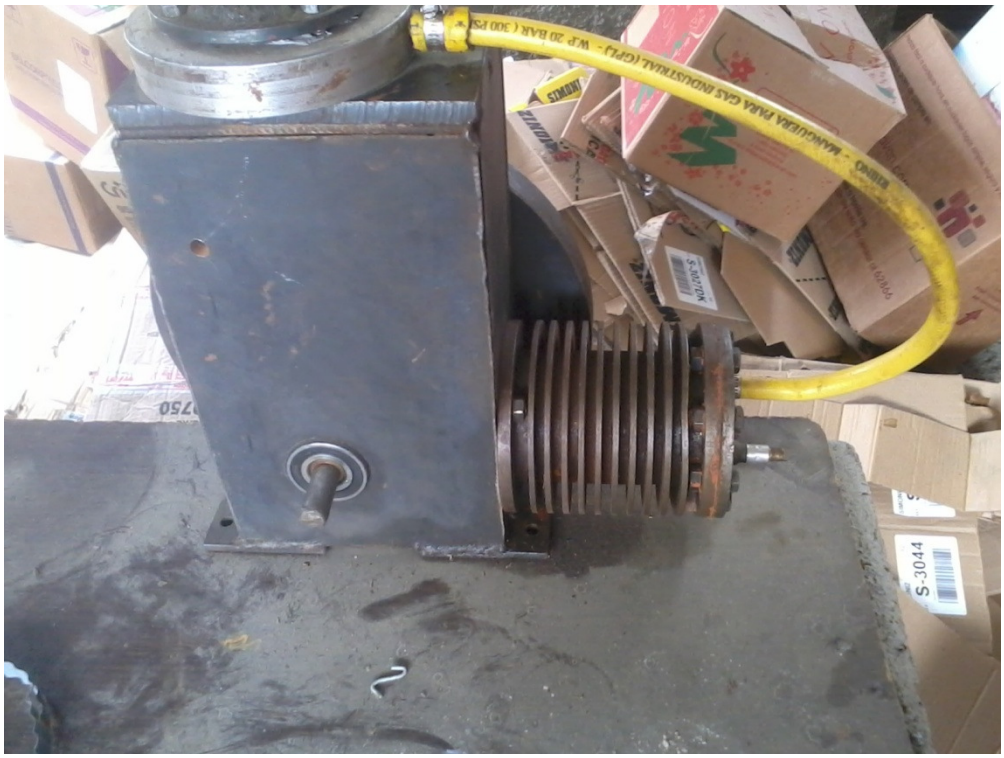


Figura 65 Motor Stirling piezas 4

k.5. Datos obtenidos de la práctica experimental y la simulación del motor

k.5.1. Potencia experimental del motor

La potencia experimental del motor se obtuvo realizando experimentación directa con el motor construido, para medir la potencia se adapto una pequeña palanca junto al volante motor para que hiciera labores de frenado y de esta manera encontrar los datos necesarios para establecer la potencia real del motor, los datos obtenido de la experimentación fueron:

Fuerza aplicada: 1/2 Kg - 1.1125 lbf - 4.45 N

Número de revoluciones: 60Rpm

Longitud de la palanca: 0.105m

con estos datos y la fórmula de cálculo de potencia que es:

$$N = DxF \div T$$

Donde:

N - Potencia del motor

D - Distancia (Lp x 2π x η)

F - Fuerza aplicada

T - Tiempo

Desarrollando la formula se obtiene:

$$N = DxF \div T$$

$$N = 0.105m\ x\ 2\pi\ x\ 60rpm\ x4.45N \div 60seg$$

$$N = 2.94\ w$$

la potencia real desarrollada por el motor es de 3w aproximadamente.

Comparando con los datos obtenidos en la simulación tenemos:

Figura 66 Datos obtenidos con Stirling v1.1.

Tabla 12 Datos comparativos de la experimentación y la simulación del motor Stirling Gamma

# de Experimento	Datos Experimentales (W)	Datos de Simulación (W)	Error relativo	Variación porcentual (%)
1	2,94	1,6	45,58	83,75
2	2,95	1,6	45,76	84,38
3	2,93	1,6	45,39	83,13
4	2,92	1,6	45,21	82,50
5	2,97	1,6	46,13	85,63
6	2,95	1,6	45,76	84,38
7	2,93	1,6	45,39	83,13
8	2,92	1,6	45,21	82,50
9	2,94	1,6	45,58	83,75
10	2,94	1,6	45,58	83,75

Fuente: El autor

De la tabla 12 podemos concluir que de los datos obtenidos mediante simulación debemos aumentarle un 83% del valor obtenido para tener el un aproximado del valor experimental, esto se debe a que en la modelación matemática se asume que no hay fricción, no hay perdidas de presión, que la temperatura es constante, lo que en la realidad no sucede y de esta apreciación es que podemos observar un error porcentual del 45% aproximadamente

k.6. Asesor en el proceso de creación del motor Stirling Gamma

Eugenio Sangüesa Subirón.

- Nacido en Moscú en el 1952.
- 1959 a 1969 acabé los estudios de bachillerato.
- 1969 a 1974 acabé los estudios de ingeniería en una Escuela Superior de Automoción MAMI en la ciudad de Moscú en la Unión Soviética antigua. Facultad de motores de combustión interna. Proyecto de fin de carrera: Motor Stirling de doble acción de 4 cilindros en serie de 200 CV para un autobús urbano.
- 1974 a 1978 trabaje como ingeniero en un Instituto de Investigación de tractores NATI.
- 1978-1989 trabaje en una Oficina de Diseño de Maquinas Herramienta. En este periodo obtuve 5 patentes.
- 1989-1991 en paralelo con los trabajos en calidad el Jefe de proyecto en un Instituto de Investigación en maquinas herramienta, ejercía la docencia en una autoescuela.
- 1992 he emigrado a España como hijo de un español.
- 1992 trabajos varios y el proceso de integración a la sociedad española. En este periodo empecé diseñar y construir un modelo de motor Stirling tipo gama a base de piezas de una moto. Lo logre poner en marcha en el 1995...97.
- 1997-1999 trabajé como ingeniero jefe de departamento de mantenimiento e ingeniería en una fábrica farmacéutica.
- 1999 a 2009 trabaje como autónomo en una empresa propia de montajes industriales.
- 2009 hasta el momento actual trabajo como ingeniero en una empresa de I+D Centro Stirling, creada dentro de la cooperativa vasca Mondragón, MCC.

"Gratitud sincera por todo su apoyo"

k.7. Anteproyecto de tesis

1. TITULO

“Diseño, modelación matemática y construcción de un prototipo de Stirling gamma.”

2. PROBLEMÁTICA

2.1. Antecedentes

El motor Stirling fue realizado por primera vez en 1816 por Robert Stirling, el objetivo fue plantear una alternativa al problema de los continuos accidentes de trabajo que se presentaban con la utilización de las máquinas de vapor, ya que estas funcionaban con calderas a alta presión que continuamente explotaban.

Pero su invención pasaría sin mayor trascendencia al no ser posible su utilización en altas potencias, con la aparición del motor de combustión interna en 1877 su fin estaría cerca ya que con la revolución que ocasionaría este nuevo motor en el mundo daría lugar a que el motor Stirling sea olvidado con mayor facilidad.

Pero el motor Stirling no sería olvidado por todos, varias empresas seguirían basando sus investigaciones en este tipo de motores, como era muy notorio en esa época se trataba de una energía limpia y de grandes prestaciones al poder utilizar cualquier material que ardiera para generar energía mecánica o eléctrica, además su funcionamiento era silencioso, su mantenimiento bajo, aunque su peso no se relacionaba a la potencia que producía y eran muy costosos.

En la época de los 40’s una de las empresas que dedico mayor tiempo y dinero en la investigación de estas tecnologías fue Phillips para poder lograr un generador de energía muy versátil, esto con el fin de abrir nuevos mercados para sus productos en lugares donde no existía el acceso al fluido eléctrico, este programa de investigación iba durar hasta la época de los 70’s lográndose únicamente la máquina Stirling inversa que era capaz de alcanzar temperaturas criogénicas y era utilizada para licuefacción.

El Stirling basa su funcionamiento en la expansión y comprensión de un gas debido a su diferencia de temperatura, el motor Stirling planteado por primera vez fue del tipo Beta, el cual consiste en un desplazador situado dentro de un cilindro y desfasados 90 grados con respecto al pistón de potencia, su diseño contenía también el conocido regenerador que es utilizado para mantener la diferencia de temperatura en la cámara de trabajo,

existen además del motor Beta otros dos motores Stirling derivados de la patente original que son el motor Alfa y el Gamma.

2.2. Situación Problemática

El motor Stirling es uno de los motores más eficientes en cuanto a rendimiento térmico, por lo cual es muy utilizado para la obtención de energía eléctrica con tecnologías limpias, su principal problema es la baja potencia que desarrolla por lo cual no es aplicable en lugar donde la potencia sea un factor importante.

El motor Stirling tiene ahora su reaparición luego de haber sido desplazado por el motor de combustión térmica y el motor eléctrico, como ya conocemos el funcionamiento del motor Stirling se basa principalmente en la diferencia de temperaturas del foco frío y del foco caliente, la energía utilizada para aumentar la temperatura en el foco caliente es la proveniente de toda fuente que pueda generar calor en especial la radiación solar por lo cual su uso, ya que es una máquina que utiliza las energías renovables para producir electricidad, pero la construcción de un motor Stirling resulta un poco costosa desde sus materiales hasta su fluido de trabajo, esto considerando que trabaja con hidrógeno, helio, aire o cualquier otro gas, pero la calidad del aire para este tipo de trabajo tiene que ser muy alta de lo cual depende su costo.

El poco uso en nuestro país de esta tecnología no permite su desarrollo en el campo eléctrico y peor aún no es considerado una alternativa para la generación eléctrica, de igual forma pasa en nuestra provincia a pesar de ser una de las más ricas en recursos solar no se implementa el uso de la tecnología Stirling para la generación de energía eléctrica, por lo que resulta de mucha importancia realizar estudios de cómo y bajo qué condiciones se puede utilizar un motor Stirling en la provincia.

2.3. Problema general de investigación

El adecuado diseño y proceso tecnológico que permita construir un prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma.

2.4. Delimitación

2.4.1. Problemas específicos

- El diseño de una prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma
- El adecuado modelo matemático que evidencie el comportamiento del motor Stirling gamma.
- El proceso tecnológico que permitirá la construcción del motor Stirling tomando en consideración la tecnología local.
- La debida correlación entre los datos experimentales y los obtenidos en base a simulación

2.4.2. Espacio

El presente proyecto de tesis se realizará en la ciudad de Loja en su mayor parte, al igual que se realizará en la ciudad de Guayaquil y Cuenca.

2.4.3. Tiempo

El tiempo que se estima emplear para la elaboración de esta tesis es de aproximadamente 8 meses, tiempo en el cual se pretende llegar a un conocimiento claro y preciso de lo que son los motores Stirling y de las ecuaciones que rigen su comportamiento, se iniciará el lunes 2 de Enero de 2011 y se culminará aproximadamente el 31 de Agosto de 2011.

2.4.4. Unidades de observación

- Los motores Stirling tipo Gamma.

- El ciclo Stirling.
- Las ecuaciones que rigen el comportamiento del motor Stirling.
- Los materiales para la construcción de un motor Stirling.
- Otros ciclos de los motores Stirling.
- Modelación y simulación de sistemas.

3. JUSTIFICACIÓN Y VIABILIDAD

3.1. Justificación

El siguiente proyecto de tesis tiene como finalidad el diseño y la modelación matemática de un motor Stirling tipo gamma para la generación de 40 W de energía eléctrica con el uso de la energía solar en la provincia de Loja, el cual permitirá conocer el comportamiento del motor en la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar en la ciudad de Loja, el potencial necesario para poder generar los 40 W de energía eléctrica y las potencias que se generarían con un potencial diferente.

Con la modelación se analizará lo que pasaría con la potencia de salida del motor Stirling tipo gamma con diferentes aportaciones de calor en el foco caliente y con las variaciones de la diferencia de temperatura en la cámara de trabajo.

Nos permitirá contar con información precisa y clara de lo que son los motores Stirling y cuál es su comportamiento, para poder desarrollar un proyecto con fines de obtención eléctrica a partir de la energía solar, al igual que permitirá estudiar el desarrollo de equipos que sean capaz de generar la energía eléctrica que necesita una determinada familia en el día para reducir el uso de energías poco limpias.

Como se sabe el motor Stirling funciona con la diferencia de temperatura de un gas, la forma más amigable con el ambiente de obtener esta diferencia de temperatura es la energía solar y la energía geotérmica, pero también se puede utilizar cualquier materia que arda para producir calor, como en este tipo de motores la combustión es externa se puede controlar los gases producto de la combustión, por lo que mediante este proyecto se trata de presentar una alternativa para el uso de tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica y energía mecánica y de esta manera utilizar tecnologías limpias que sean capaces de realizar el mismo trabajo que realizan nuestras tecnologías convencionales y así reducir el impacto que producen al ambiente estas tecnologías convencionales.

3.2. Viabilidad

El proyecto de tesis es posible en su realización por las siguientes razones:

- Al ser un proyecto que permitirá la obtención del título de ingeniero electromecánica al autor, lo enfrasca en un profundo interés y lo envuelve en un alto grado de compromiso para su realización.

- El motor Stirling es el motor del futuro por las diversas luchas que se tiene en contra de los motores que proporcionan contaminación al ambiente, por lo que la información respecto a ellos es muy abundante, destacando que es una tecnología que se desarrollo en los años de 1816 y que si bien no se ha utilizado con una gran magnitud, las investigaciones han continuado a través del tiempo logrando importantes aportes, producto de esto es el sin número de profesionales que poseen conocimiento sobre este tipo de motores y que pueden brindar un aporte importantísimo al desarrollo de este trabajo.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Diseñar, modelar matemáticamente y construir un motor Stirling tipo gamma.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma.
- Modelar matemáticamente el motor Stirling tipo gamma.
- Realizar una guía del proceso tecnológico de fabricación del motor Stirling tipo gamma.
- Construir un motor Stirling tipo gamma.
- Comparar los datos experimentales con los datos obtenidos mediante la simulación del motor Stirling tipo gamma.

6. PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO

PRESUPUESTO		
Objetivo	**Actividad**	**Costo $**
Diseñar un prototipo eficiente de motor Stirling tipo Gamma	Investigar a fondo el motor Stirling tipo Gamma.	50
	Indicar los requisitos para el diseño del motor Stirling.	15
	Definir las funciones del motor Stirling.	5
	Realizar el diseño tentativo del motor Stirling	20
	Evaluar la propuesta de diseño	10
	Completar en detalle el diseño del motor Stirling.	10
Modelar matemáticamente el motor Stirling tipo Gamma	Buscar información relacionada con el modelado matemático del motor Stirling.	238
	Identificar la variables más significativas para el modelado del motor Stirling	30
	Definir las hipótesis sobre el funcionamiento del sistema	20

	Definir las ecuaciones que relacionan las variables anteriormente definidas.	30
	Encontrar por medio de las herramientas matemáticas la solución que explique el comportamiento del sistema	40
	Simular la modelación matemática en el programa Matlab para la obtención de un banco de datos.	50
Realizar una guía del proceso tecnológico de fabricación del motor Stirling tipo gamma.	Estudiar cómo se debe hacer una guía para realizar un proceso tecnológico	28
	Realizar la guía del proceso tecnológico para la construcción del motor Stirling tipo Gamma.	40
Construir un motor Stirling tipo gamma.	Comprar los materiales para la construcción de un motor Stirling.	500
	Construir todas las partes necesarias para la fabricación del motor Stirling	200

	Realizar el ensamble del motor tipo gamma y sus acabado	150
	Realizar pruebas de funcionamiento del motor Stirling	10
	Realizar un rediseño de las partes de ser necesario y realizar nuevas pruebas de funcionamiento	100
	Obtener un banco de datos del comportamiento del motor	20
Comparar los datos experimentales con los datos obtenidos mediante la simulación del motor Stirling tipo gamma.	Realizar la comparación y aproximación de las bases de datos obtenidas	40
	Realizar ajustes de la modelación de ser necesario	30
TOTAL		1636

7. BIBLIOGRAFÍA

Libros:

[1] Flóres, J. Á. (2002). *Máquinas termicas motoras - 2*. Barcelona: Copistería Miracles.SL.

[2] Kockums. (s.f.). *Stirling Engines*. Recuperado el 02 de 08 de 2010, de www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/misc/subm.html

[3] Llave, C., Clausó, P., Matellanes, E., & Martínez-Abarca, C. (2010). *LA MÁQUINA OLVIDADA RESCATADA PARA EL FUTURO EL MOTOR STIRLING DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL.* Madrid: I.E.S. Leonardo Da Vinci.

[4] Sarango, J. E. *Diseño y fabricación de un prototipo de motor Stirling.*

8. ANEXOS

10.1. Matriz de consistencia específica

PROBLEMA ESPECIFICO: El diseño de una prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	**UNIDAD DE OBSERVACIÓN**	**HIPÓTESIS ESPECÍFICA**	**SISTEMA CATEGORIAL**
Diseñar un prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma.	Los motores Stirling tipo Gamma. El ciclo Stirling. Otros ciclos de los motores Stirling.	Con la realización de un diseño adecuado del motor Stirling se podrá alcanzar la generación de 40 vatios	El motor Stirling. Funcionamiento del motor Stirling. Tipos de motores Stirling. Ciclo Stirling. Trabajo por ciclos. Teoría Schmidt para motores Stirling.

PROBLEMA ESPECIFICO: El adecuado modelo matemático que evidencie el comportamiento del motor Stirling gamma.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	**UNIDAD DE OBSERVACIÓN**	**HIPÓTESIS ESPECÍFICA**	**SISTEMA CATEGORIAL**
Modelar matemáticamente el motor Stirling tipo gamma.	El ciclo Stirling. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del motor Stirling tipo Gamma.	Con un adecuado modelado matemático se comprobará la relación que posee la diferencia de temperatura existente en el motor Stirling y su rendimiento.	Ciclo Stirling. Número de Beale. Teoría Schmidt para motores Stirling.

PROBLEMA ESPECIFICO: El proceso tecnológico que permitirá la construcción del motor Stirling tomando en consideración la tecnología local.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	**UNIDAD DE OBSERVACIÓN**	**HIPÓTESIS ESPECÍFICA**	**SISTEMA**

			CATEGORIAL
Realizar una guía del proceso tecnológico de fabricación del motor Stirling tipo gamma. Construir un motor Stirling tipo gamma.	El motor Stirling tipo Gamma. Los materiales para la construcción del motor Stirling.	Con un apropiado diseño del proceso tecnológico de la fabricación del motor Stirling se podrá realizar su construcción de una manera más eficiente.	Construcción de un motor Stirling. Diseño de un proceso tecnológico.

PROBLEMA ESPECIFICO: La debida correlación entre los datos experimentales y los obtenidos en base a simulación			
OBJETIVO ESPECÍFICO	**UNIDAD DE OBSERVACIÓN**	**HIPÓTESIS ESPECÍFICA**	**SISTEMA CATEGORIAL**
Comparar los datos experimentales con los datos obtenidos mediante la simulación del motor Stirling tipo gamma.	Modelación y simulación del sistema. Motor Stirling tipo Gamma.	Con una correcta selección de los factores más influyentes en el habitual desempeño del motor Stirling tendremos una mejor correlación de los datos obtenidos en campo y los obtenidos por el proceso de simulación.	Funcionamiento de un motor Stirling.

10.2. Matriz de operatividad de objetivos específicos

Objetivo específico: Diseñar un prototipo eficiente de motor Stirling tipo gamma.						
Actividad o terea	**Metodología**	**Fecha**		**Responsable**	**Costo**	**Resultados esperados**
		Inicio	**Final**			
Investigar a fondo el motor Stirling tipo Gamma.	➢ Se consultará en libros, revistas y medios virtuales acerca del motor Stirling. ➢ Entrevistas con profesionales capacitados en el campo.	15-08-10	31-08-10	El autor	Internet $ 10.00 Copias $ 15.00 Varios $ 25.00	Conocer el principio de funcionamiento del motor Stirling. Conocer los factores que determinan su eficiente rendimiento.

Indicar los requisitos para el diseño del motor Stirling.	➢ Se procederá a enlistar los requisitos necesarios para el diseño del motor Stirling.	02-01-11	02-01-11	El autor	Varios $ 15.00	Conocer los requisitos para el diseño del motor Stirling.
Definir las funciones del motor Stirling.	➢ Se definirá lo que se desea que el motor Stirling cumpla en su desarrollo habitual.	02-01-11	02-01-11	El autor	Varios $ 5.00	Establecer las funciones del motor Stirling.
Realizar el diseño tentativo del motor Stirling	➢ Se procederá a realizar diseños del Motor Stirling.	03-01-11	17-01-11	El autor	Varios $ 20.00	Obtener un primer diseño de lo que será el motor Stirling.
Evaluar la propuesta de diseño	➢ Se procederá a estimar que tan bien podría funcionar el motor con el diseño obtenido.	18-01-11	25-01-11	El autor	Varios $10.00	Conocer que tan fiable será nuestro motor con el diseño realizado.
Completar en detalle el diseño del motor Stirling.	➢ Se realizará el diseño detallado de lo que será el motor Stirling tipo Gamma.	25-01-11	31-01-11	El autor	Varios $10.00	Obtener el diseño de motor Stirling tipo Gamma.

Objetivo específico: Modelar matemáticamente el motor Stirling tipo gamma.						
Actividad o terea	**Metodología**	**Fecha**		**Responsable**	**Costo**	**Resultados esperados**
		Inicio	**Final**			
Buscar información relacionada con el modelado matemático del motor Stirling.	➢ Consultas en libros, revistas y medios virtuales ➢ Entrevistas con profesionales capacitados en el campo.	01-02-11	20-02-11	El autor	Internet $8.00 Copias $ 20.00 Consulta $ 150.00 Varios $ 60.00	Conocer la manera de realizar el modelado matemático de un motor Stirling.
Identificar la variables más significativas para el modelado del motor Stirling	➢ Se procederá al análisis de de la variables que intervienen en el funcionamiento y rendimiento del motor Stirling.	21-02-11	29-02-11	El autor	Varios $ 30.00	Conocer las variables más significativas dentro del desarrollo y desempeño del motor Stirling.
Definir las hipótesis sobre el funcionamiento del sistema	➢ Se establecerán hipótesis que permitan una mayor comprensión de lo que es el funcionamiento del sistema del motor Stirling.	01-03-11	11-03-11	El autor	Varios $ 20.00	Establecer las hipótesis que nos permitan comprender de mayor manera el funcionamiento del motor Stirling.
Definir las ecuaciones que relacionan las variables anteriormente definidas.	➢ Se procederá a definir las ecuaciones que rigen el comportamiento del motor Stirling y que relacionan las variables establecidas como las más influyentes en el comportamiento del mismo	12-03-11	18-03-11	El autor	Varios $ 30.00	Establecer el comportamiento del motor Stirling y de la relación de las variables en dicho comportamiento a través de las ecuaciones matemáticas.
Encontrar por medio de las herramientas matemáticas la solución que explique el comportamiento del sistema	➢ Se procederá a utilizar herramientas matemáticas como la transformada de Laplace y otras herramientas para poder encontrar la solución de las ecuaciones establecidas y por ende conocer el comportamiento del sistema	19-03-11	31-03-11	El autor	Varios $ 40.00	Modelar matemáticamente el comportamiento de un motor Stirling tipo Gamma.

Simular la modelación matemática en el programa Matlab para la obtención de un banco de datos.	⅄ Se procederá a programar en el Matlab el modelo matemático obtenido	01-04-11	08-04-11	El autor	Varios $ 50.00	Simular el comportamiento del motor Stirling y obtener una base de datos del motor.

Objetivo específico: Realizar una guía del proceso tecnológico de fabricación del motor Stirling tipo gamma.						
Actividad o terea	**Metodología**	**Fecha**		**Responsable**	**Costo**	**Resultados esperados**
		Inicio	**Final**			
Estudiar cómo se debe hacer una guía para realizar un proceso tecnológico,	⅄ Se consultará en libros, revistas, en medios electrónicos, etc. La manera de realizar una guía para procesos tecnológicos. ⅄ Se realizará entrevistas a expertos del tema.	09-04-11	15-04- 11	El autor	Internet $ 10.00 Copias $ 6.00 Varios $ 12.00	Conocer la manera de realizar una buena guía de procesos tecnológicos de la construcción de un motor Stirling.
Realizar la guía del proceso tecnológico para la construcción del motor Stirling tipo Gamma.	⅄ Se realizará la construcción del motor Stirling para poder definir la guía del proceso tecnológico de la construcción del mismo	16-04-11	06-05-11	El autor	Varios $ 40.00	Obtener la guía del proceso metodológico de la construcción de un motor Stirling.

Objetivo específico: Construir un motor Stirling tipo gamma.						
Actividad o terea	**Metodología**	**Fecha**		**Responsable**	**Costo**	**Resultados esperados**
		Inicio	**Final**			
Comprar los materiales para la construcción de un motor Stirling.	⅄ Se comprará en el mercado local todos los materiales necesarios para la construcción de un motor Stirling.	07-05-11	20-05-11	El autor	Materiales $ 500.00	Obtener todos los materiales necesarios para la construcción del motor Stirling
Construir todas las partes necesarias para la fabricación del motor Stirling	⅄ A través de maquinas herramientas se maquinará y construirá todas las partes componentes del motor Stirling tipo Gamma.	21-05-11	27-05-11	El autor	Varios $ 200.00	Obtener todas las piezas componentes del motor Stirling tipo Gama.
Realizar el ensamble del motor tipo gamma y sus acabado	⅄ Se ensamblaran todas la piezas del motor tipo gamma, se introducirá el fluido de trabajo y se sellará perfectamente el motor.	28-05-11	03-06-11	El autor	Varios $ 150.00	Obtener un motor Stirling.
Realizar pruebas de funcionamiento del motor Stirling	⅄ Se realizará pruebas de funcionamiento del motor Stirling.	04-06-11	10-06-11	El autor	Varios $ 10.00	Conocer cuál es funcionamiento del motor construido y saber si se necesita un reajuste o rediseño de sus partes

Realizar un rediseño de las partes de ser necesario y realizar nuevas pruebas de funcionamiento	⮝ Se realizará de ser necesario un rediseño de las partes y se realizará nuevas pruebas de funcionamiento del motor Stirling	11-06-11	24-06-11	El autor	Varios $ 100.00	Ajustar el motor Stirling tipo Gamma para que trabaje de acuerdo a lo establecido.
Obtener un banco de datos del comportamiento del motor	⮝ Se experimentará para obtener un banco de datos del comportamiento del motor.	25-06-11	01-07-11	El autor	Varios $ 20.00	Obtener una base de datos del motor Stirling tipo Gamma construido.

Objetivo específico: Comparar los datos experimentales con los datos obtenidos mediante la simulación del motor Stirling tipo gamma.						
Actividad o terea	**Metodología**	**Fecha**		**Responsable**	**Costo**	**Resultados esperados**
		Inicio	**Final**			
Realizar la comparación y aproximación de las bases de datos obtenidas	⮝ Se utilizará técnicas para la comparación e interpretación de las bases de datos obtenidas tanto mediante la simulación del funcionamiento del motor como del funcionamiento del motor construido	02-07-11	15-07-11	El autor	Varios $ 40.00	Comparar e interpretar las bases de datos obtenidas para validar tanto el motor construido como la modelación matemática.
Realizar ajustes de la modelación de ser necesario	⮝ Se realizará un análisis de la modelación matemática de ser necesario con el fin de que la contrastación de las bases de datos sea lo más próximas posibles.	16-07-11	31-07-11	El autor	Varios $ 30.00	Poseer base de datos que se aproximen lo aceptable en sus resultados.

10.3. Matriz de control de resultados

Nº	RESULTADOS	FECHA	FIRMA DEL DOCENTE
1	Conocer el principio de funcionamiento del motor Stirling. Conocer los factores que determinan su eficiente rendimiento.	31-08-10	
2	Conocer los requisitos para el diseño del motor Stirling.	02-01-11	
3	Establecer las funciones del motor Stirling.	02-01-11	
4	Obtener un primer diseño de lo que será el motor Stirling.	17-01-11	
5	Conocer que tan fiable será nuestro motor con el diseño realizado.	25-01-11	
6	Obtener el diseño de motor Stirling tipo Gamma.	31-01-11	
7	Conocer la manera de realizar el modelado matemático de un motor Stirling.	20-02-11	
8	Conocer las variables más significativas dentro del desarrollo y desempeño del motor Stirling.	29-02-11	
9	Establecer las hipótesis que nos permitan comprender de mayor manera el funcionamiento del motor Stirling.	11-03-11	
10	Establecer el comportamiento del motor Stirling y de la relación de las variables en dicho comportamiento a través de las ecuaciones matemáticas.	18-03-11	
11	Modelar matemáticamente el comportamiento de un motor Stirling tipo Gamma.	31-03-11	
12	Simular el comportamiento del motor Stirling y obtener una base de datos del motor.	08-04-11	
13	Conocer la manera de realizar una buena guía de procesos tecnológicos de la construcción de un motor Stirling.	15-04-11	
14	Obtener la guía del proceso metodológico de la construcción de un motor Stirling.	06-05-11	
15	Obtener todos los materiales necesarios para la construcción del motor Stirling	20-05-11	
16	Obtener todas las piezas componentes del motor Stirling tipo Gama.	27-05-11	
17	Obtener un motor Stirling que genere 40 vatios.	03-06-11	
18	Conocer cuál es funcionamiento del motor construido y saber si se necesita un reajuste o rediseño de sus partes	10-06-11	
19	Ajustar el motor Stirling tipo Gamma para que trabaje de acuerdo a lo establecido.	24-06-11	

20	Obtener una base de datos del motor Stirling tipo Gamma construido.	01-07-11	
21	Comparar e interpretar las bases de datos obtenidas para validar tanto el motor construido como la modelación matemática.	15-07-11	
22	Poseer base de datos que se aproximen lo aceptable en sus resultados.	31-07-11	

10.4. Esquema, diagramas de proceso, planos y fotos

Fig. 67. Modelo de un motor Stirling tipo Gamma

Fig. 68. Modelo de un prototipo de motor Stirling tipo Gama

1. TITULO *165*

2. PROBLEMÁTICA *166*

2.1. Antecedentes *166*

2.2. Situación Problemática **167**

2.3. Problema general de investigación **167**

2.4. Delimitación **168**

2.4.1. Problemas específicos 168

2.4.2. Espacio 168

2.4.3. Tiempo 168

2.4.4. Unidades de observación 168

3. JUSTIFICACIÓN Y VIABILIDAD *170*

3.1. Justificación **170**

3.2. Viabilidad **171**

4. OBJETIVOS *172*

4.1. Objetivo general **172**

4.2. Objetivos específicos **172**

6. METODOLOGÍA ..... *¡Error! Marcador no definido.*

6.1. Matriz de consistencia general ..... ¡Error! Marcador no definido.

6.2. Materiales, métodos y técnicas de trabajo ..... ¡Error! Marcador no definido.

6.2.1. Materiales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.2.2. Métodos y técnicas de trabajo ..... **¡Error! Marcador no definido.**

7. CRONOGRAMA ..... ¡Error! Marcador no definido.

8. PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO 173

9. BIBLIOGRAFÍA 176

10. ANEXOS 177

10.1. Matriz de consistencia específica 177

10.2. Matriz de operatividad de objetivos específicos 178

10.3. Matriz de control de resultados 184

10.4. Esquema, diagramas de proceso, planos y fotos 186