



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Reconfiguración de un motor Stirling para generación de
energía basada en combustión limpia

Tesis presentada

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN MECATRÓNICA

por

Jaime Pérez Vilchis

asesorado por

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández

Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán

Puebla Pue.
Julio 2016

Título: Reconfiguración de un motor Stirling para generación de energía basada en combustión limpia

Estudiante: JAIME PÉREZ VILCHIS

COMITÉ

Dra. Liliana Cortez Georgievna
Presidente

Dr. Antonio Michua Camarillo
Secretario

M.c. David César Malpica Moreda
Vocal

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández
Asesor

Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán
Asesora

Índice general

Dedicatoria	IX
Agradecimientos	XI
Resumen	XIII
Introducción	XV
1. Estado del arte del motor Stirling	1
1.1. Inicios del motor Stirling	1
1.2. Los motores de Ericsson y Lenoir	3
1.3. Un antecedente español: el motor de Jaime de Arbós y Tor	5
1.4. Motor stirling en la actualidad	7
1.4.1. SOLO 161 Motor Stirling	7
2. Funcionamiento del motor Stirling	11
2.1. Funcionamiento general de una máquina térmica	11
2.1.1. Proceso de una máquina térmica	12
2.2. El principio termodinámico de un motor Stirling	13
2.3. Componentes de un motor Stirling	14
2.3.1. Foco de calor	16
2.3.2. Desplazador	16
2.3.3. Pistón de trabajo	16
2.3.4. Regenerador	17
2.3.5. Volante	19
2.3.6. Intercambio de calor	20
2.4. Tipos de motor Stirling	21
2.4.1. Motor Stirling tipo alfa	21
2.4.2. Motor Stirling tipo beta	22
2.4.3. Motor Stirling tipo gamma	22
3. Ciclo termodinámico del motor Stirling	25
3.1. Gas ideal	25
3.1.1. Características del gas ideal	26
3.2. Gas real ecuación de Van der Waals	26
3.3. Ciclo ideal del motor Stirling	27
3.4. Rendimiento del motor Stirling	31

4. Obtención de los parámetros del motor Stirling	35
4.1. Análisis sobre el ciclo termodinámico del motor Stirling	35
4.1.1. Análisis termodinámico ideal del motor Stirling	35
4.1.2. Análisis termodinámico real por Van der Waals	38
4.1.3. Análisis termodinámico por manivela	39
5. Desarrollo mecánico del motor Stirling y aplicaciones	41
5.0.1. Sellado del pistón de trabajo	42
5.0.2. Manufacturación del dispositivo receptor de calor (foco de calor)	43
5.1. Manufactura los desplazadores	44
5.2. Plataforma Solar de Almería, Centro de Investigación Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)	50
5.2.1. Sistemas de concentración solar	50
5.2.2. DISTAL I	51
5.2.3. DISTAL II	52
5.3. Aplicación con disco solar Stirling Grizzly H8103	52
5.3.1. Aplicación con dínamo Stirling Grizzly H8103	54
6. Conclusiones	57
Bibliografía	59

Índice de figuras

1.1. Dibujos de la patente británica de Stirling de 1816 (TPOUK, Newport) [9].	2
1.2. Dibujo de la patente estadounidense US 22 281 sobre la máquina de J. Ericsson [9].	4
1.3. Dibujos de la patente estadounidense US 31 722 de Lenoir (USPTO, Washington).	5
1.4. Dibujo del privilegio real ES 2 181 PR sobre la máquina mejorada de J. Ericsson [9].	6
1.5. Dibujos del privilegio real ES 2 570 PR de J. de Arbós y Tor, solicitado el 25 de octubre de 1862 (OEPM, Madrid) [11].	7
1.6. Diagrama del Motor Stirling Solo 161 [13].	8
1.7. Motor Stirling Solo 161 [13].	8
2.1. Proceso común para todos los motores térmicos [15].	12
2.2. Diagrama esquemático del funcionamiento de motor de combustión interna [15].	13
2.3. Ejemplo de Ciclo Cerrado de Turbinas de Gas [15].	14
2.4. Principio del desplazador. A medida que el desplazador se mueve hacia arriba y hacia abajo, desde el espacio caliente al espacio frío a través del calentador [11].	15
2.5. Motor Stirling 4th construido en 1840, partes principales etiquetados [16].	15
2.6. Pistón de trabajo.	17
2.7. Regenerador externo [9].	18
2.8. Regeneradores utilizados en el motor Stirling Multifase [4].	19
2.9. Volante [4].	20
2.10. Motor Stirling intercambio de calor (frío y caliente) [4].	20
2.11. Motor tipo alfa [20].	21
2.12. Motor Stirling tipo beta [4].	22
2.13. . Motor Stirling tipo gamma [20].	23
3.1. Ciclo ideal del motor Stirling P-v [14].	28
3.2. Comprensión isotérmico [18], [14].	28
3.3. Suministro de calor a volumen constante [18], [14].	29
3.4. Expansión isotérmico [18], [14].	30
3.5. Extracción de calor a volumen constante [18], [14].	31
4.1. Gráfica sobre el gas ideal P-V.	37
4.2. Gráfica sobre el gas helio con Van der Waals P-V.	38
4.3. Giro de la manivela del motor Stirling tipo gamma.	39
4.4. Gráfica sobre el gas real.	40
5.1. Stirling Grizzly H8103	41
5.2. Oring para sellado del piston de trabajo.	42
5.3. Fuga de agua.	42
5.4. Sellado por medio del pegamento loctite.	43

5.5. Tubo de aluminio (izquierda), tubo de latón (derecha).	43
5.6. Realización del foco de calor.	44
5.7. Proceso de sellado.	45
5.8. Materiales para el desplazador.	46
5.9. Molde interno.	47
5.10. Tapones para foco de calor.	48
5.11. Mediciones con termómetro infrarojo digital.	49
5.12. Creación del desplazador.	49
5.13. Configuraciones más habituales de los sistemas de concentración solar utilizados en centrales termosolares [13].	51
5.14. Sistema de disco solar DISTAL I [13].	51
5.15. Sistema de disco solar DISTAL II [13].	52
5.16. Disco solar parabólico.	53
5.17. Rediseño para aplicarlo a un disco solar.	53
5.18. Disco solar con motor Stirling.	54
5.19. Diseño alfa-gamma.	55
5.20. Diseño para la adaptación de un dínamo.	55
5.21. Diseño lateral alfa-gamma.	56

Índice de tablas

3.1. Tabla de Van Der Waals	27
4.1. Datos iniciales sobre el gas ideal.	36
4.2. Datos de los estados P-V.	37
4.3. Datos totales del ciclo completo P-V.	37
4.4. Datos de los estados P-V con Van der Waals.	38
4.5. Datos totales del ciclo completo P-V Van der Waals.	39
5.1. Datos sobre las pruebas de los materiales.	47

Dedicatoria

A mis padres

Por el tiempo que han estado apoyándome, su perseverancia desde niño hasta la llegada de la universidad, por los valores que me inculcaron afrontando la adversidad que se han puesto en nuestros caminos y por enseñarme a valorar la vida ya que con salud todo se puede.

A mis hermanos

Por haberme aguantado todos estos años, tratando de hacer lo menos posible de ruido y experimentando dentro de la casa para que esta tesis fuera funcional.

A mis amigos

Por pasar la mayoría de la carrera con ellos, aprendiendo de sus experiencias, actitudes y sus conocimientos que me aportaron, tanto dentro como fuera de la universidad, por compartir tiempo fuera de nuestras obligaciones con bebidas y video juegos.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a mis asesores, la Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán y al Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández por su paciencia, su dedicación y sobre todo el tiempo que invirtieron para que este momento pasara.

También al Lic. José Héctor Martín Loranca Regules por su apoyo, su paciencia y sus consejos en la parte mecánica para la manufacturción de las piezas del motor Stirlin.

Sus experiencias y conocimientos me dieron a entender que las cosas no se llevan a la ligera, me enseñaron que estos procesos siempre llevan un desarrollo específico, no importando si este sea insignificante o grande, estas acciones tienen un por qué y el cual de su propósito tal que esto repercutirá en las decisiones que tome en la vida.

Resumen

En este trabajo se propone poner en marcha un Motor Stirling tipo vertical usando como fuente de combustible el alcohol, tratando de minimizar emisiones CO_2 , para ello se adquirió material para manufacturar y ver posibles tamaños y medidas que se adecuen al motor. Esto llevara al uso de sistemas de medición como el manómetro y el termómetro digital con puntero para realizar un modelo termodinámico basados en la información recaba sobre las ecuación del gas ideal y la ecuación real de Van der Waals, proponiendo a el helio como una comparativa teórica sobre los datos generados por el aire, teniendo una idea mas clara de lo que pasa en cada uno de los estados, los rendimientos y los diagramas. Lo anterior permitiría proponer algunas aplicaciones que se podrían implementar basado en el motor Stirling, modificando algunas partes de su diseño original.

Introducción

Los motores Stirling presentan características que pueden utilizarse en diversas áreas de estudio aplicadas para el consumo óptimo de energía. Esto aplica en hogares, empresas e industrias. Además, el motor es amigable con el entorno debido a que podría tener una alta utilidad en la sociedad, al ser barato y reducir considerablemente el uso de electricidad proporcionado por las empresas [1], [2].

El propósito es dar una posible idea sobre las aplicaciones que se podrían usar en base a necesidades básicas que se puedan abarcar, cabe puntualizar que se daría una idea general sobre algunas aplicaciones determinando si es viable su implementación ya teniendo datos que nos arrojen el sistema [3], [4].

Como bien se sabe estamos en un ambiente, donde consumimos muchos recursos fósiles para el desarrollo de la sociedad, enfocada en materias primas y necesidades humanas que van cambiando tras la evolución de la tecnología y nuevos tipos de materiales que se necesitan explotar, llevando mucho consumo de energía. Tenemos que ver la forma de no consumir tantos recursos con el fin de ver proyectos e ideas que están expuestas a la sociedad y estos nos puedan ayudar reduciendo considerablemente el consumo de la energía y ayudar un poco al medio ambiente, lo cual hace posible regular mejor su consumo y utilizar diferentes fuentes de energía limpia para su uso [5],[6] .

Por lo comentado anteriormente, el motor Stirling podría usarse en lugares de bajos recursos y en ciudades, donde cuenten con combustibles flamables o con una buena incidencia solar, con condiciones no volátiles, donde permitan generar su propia energía eléctrica cubriendo con lo básico sin afectar en gran medida al medio ambiente [5], [7].

El objetivo general de este trabajo de tesis consiste en estudiar el motor Stirling tipo vertical marca Grizzly modelo H8103 y las posibles aplicaciones que tendrían para poder generara energía con base a este mismo.

Por consiguiente, los objetivos específicos se muestran a continuación:

1. Investigar las funciones específicas del motor Stirling para poder ponerlo en marcha.
2. Analizar el desempeño del motor Stirling para posibles aplicaciones en la generación de energía eléctrica.

3. Examinar el prototipo ya especificado (Vertical) y ver posibles formas de sustitución de piezas por medio de la manufacturación.
4. Diseñar un modelo termodinámico con las leyes correspondientes, para evaluar el desempeño de un motor Stirling frente a las condiciones que sean expuestas.
5. Recabar mediciones en base a las leyes de la termodinámica, para obtener los rendimientos.

A continuación se detalla la estructura de la tesis y el contenido de los capítulos.

Capítulo 1: Se aborda la historia en general del motor Stirling, enfocada en los inicios que llevaron a su realización a través del tiempo y como se caracteriza actualmente puesto que algunas partes fueron mejoradas con el paso del tiempo puesto que se fueron añadiendo nuevas piezas también se describe parte de su funcionamiento original enfocada en las patentes que se muestran en este capítulo, comparándolas con el parecido de otros motores pero enfocadas con el mismo principio del funcionamiento del motor Stirling.

Capítulo 2: Se presenta principalmente el funcionamiento general de una maquina térmica enfocada al motor Stirling describiendo el proceso de la maquina y el principio termodinámico, mostrando mas detalladamente los componentes principales que conlleven a la suma total de su funcionamiento y sus partes elementales para su movimiento, con el paso del tiempo las partes que conforman su funcionamiento fueron mejorando conforme a la demanda y las necesidades que se requiere.

Capítulo 3: En este capítulo se describen dos básicas ecuaciones que rigen al motor Stirling, la ley del gas ideal y el gas real de Van der Waals con base a la caracterización gráfica termodinámica de los procesos, puesto que a través del tiempo se han desarrollado mejoras basadas en las ecuaciones ya nombradas, también se puede dar un seguimiento de cada uno de los procesos y ver su comportamiento conforme a sus ciclos también se explica brevemente como se obtiene cada ecuación de estado para poder resolver los procesos requeridos.

Capítulo 4: En este Capítulo en especial se desarrolla y se analizan cada uno de los procesos del motor Stirling con los datos experimentales tomados, se pretende obtener los resultados de cada uno de sus estados y procesos (Isotherma, Isocora) comparándola teóricamente con el fluido de trabajo el helio, en los capítulos anteriores se explica que es un fluido bastante bueno en cuestión a la eficiencia y la radiación calorífica que sede, al final de este capítulo se muestran gráficas P - V con base a todos los datos recabados, también se agrega una variable sobre el giro de la manivela ya que este provoca un

estado más real al descrito.

Capítulo 5: En este capítulo se aborda la manufacturación de piezas echas en el CNC (Control Numérico Computarizado) esto llevara la idea de poder sustituir algunas piezas o dimensionarlas esto ayudara a comprobar ventajas y desventajas sobre varios tipo de medidas tomando una que se adecue a nuestras necesidades con base al desempeño esto da un inicio de proponer de manera teórica algunas formas que podrían tener para generar energía con base a un disco solar o un dinamómetro.

Capítulo 1

Estado del arte del motor Stirling

Se define máquina Stirling, como aquel dispositivo que convierte el calor en trabajo, o viceversa, a través de un ciclo termodinámico regenerativo con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo, operado dicho fluido entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío. Cuando la máquina opera de modo volumétrica recibe propiamente el nombre de máquina Stirling mientras que si opera mediante flujo permanente continuo se denomina máquina Ericsson [8].

El primer nombre que recibieron estas máquinas fue el de motores de aire caliente porque solo usaban aire como fluido de trabajo. Posteriormente, el uso de otros gases provocó que se buscaran otros nombres, como motores de gas caliente, 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 [8].

1.1. Inicios del motor Stirling

El motor Stirling fue inventado en 1816 por el reverendo R. Stirling (1790-1878) en Escocia. A mediados del siglo XIX fueron apareciendo otro tipo de máquinas térmicas, distintas a las máquinas de vapor, que constituyeron otra rama tecnológica: los llamados motores de aire caliente llamados así porque solo empleaban aire como fluido de trabajo. Posteriormente con el uso de otros gases provocó que fueran llamados de diferentes maneras, como motores de gas caliente, o bien, motores Stirling en honor a Robert 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

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DEL MOTOR STIRLING

1.1. INICIOS DEL MOTOR STIRLING

un volante, realizada por Amontons, en Francia, solo 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 a la par de la máquina de vapor.

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

Probablemente pueda considerarse a la máquina de Robert Stirling como la pionera de esta saga. El objetivo de este dispositivo era reducir el consumo de combustible en hornos, destilerías y otras factorías, gracias a la transmisión de calor mediante un dispositivo llamado “economizador de calor” hoy en día llamado regenerador. El motor de Stirling estaba basado en un ciclo cerrado de aire con combustión externa, que constaba de un cilindro abierto en su base inferior en el que evolucionaban dos pistones [8].

Uno de estos pistones, encargado de desplazar al otro, estaba ubicado en la parte superior del cilindro y tenía un diámetro menor que el pistón inferior, ubicado a cierta distancia del primero y encargado de proporcionarle fuerza. El pistón superior estaba cubierto por el llamado regenerador, que, básicamente, era un envoltorio constituido por capas superpuestas de fino hilo metálico, formando las diversas capas consecutivas ángulos rectos entre sí. La Figura 1.1 representa los dibujos de la patente británica del motor Stirling [9], [10].

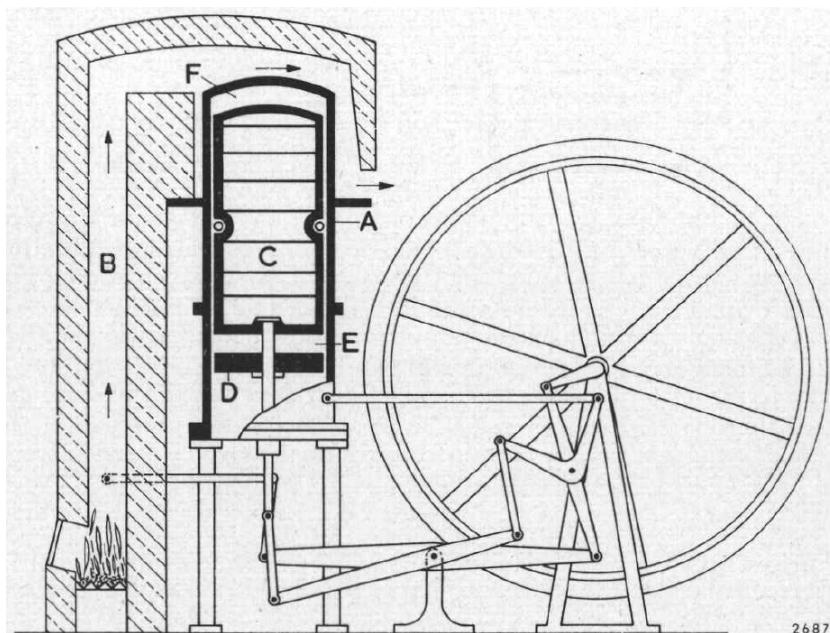


Figura 1.1: Dibujos de la patente británica de Stirling de 1816 (TPOUK, Newport) [9].

La idea básica de la Figura 1.1 “A” se calienta en la parte superior de los gases provocada por el horno “B”; la parte inferior es enfriada ya sea con agua o dejándola enfriar por el medio ambiente. El cilindro contiene al desplazador “C” y abajo se encuentra el pistón de trabajo “D”. Como el desplazador se mueve hacia arriba y abajo por el aire caliente en el cilindro “A” sucesivamente pasa hacia a el área del foco frío “E” (espacio entre el fondo del desplazador y el pistón) y el espacio caliente en “F” a través de un regenerador. El regenerador (no mostrado aquí) se encuentra en el espacio anular entre el desplazador y el cilindro, y probablemente consistía de alambre delgado enrollado alrededor del desplazador. El aire es por lo tanto el fluido de trabajo principal en el estado frío y caliente por lo tanto se somete a variaciones de temperatura y presión que hacen que se realice el trabajo en el pistón “D”.

También cita otros ingenios anteriores al de Stirling, como el motor de aire caliente de Sir George Cayley (1773-1857) esta constaba de una cámara de combustión (tipo horno) alimentada por carbón, a la que se le insuflaba una carga de aire fresco, normalmente pre-surzado mediante una bomba. El aire caliente se mezclaba con productos de combustión y era conducido a un cilindro con émbolo, donde se expansionaba y producía trabajo; sin embargo, se presentaba una gran problemática con las cenizas de la combustión que llegaban al cilindro y al pistón [9].

1.2. Los motores de Ericsson y Lenoir

El ingeniero sueco J. Ericsson (1803-1889), que vivió buena parte de su vida en los Estados Unidos después de una estancia de trece años en Inglaterra, solicitó un privilegio real en España el 16 de junio de 1859; el título de su invención era «Nueva máquina para producir fuerza motriz por medio del aire calentado». Esta misma invención fue patentada el 14 de diciembre de 1858 en los Estados Unidos, con el número de patente US 22 281. Tanto el documento español como el americano se basan en el mismo concepto, si bien el primero es un perfeccionamiento del segundo [9].

Las Figuras 1.2 y 1.4 muestran diversos dibujos del dispositivo de Ericsson. La máquina constaba de un calentador “e”, como puede verse en la zona izquierda de la Figura 1.2, donde se quemaba el combustible en el fogón “f”. En el interior de un cilindro “A” se disponían dos pistones “a” y “c”; el primero de ellos es el llamado pistón de trabajo, mientras que el segundo es el denominado pistón de suministro. El pistón “a” puede verse debajo del «volante de inercia» en la Figura 1.2, mientras que el pistón “c” se encuentra a la izquierda del “a”. Realmente el objetivo que tiene el pistón “c” es permitir el suministro de aire caliente que, al expandirse, mueve al cilindro “a”; a su vez, retira el aire enfriado una vez que se ha expandido [9].

El funcionamiento de la máquina es el siguiente: se introduce aire atmosférico en el calentador “e”, que a continuación pasa a unos canales laterales en los extremos del cilindro “A”, donde hace un recorrido semilaberíntico hasta encontrarse con el pistón “c”.

Existen unos topes que impiden que el aire salga de ese recorrido hasta que “c” llegue a una posición determinada, que viene impuesta por el pistón “a”, dado que ambos pistones “a” y “c” están unidos por un vástago “d”. Una vez que “c” permite el paso del aire caliente al espacio limitado entre ambos pistones, se produce la expansión de “a” debido al efecto del aire caliente, efecto que finaliza aproximadamente cuando el pistón a llega al extremo derecho del cilindro “A”. En ese momento, el aire del interior del cilindro se ha enfriado y debe evacuarse; ello se consigue por el efecto del volante de inercia, accionado mediante las bielas m’ y “o” que giran alrededor del cigüeñal “m”. Mediante ese movimiento, el pistón “a” se desplaza hacia la izquierda, lo que a su vez hace que el aire frío recorra el camino inverso al realizado cuando estaba caliente, hasta que se expulsa de la máquina mediante la válvula de desahogo “h”, ubicada encima del calentador “e” [9].

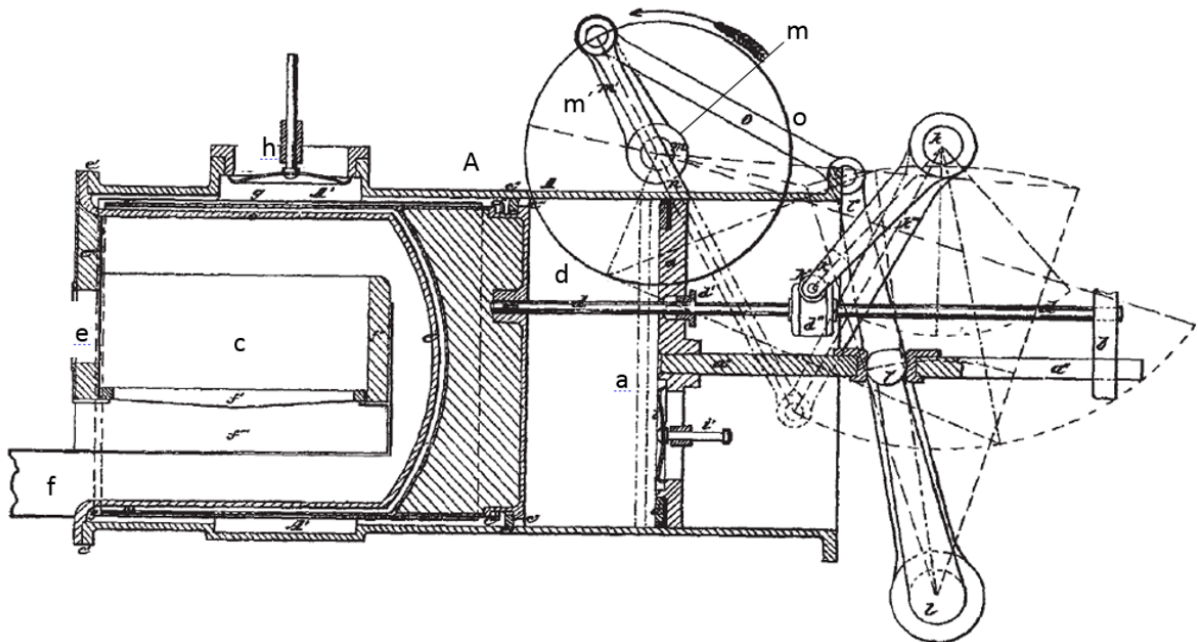


Figura 1.2: Dibujo de la patente estadounidense US 22 281 sobre la máquina de J. Ericsson [9].

J. Ericsson realizó nuevas mejoras en su máquina, que se reflejaron en el privilegio real ES 2 181 PR, titulado «Máquina de Calórico de Ericsson mejorada» y solicitado el 26 de noviembre de 1860 por Ericsson y la Compañía Pesant Hermanos. La Figura 1.4 muestra el dibujo de este privilegio real, en cuya memoria descriptiva se explica su modo de funcionamiento.

En la Figura 1.3 se muestra una invención destacable del belga E. Lenoir. En este motor se usaba una mezcla de aire y gas que se quemaba a presión atmosférica y sin compresión previa. La mezcla aire-gas se introducía en un cilindro con un émbolo de doble efecto a través de una válvula de corredera cuya apertura estaba regulada por

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DEL MOTOR STIRLING
1.3. UN ANTECEDENTE ESPAÑOL: EL MOTOR DE JAIME DE ARBÓS Y TOR

unos empujadores desde el cigüeñal “A”. Cuando el pistón había recorrido la mitad de la carrera, las válvulas se cerraban y poco después saltaba una chispa desde una bujía “B”; así la mezcla se inflamaba con el consecuente aumento de la presión, consiguiendo transmitir potencia al pistón durante la otra mitad de la carrera. El ciclo se completaba con otra carrera completa para evacuar los gases de escape.

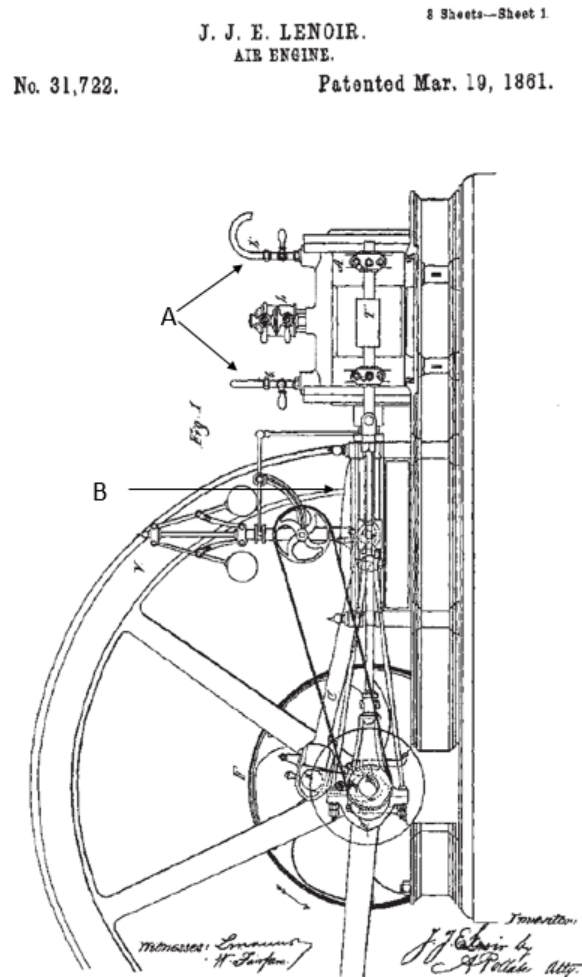


Figura 1.3: Dibujos de la patente estadounidense US 31 722 de Lenoir (USPTO, Washington).

1.3. Un antecedente español: el motor de Jaime de Arbós y Tor

El 25 de octubre de 1862 el presbítero catalán J. de Arbós y Tor solicitó el privilegio real “ES 2 570 PR” titulado «Procedimiento para obtener una mezcla gaseosa aplicable como motor a las máquinas fijas o móviles y otros usos». J. Arbós y Tor, propone un dispositivo que permita la generación de un gas combustible para alimentar un

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DEL MOTOR STIRLING
1.3. UN ANTECEDENTE ESPAÑOL: EL MOTOR DE JAIME DE ARBÓS Y TOR

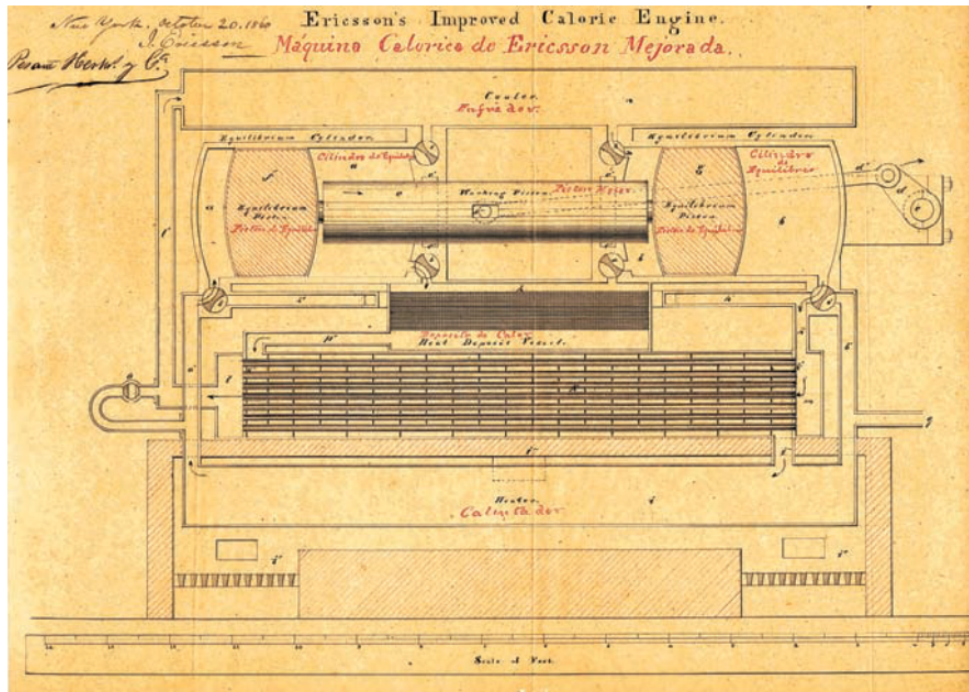


Figura 1.4: Dibujo del privilegio real ES 2 181 PR sobre la máquina mejorada de J. Ericsson [9].

motor de combustión interna; además, el calor generado en el procedimiento sirve para calentar agua que se convierte en vapor apto para su uso en una máquina de vapor ver Figura 1.5, La Figura 1.5(b) de la derecha muestra el dispositivo que permite generar la mezcla combustible para ser aplicada en el motor, mientras que la Figura 1.5(a) representa el motor en sí. El procedimiento se basa en una caldera “M” provista de sustancias poco conductoras de calor en su contorno exterior, donde se acumula agua [9].

En el documento se explica cómo se procede:

«Para poner en marcha este aparato se enciende fuego en el hornillo “A” y en el hornillo “I”, una vez encendido se llena el hornillo “A” de carbón haciendo penetrar el aire (tubo “D”) que viene de un fuelle; y cuando los gases que salen por la abertura cónica “F” son inflamables entonces se tapa dicha abertura en cuyo caso sale la mezcla gaseosa por el tubo “G” y de aquí van a parar al cilindro “H” lleno de carbón incandescente para ser introducida junto con el aire en el cilindro “V”, donde por su combinación con el oxígeno, mediante la chispa eléctrica o alambre de platino candentes, se produce el esfuerzo necesario para hacer recorrer el pistón la mitad de su carrera; y como la formación de la mezcla gaseosa es continua en ambas cara.»

Desgraciadamente Arbós no da una descripción más detallada de la máquina de combustión interna que, por los pocos detalles, parece asemejarse a la de E. Lenoir: la existencia de «la chispa eléctrica o alambre de platino candentes» y la válvula de corredera

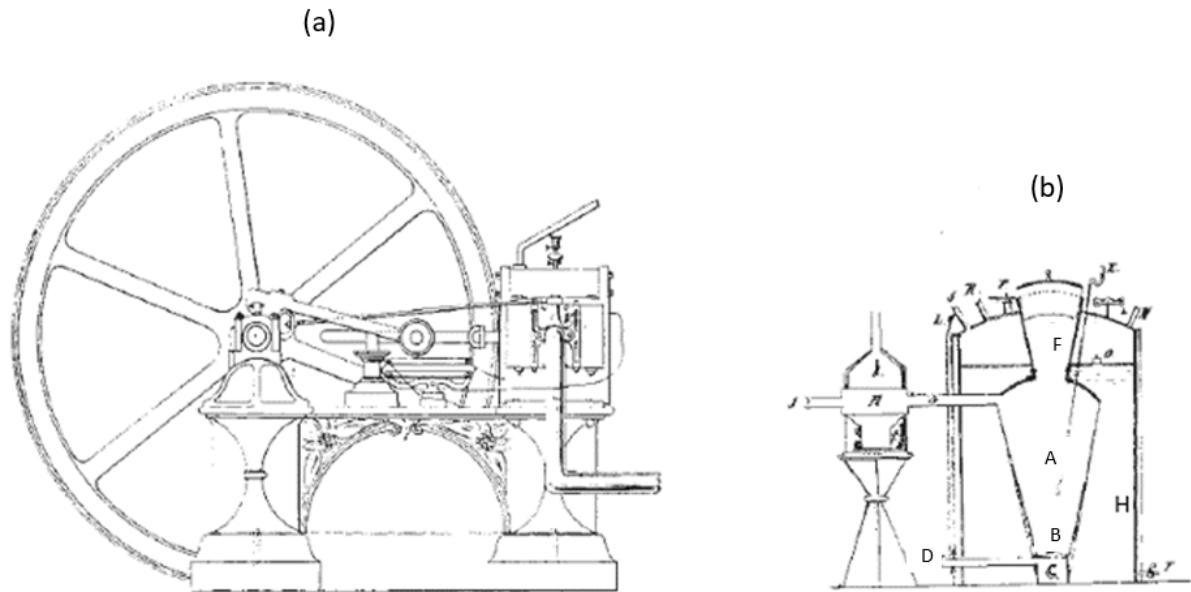


Figura 1.5: Dibujos del privilegio real ES 2 570 PR de J. de Arbós y Tor, solicitado el 25 de octubre de 1862 (OEPM, Madrid) [11].

que según se aprecia en la Figura 1.5 parece actuar sobre el cilindro “V”, son elementos comunes con el motor de E. Lenoir. Sin embargo éste presentó su invención en España dos años antes que Arbós. La invención de J. de Arbós tiene certificada su puesta en práctica en Barcelona el 9 de septiembre de 1863. La caducidad de este privilegio real tuvo lugar el 31 de diciembre de 1877, por fenecimiento, tras quince años de duración [9].

1.4. Motor stirling en la actualidad

En esta sección se muestra el tipo de motores Stirling, en la actualidad, también se hace referencia sobre algunas sedes en las que se está estudiando y utilizando mundialmente; en la actualidad las empresas generar electricidad con discos solares y estos proporcionan electricidad a diferentes comunidades de España (Almería), Italia (Milán), Francia (Odeillo) entre otros. En consecuencia con esta idea algunos países están proponiendo convenios con las cedes de CIEMAT (Centro de Investigación Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas).

1.4.1. SOLO 161 Motor Stirling

Actualmente el motor SOLO 161 es uno de los motores mas potentes y eficientes que se han creado (Figura 1.7). Es un motor V2 que usa Helio e Hidrógeno como gas de operación está construido por un cilindro de compresión y un cilindro expansión en el que el gas de trabajo se mueve en un ciclo termodinámico cerrado. En el interior

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DEL MOTOR STIRLING

1.4. MOTOR STIRLING EN LA ACTUALIDAD

del cilindro de compresión el gas se comprime isotérmicamente a un nivel bajo de temperatura por enfriamiento con agua, luego se mueve a través del regenerador, donde se calienta hasta $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el cilindro de expansión. Durante la expansión isotérmico el gas se calienta por el calentador, después el gas se mueve hacia atrás a través del regenerador, donde se enfría al cilindro de compresión [12].

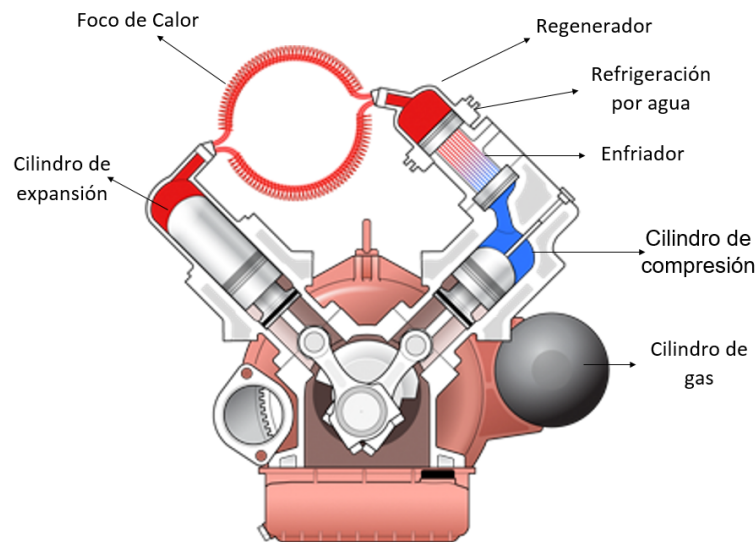


Figura 1.6: Diagrama del Motor Stirling Solo 161 [13].

El calentador consiste en pequeños tubos que se calientan hasta $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde el exterior por un quemador. El fluido de trabajo enfría una pequeña un pequeño intercambiador de calor refrigerado por agua. El regenerador esta comprimido por una malla metálica que puede ser almacenado durante el ciclo térmico. Usualmente el Helio es usado como fluido de trabajo debido a las buenas propiedades térmicas y aerodinámicas. Debido al ciclo cerrado con la transferencia de calor desde el exterior a través del calentador el motor Stirling es independiente de la fuente de calor.

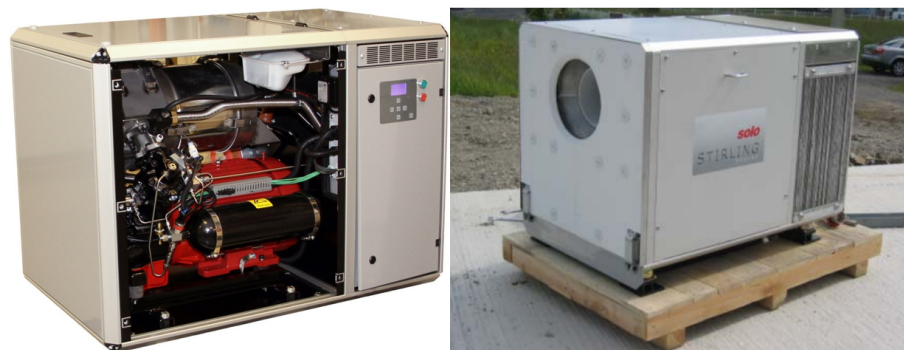


Figura 1.7: Motor Stirling Solo 161 [13].

Si un quemador es usado los gases de combustión están dejando la cámara de combustión con una temperatura aproximada los 800°C . Para alcanzar una buena eficiencia la energía térmica tiene que ser transferido al aire de combustión por un precalentador de aire, donde el aire se calienta hasta 600°C . Por esta razón, los quemadores para motores Stirling eficientes difieren por el pre-calentamiento del aire de las cámaras de combustión de calentamiento normales y están trabajando en un nivel de temperatura mucho más alta $1200\text{-}2000^{\circ}\text{C}$ [12].

En este capítulo revisamos el estado del arte del motor Stirling, se definió este dispositivo y algunos otros motores para su comparación, se presentaron las diferentes configuraciones del motor Stirling basándonos en los reportes de patentes reportadas. Finalmente se presentaron diferentes usos y tipos del motor Stirling asociados; en el siguiente capítulo se presenta el funcionamiento del motor Stirling.

Capítulo 2

Funcionamiento del motor Stirling

En este capítulo se muestran los principios termodinámicos que rigen el funcionamiento del motor Stirling, también se describen los procesos que acompañan cada tipo de configuración de este mismo. Posteriormente se analizan los procesos termodinámicos que conllevan a su movimiento, las condiciones ideales para que estos generen su movimiento. Por último se muestran las condiciones ideales del motor Stirling.

2.1. Funcionamiento general de una máquina térmica

Los ciclos termodinámicos se pueden dividir en dos categorías generales: los ciclos de potencia y los ciclos de refrigeración. Los dispositivos o sistemas que se usan para producir una salida neta de potencia se llaman a menudo motores o máquinas térmicas, y los ciclos termodinámicos en los que operan se llaman ciclos de potencia. Los dispositivos o sistemas que se usan para producir un efecto de refrigeración se llaman refrigeradores, acondicionadores de aire o bombas térmicas, los ciclos en los que operan se llaman ciclos de refrigeración [14].

Los ciclos termodinámicos se pueden también clasificar como ciclos de gas y ciclos de vapor, dependiendo de la fase del fluido de trabajo. En los ciclos de gas, el fluido de trabajo permanece en la fase gaseosa durante todo el ciclo, mientras que en los ciclos de vapor, el fluido de trabajo existe en fase de vapor durante una parte del ciclo y en fase líquida durante otra parte además los ciclos termodinámicos se pueden clasificar en: ciclos cerrados y abiertos. En los ciclos cerrados, el fluido de trabajo vuelve al estado inicial al final del ciclo y se recircula. En los ciclos abiertos, el fluido de trabajo se renueva al final de cada ciclo en vez de recircularse. En los motores de automóvil, los gases de combustión escapan y se reemplazan con nueva mezcla aire-combustible al final de cada ciclo. El motor opera en un ciclo mecánico, pero el fluido de trabajo no recorre un ciclo termodinámico completo. Las máquinas térmicas se clasifican como las de combustión interna y las de combustión externa, dependiendo de cómo se suministra calor al fluido de trabajo. En las máquinas de combustión externa (como son las plantas termoeléctricas que usan vapor de agua), el calor se suministra al fluido de trabajo desde una fuente

externa como un quemador, un pozo geotérmico, un reactor nuclear o incluso el Sol. En las máquinas de combustión interna (como los motores de automóvil) esto se hace quemando el combustible dentro de los límites del sistema [14].

2.1.1. Proceso de una máquina térmica

Como cualquier máquina térmica, el motor Stirling pasa por los cuatro procesos básicos de compresión, calentamiento, expansión y el enfriamiento (Figura 2.1). En la Figura 2.2 se muestra cómo funciona un motor de combustión interna de automóvil. En este motor se conforma una mezcla de gas-aire que se comprime usando trabajo almacenado en el pistón de la expansión de un ciclo anterior. A continuación, la mezcla de gas se calienta por encendido, permitiendo que se queme. La mezcla de gas a mayor presión provocando que se expanda formando más trabajo de lo que se requiere para la compresión y los resultados en el trabajo total de salida. En este motor en particular, la mezcla de gas se enfría muy poco. Sin embargo, los gases de escape se descartan y una mezcla de gas fresco se pone en a través del carburador [15].

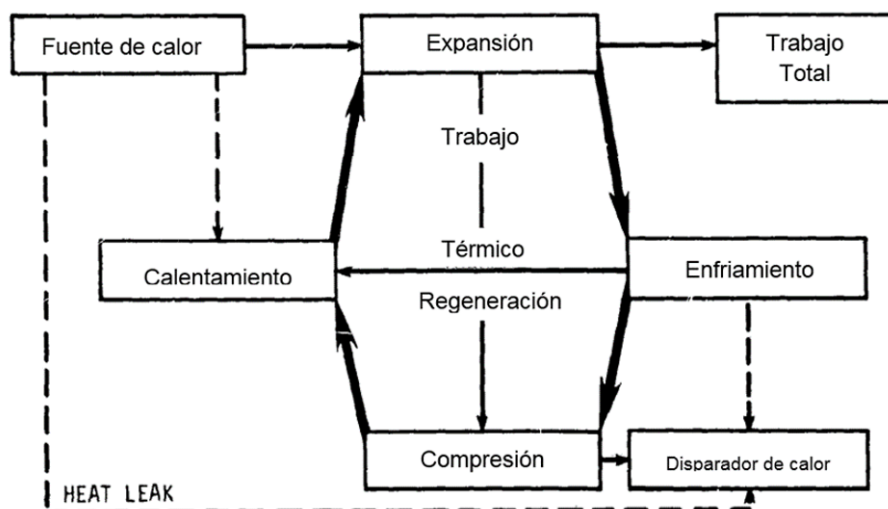


Figura 2.1: Proceso común para todos los motores térmicos [15].

Otro ejemplo del proceso general que se muestra en la Figura 2.3, es el ciclo cerrado del motor de turbina de gas. El gas de trabajo se comprime, entonces se pasa a través de un intercambiador de calor regenerativo de flujo estable. Para intercambiar el calor con los gases calientes expandidos. Más calor se añade en el calentador de gas. El gas comprimido caliente se expande, esto genera más energía de la que es requerida por el compresor y realiza un trabajo total.

Para completar el ciclo, el gas expandido se enfría primero por el intercambiador de calor regenerativo de flujo constante y luego, el enfriamiento adicional por el disipador de calor. En el primer ejemplo (Figura 2.2) los procesos ocurren secuencialmente en

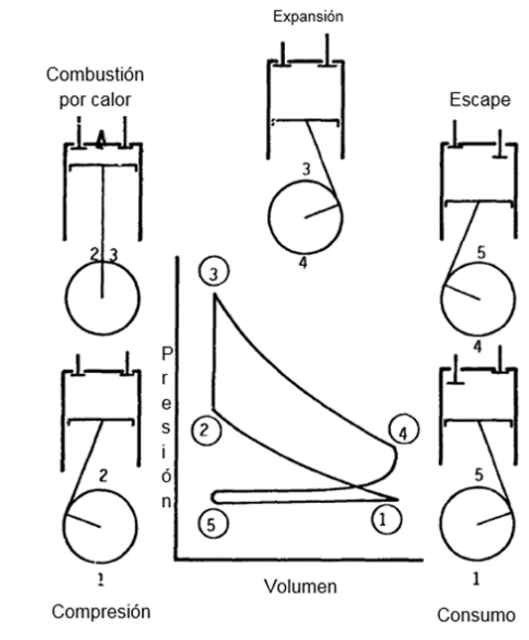


Figura 2.2: Diagrama esquemático del funcionamiento de motor de combustión interna [15].

un mismo lugar. En el segundo ejemplo (Figura 2.3) estos cuatro procesos ocurren simultáneamente en diferentes partes de la máquina. En la máquina de Stirling, los procesos ocurren secuencialmente, pero ocurren parcialmente en el tiempo [15].

También los procesos ocurren en diferentes partes de la máquina, pero los límites son confusos. Uno de los problemas que ha retrasado las aplicaciones de este tipo de máquina térmica es la dificultad en el cálculo con cualquier grado real de la confianza de los procesos complejos que van en el interior de un motor Stirling.

El proceso general que se muestra en la Figura 2.1 convierte el calor en trabajo mecánico, la inversa de este proceso puede tener lugar en que la energía mecánica se convierte en un bombeo de calor. El motor Stirling es potencialmente un mejor ciclo que otros ciclos, dado que tiene el potencial para una mayor eficiencia, bajo ruido y sin contaminación [15].

2.2. El principio termodinámico de un motor Stirling

Un motor de combustión interna proporciona un exceso de trabajo en virtud de la compresión a baja temperatura de una cierta cantidad de aire, a la que se añade combustible, ya sea antes o después de la compresión, el calentamiento es posterior de la mezcla de combustión rápida y su expansión a alta temperatura. El motor de gas caliente se

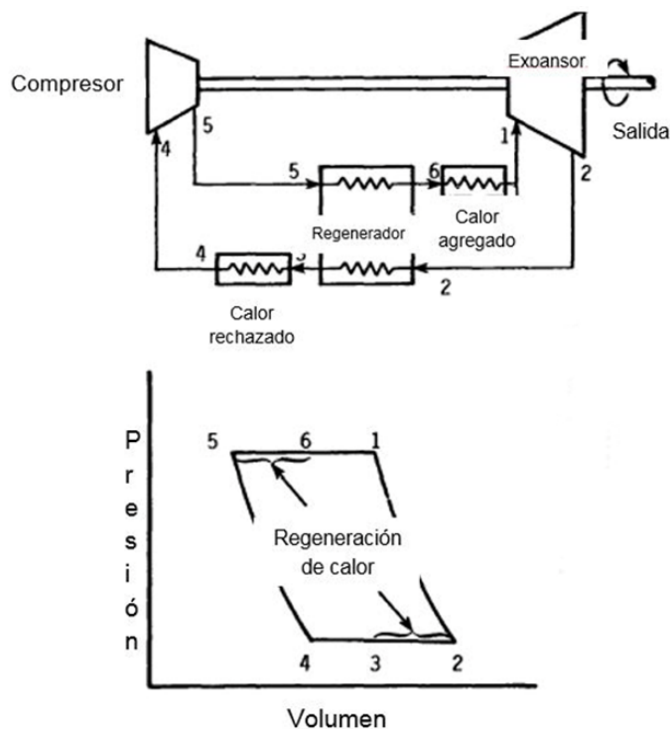


Figura 2.3: Ejemplo de Ciclo Cerrado de Turbinas de Gas [15].

basa en el mismo principio, es decir, la compresión a baja temperatura y la expansión a alta temperatura de una cantidad dada de gas. El calentamiento del motor tiene su lugar, sin embargo, de una manera completamente diferente, siendo el calor suministrado por el gas desde el exterior, a través de una pared. Por esta razón el motor de combustión externa es apropiada. Debido a la alta capacidad de calor de la pared, no es posible calentar y enfriar el gas simplemente por calentamiento rápido y enfriamiento de la pared. Ya hemos visto que Stirling hizo que la temperatura del gas cambiara periódicamente causando un "pistón desplazador" (en adelante llamado simplemente "desplazador") para transferir el gas de ida y de vuelta entre dos espacios, uno a la alta temperatura fija y el otro a una baja temperatura fija figura 6 [11].

2.3. Componentes de un motor Stirling

Un motor Stirling tiene 5 partes principales en las que son esenciales para su funcionamiento. En la Figura 2.4 a continuación se muestra uno de los primeros motores con el regenerador y el cambio de caliente a frío que están separadas del cuerpo del motor. Esto hace que sea fácil de ver y entender el papel de las 5 partes principales [16].

CAPÍTULO 2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING
2.3. COMPONENTES DE UN MOTOR STIRLING

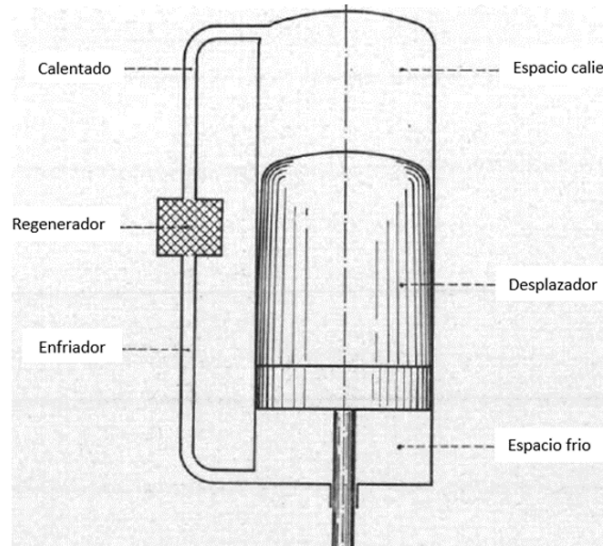


Figura 2.4: Principio del desplazador. A medida que el desplazador se mueve hacia arriba y hacia abajo, desde el espacio caliente al espacio frío a través del calentador [11].

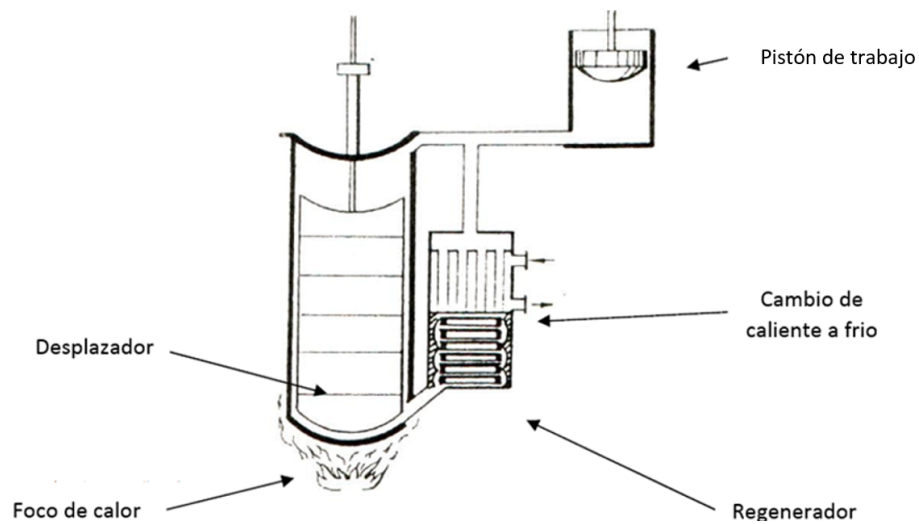


Figura 2.5: Motor Stirling 4th construido en 1840, partes principales etiquetados [16].

2.3.1. Foco de calor

Los focos de calor son responsables de la transferencia de todo el calor adentro y fuera del motor. Siempre hay dos intercambiadores de calor, uno para calentar el gas de trabajo y uno para enfriarlo. En la Figura 2.5 el foco de calor puede estar situado sobre un horno o un lugar que proporcione calor para su funcionamiento, el cambio de caliente a frío es un intercambiador de tipo tubular utilizando agua como fluido de regenerador el gas de trabajo en el motor fluye sobre y alrededor de los tubos que contienen agua fría, y posteriormente se enfría. Hay muchos tipos diferentes tipos de intercambiador de calor y un sin número de configuraciones posibles, pero el principio básico es tener dos fluidos, uno caliente y uno frío, interactuando por alguna configuración térmicamente conductor que hará que la temperatura de salida de ambos fluidos acercarse a algún punto entre ambas temperaturas de entrada. En lo general, no hay contacto directo entre los fluidos; que están separadas por algún medio, por lo general un metal de alta conductividad térmica [16].

2.3.2. Desplazador

En la Figura 2.4 el pistón tiene la función de mover el fluido de trabajo de un extremo de la cámara a otro y por lo tanto hace pasar alternativamente el fluido desde la fuente hasta el sumidero de calor. Esto se logra gracias precisamente a la ayuda del flujo de calor, puesto que hace que el fluido se expanda o se contraiga según sea la posición del desplazador. Este debe reunir las condiciones características de ligereza y baja transmisión de calor, ya que solo es necesario para desplazar el aire de un punto a otro del motor, pero sin anteponer demasiado esfuerzo al movimiento.

2.3.3. Pistón de trabajo

El pistón de trabajo es similar a la de un pistón que se encuentra en un motor de combustión interna. Su trabajo es para transmitir energía creada por la presión que actúa sobre la cara del pistón al cigüeñal del motor. El pistón se desliza dentro de un cilindro y está cerrado herméticamente contra el cilindro en las paredes de los anillos del pistón a fin de mantener la diferencia de presión necesaria a través del pistón para fuerza motriz ver Figura 2.6. Los criterios de diseño para el pistón es que debe ser ligero y perfectamente equilibrado (esto es realmente importante para contrarrestar el cigüeñal), así como estar hecho de un material adecuado para su uso en la temperatura de diseño. En algunos casos la expansión térmica debe ser considerado en los que puede significar que el pistón se expande hasta el punto de apoderarse en el cilindro [16].

Los anillos de los pistones pueden ser de metal, caucho u otros materiales adecuados. Tienen que ser capaz de sellar contra la diferencia de presión de diseño, que es típicamente bastante baja para un motor Stirling. En la mayoría de los casos algún tipo de lubricante se utiliza para prevenir la fricción excesiva entre la pared del cilindro y los anillos del pistón, aunque se debe tener cuidado para asegurar que el lubricante no se evapore

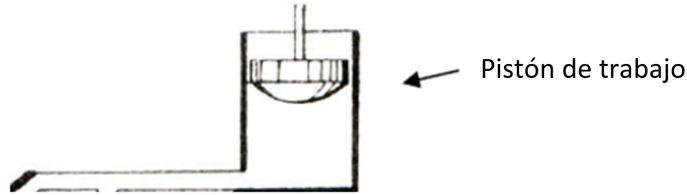


Figura 2.6: Pistón de trabajo.

y posteriormente se condense en el interior del regenerador, causando que se bloquee y pierdes eficacia [16].

2.3.4. Regenerador

El regenerador es probablemente el más estudiado y hablado de las características de un motor Stirling. Como se mencionó en el capítulo 1, el regenerador (entonces conocido como el 'economizador') fue el punto principal en 1816 sobre las patentes de Robert Stirling. El punto del regenerador es actuar como un elemento de almacenamiento de calor temporal que sea capaz de absorber rápidamente el calor del fluido de trabajo en caliente y la transfiere de nuevo en el fluido de trabajo en frío (ver Figura 2.7). Esto reduce enormemente la cantidad de trabajo termodinámico necesario a realizar por los intercambiadores de calor y a su vez en gran medida aumenta la eficiencia global del motor. John Ericsson destacó la importancia del regenerador cuando en 1855 él dijo la famosa frase "... vamos a demostrar prácticamente que los envoltorios (mallas) de alambre son capaces de ejercer más fuerza que cargamentos de carbón..." [17].

El regenerador es el elemento del Motor Stirling que permite alcanzar mayores rendimientos. Este es un intercambiador de calor interno que tiene la función de absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo. El regenerador consiste en un medio poroso con conductividad térmica despreciable que contiene un fluido. El regenerador es el que divide al motor en dos zonas: una zona caliente y otra zona fría [18].

El fluido se desplaza de la zona caliente a la fría durante los diversos ciclos de trabajo, reventando el regenerador. En el ciclo teórico hay un aspecto importante que es la existencia de un regenerador. Este tiene la propiedad de poder absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo [19].

Si no existe regenerador, el motor también funciona, pero su rendimiento es inferior. Hay algunos aspectos básicos a entender en la operación de un motor Stirling:

- El motor tiene dos pistones y el regenerador. El regenerador divide al motor en dos zonas, una zona caliente y una zona fría.
- El regenerador es un medio poroso, capaz de absorber o ceder calor y con conductividad térmica despreciable.

CAPÍTULO 2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING

2.3. COMPONENTES DE UN MOTOR STIRLING

- El fluido de trabajo está encerrado en el motor y los pistones lo desplazan de la zona caliente a la fría o vice versa en ciertas etapas del ciclo. Por lo tanto se trata de un ciclo cerrado.
- Cuando se desplaza el fluido desde la zona caliente a la fría (o al revés), este atraviesa el regenerador.
- El movimiento de los pistones es sincronizado para que se obtenga trabajo útil.
- Se supone que el volumen muerto es cero y el volumen de gas dentro del regenerador es despreciable en el caso del ciclo teórico. Como en el ciclo real esto no ocurre, el rendimiento es algo inferior.
- En el ciclo teórico se supone que la eficiencia del regenerador es de un 100 por ciento. Es decir devuelve todo el calor almacenado y además con recuperación total de temperaturas

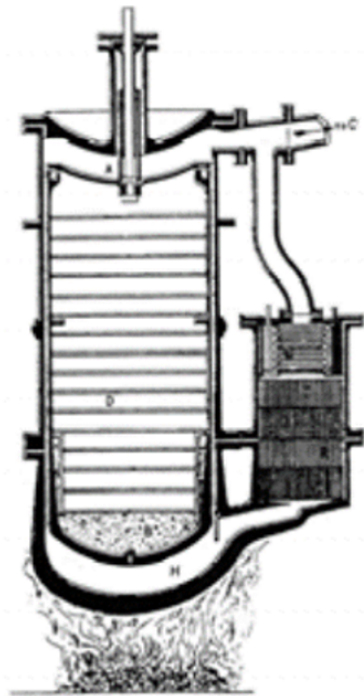


Figura 2.7: Regenerador externo [9].

Para intercambiadores de calor más comunes la dirección del flujo de calor es constante o unidireccional, es decir, los fluidos fríos y calientes siempre fluyen en una dirección fija y el flujo es continuo. Pero en el caso de un regenerador el flujo de calor es intermitente. Cuando el regenerador está frío, el fluido caliente se hace pasar sobre ella. Esto calienta el regenerador y enfría el fluido caliente. Posteriormente, el fluido frío se pasa sobre el regenerador que se encuentra ahora en una temperatura más elevada y el

calor se transfiera ahora desde el regenerador al fluido.

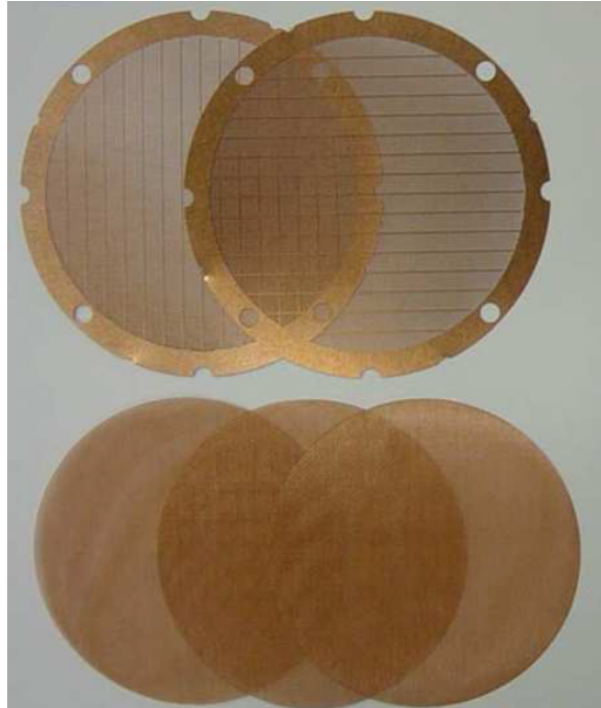


Figura 2.8: Regeneradores utilizados en el motor Stirling Multifase [4].

Los regeneradores son usualmente dispositivos como pantallas o mallas tejidas de cobre (ver Figura 2.8) que son apiladas en el interior del pasaje que conecta el cilindro caliente y frío. Incluso las paredes del paso pueden actuar como un regenerador en ausencia de estos, pero no será tan eficiente. Un muy buen regenerador no debería ofrecer demasiada resistencia al flujo de fluido de trabajo, más la eficiencia del motor caerá como un montón de trabajo se utilizará en mover el fluido de trabajo.

2.3.5. Volante

El volante es una masa inercial, a la que el pistón y el desplazador (si están presentes) están acoplados. Como sabemos que sólo hay una carrera de trabajo y durante esta carrera el volante de inercia almacena algo de energía en forma de energía cinética de rotación, en consecuencia, la velocidad del volante de inercia aumenta. Ahora, durante todo lo demás la energía del volante se utiliza y su velocidad se reduce. En la Figura 2.9, el volante de inercia reduce la fluctuación de la velocidad del motor y también proporciona la energía para los demás pistones. La potencia de salida del motor es llevada a cabo a través del volante de inercia, es decir, un mecanismo adecuado está acoplada al volante de utilizar la obra producida. Algunos tipos de motores Stirling no tienen ningún volante [4].

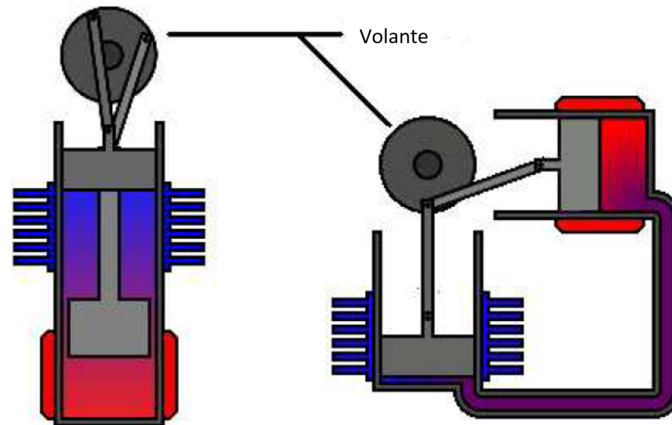


Figura 2.9: Volante [4].

2.3.6. Intercambio de calor

Un cilindro del motor Stirling tiene que ser mantenido a una temperatura alta, mientras que el otro extremo tiene que mantenerse a una temperatura baja. En Figura la 2.10 los intercambiadores de calor se utilizan para lograr este estado. Estos estados como su nombre lo indica son dispositivos que ayudan en el intercambio de calor de un medio a otro. En el extremo de una fuente de calor se transfiere al cilindro en estado frío, mientras que en el extremo frío el cilindro ha de transferirse a la atmósfera. Los motores Stirling que se calientan directamente no tienen intercambiadores de calor significativas. El aire enfriado de los motores Stirling generalmente tienen intercambiadores de calor simples mientras que hay algunos que tiene agua enfría que tienen los intercambiadores de calor más complejos [4].

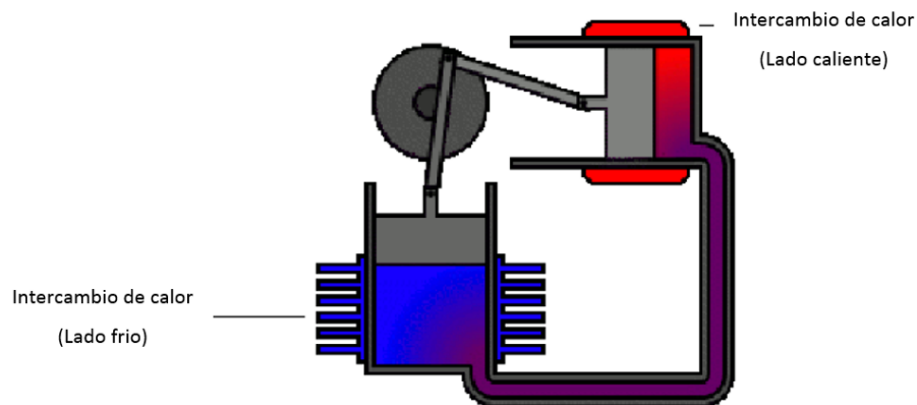


Figura 2.10: Motor Stirling intercambio de calor (frío y caliente) [4].

2.4. Tipos de motor Stirling

Con el primer motor Stirling creado se basaron diferentes tipos de motores con sus respectivas variantes por ejemplo: materiales, medidas, volantes, regeneradores o motores funcionales sin regeneradores, levas, eslabones y tipo de gases como fluido de trabajo (helio, nitrógeno, agua. . . etc) ya que inicialmente el primer fluido de trabajo que se usó fue aire. Con el paso del tiempo se tomaron principalmente 3 configuraciones alfa, beta y gama de los cuales tiene sus ventajas y desventajas conforme a su diseño.

2.4.1. Motor Stirling tipo alfa

El motor Stirling Alfa (ver Figura 2.11) es el más simple y consta de dos pistones de trabajo y dos cilindros conectados a través de un regenerador. Tanto los cilindros están conectados a un único volante de inercia y por lo general están alineados a 90 grados entre sí. El pistón caliente está situado cerca del intercambiador de calor de alta temperatura mientras que el pistón frío está en contacto con el depósito de baja temperatura, que en muchos casos prácticos es la atmósfera. Los dos pistones están conectados al volante de tal manera que el movimiento de traslación lineal se puede convertir en movimiento giratorio y la diferencia de fase se puede mantener. En la mayoría de los casos que se unen en un punto común en el volante para lograrlo [4].

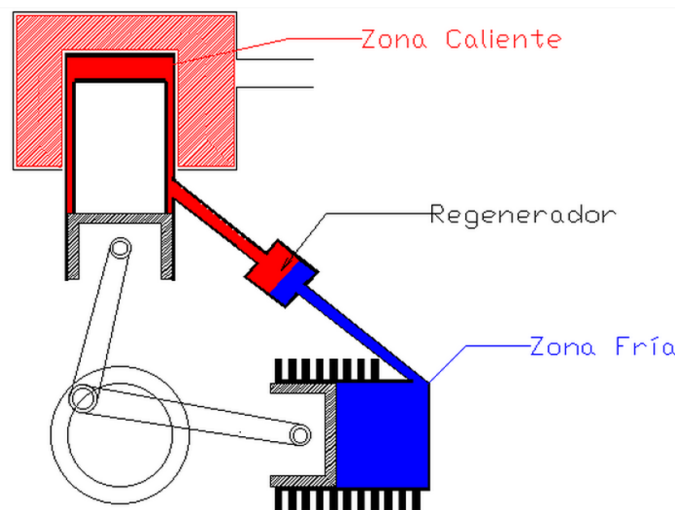


Figura 2.11: Motor tipo alfa [20].

Comparado con los otros tipos básicos de motores Stirling la potencia desarrollada para un volumen dado es más alta en el caso de los motores tipo alfa. Esto es debido a relaciones de compresión más altas que se pueden obtener en un motor Stirling tipo Alfa en comparación con otros tipos de motores Stirling [4].

2.4.2. Motor Stirling tipo beta

Un motor Stirling tipo Beta (ver Figura 2.12) consta de un solo desplazador y el pistón dentro del mismo cilindro. Por lo general, tanto el pistón y el desplazador están conectados al mismo volante en diferentes puntos con una diferencia de fase de 90° , a diferencia del motor de Alfa Stirling, donde tanto los pistones están conectados en el mismo punto en el volante. Es interesante observar que la primera patente por Robert Stirling era de hecho un motor Stirling Beta. La patente original se refiere a veces como un motor invertido, debido a su similitud en apariencia con los motores de vapor que utiliza una vinculación entre el pistón y el volante de inercia.

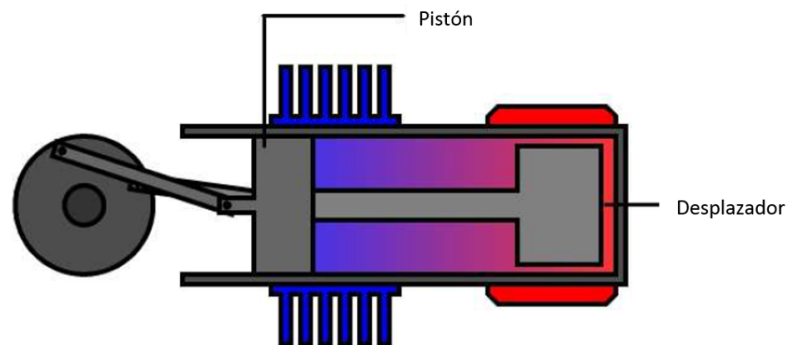


Figura 2.12: Motor Stirling tipo beta [4].

Este tipo de motor es comparativamente compacto en comparación con otros tipos de motores Stirling y por lo tanto se utilizan para aplicaciones en las que hay limitaciones de espacio. La potencia de salida para un volumen dado es menor en comparación con otros motores. La incorporación de un regenerador es un poco difícil y ya que no hay un aislamiento apropiado entre el extremo caliente y el frío, la eficiencia del motor disminuye a medida que el motor se calienta. Esto es debido a la conducción de calor desde el extremo caliente al extremo frío [4].

2.4.3. Motor Stirling tipo gamma

Un motor Stirling tipo gamma (ver Figura 2.13) es un tipo desplazador, con el pistón de trabajo situado en un cilindro separado. Esto permite una separación completa entre los intercambiadores de calor asociados con el cilindro desplazador y el espacio de compresión y expansión de trabajo asociado con el pistón. Por lo general, el cilindro del desplazador es muchas veces más grande que el cilindro de pistón de trabajo y por lo tanto tienden a tener grandes volúmenes sin barrer (muertos) en comparación con los motores tipo Alpha o Beta. A pesar de que hay dos cilindros separados sólo uno de ellos (el que contiene el pistón de trabajo) tiene que ser sellado a diferencia del motor de Alfa [4].

Además, el pistón de trabajo está aislada de los depósitos térmicos y esto reduce cualquier variación en las dimensiones del cilindro debido a la contracción o expansión. Esto hace más fácil el sellado a diferencia de otros motores, especialmente el motor Alfa donde el sellado del pistón caliente es un verdadero desafío. Este sellado que presenta es el mayor desafío en la mayoría de diseños de motores Stirling tan cerca de pequeñas tolerancias que se ejecutan, tienen que ser mantenidos para el funcionamiento eficaz del motor. Desde el sellado del motor Gamma es comparativamente más fácil es un favorito entre los modelistas y aficionados, ya que se pueden fabricar fácilmente en los talleres.

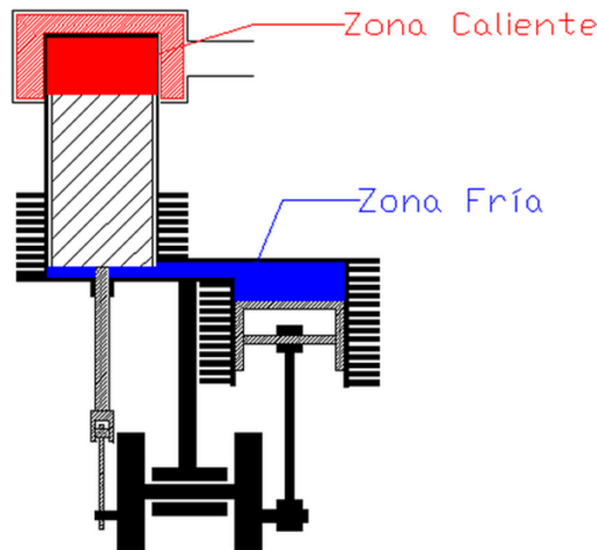


Figura 2.13: . Motor Stirling tipo gamma [20].

Puesto que los intercambiadores de calor se separan del cilindro de trabajo y se integra en el cilindro desplazador que es el más grande, el diseño y colocación de los intercambiadores de calor también se hace más fácil. Intercambiadores de calor más grande y mejores pueden ser integrados como el área disponible para el propósito es mucho más grande en comparación con el motor Stirling Beta. Como existe una considerable flexibilidad en el diseño de los intercambiadores de calor, incluso el agua enfría de los motores Gamma Stirling, que tiene camisas de refrigeración [4].

Nos interesa poner a trabajar un motor Stirling tipo beta el cual fue adquirido con problemas de funcionalidad, en este capítulo se mostraron las partes de un motor Stirling de tal que esta información nos permite identificar el problema del funcionamiento de nuestro Motor a continuación se realiza una revisión del ciclo termodinámico Stirling.

Capítulo 3

Ciclo termodinámico del motor Stirling

El motor Stirling trabaja idealmente su propio ciclo, o alguna de sus variantes, donde fluidos comprensibles, como aire, hidrógeno, helio, nitrógeno o incluso vapores son usados como fluidos de trabajo. El motor Stirling ofrece la posibilidad de generar trabajo con un alto rendimiento, con bajas o nulas emisiones, lo cual representa una ventaja con respecto a los motores de combustión interna. Los primeros motores Stirling eran grandes y de bajo rendimiento. Sin embargo, a través del tiempo, se han desarrollado avances en los modelos de motores Stirling que han permitido mitigar dichas deficiencias. Los motores Stirling modernos además de tener una mejor rendimiento pueden trabajar con fuentes de calor a mayor temperatura. Al ser motores de combustión externa, pueden funcionar con la mayoría de las fuentes de calor existentes: geotérmica, gases de escape industriales, solar térmica, biomasa o cualquier combustible puesto se abordarán las esenciales características, estados y ecuaciones que conllevan un entendimiento mejor de su funcionamiento en la parte termodinámica.

3.1. Gas ideal

La ley del gas ideal está enfocada a un sistema ideal termodinámico a las mediciones que entran al sistema más la consideración del sistema. La ecuación de estado se expresa como

$$PV = nRT \quad (3.1)$$

donde

- P es la presión.
- V es el volumen.
- n es la cantidad de sustancia de un gas o número de moles.
- R es la constante universal de los gases ($R = 8.314472 \text{ J/K mol}$).
- T es la temperatura.

La ley del gas ideal es usado es su mayor parte en las condiciones iniciales:

- Temperatura.
- Presiones.
- Características del fluido del trabajo.

3.1.1. Características del gas ideal

- El gas ideal esta formado por partículas con masa muy pequeña que se encuentran en constante movimiento, lo que implica que dependiendo del fluido de trabajo (gas) se considera que todas sus moléculas son idénticas.
- El gas al estar en constante movimiento se considera que sus interacciones siempre se encuentran en estado de colisión dependiendo del ambiente en el que se encuentre.
- Si el gas se encuentra en un estado de constante calor las interacciones es mayor implicando que las colisiones generen mayor movimiento y aumento de presión. Cuando el gas esta en un estado muy frío sus moléculas están en un estado de reposo minimizando sus colisiones entre ellos.

Esta suma de características menciona que es posible comprimir indefinidamente una muestra de gas cuantas veces sea. Como las moléculas de gas no ocupan un volumen físico, es posible comprimirlas infinitamente cercanas entre sí. Las moléculas como se explica no se repelen puesto que las interacciones entre moléculas no existen. El inconveniente en un estado real ocupan un espacio físico. Lo que implica que la ley del gas ideal no es tan certera.

3.2. Gas real ecuación de Van der Waals

Una mejora de la ecuación de estado del gas ideal fue sugerida en 1873 por Van der Waals, quien se basó en argumentos elementales de tipo molecular. Van der Waals señaló que el volumen que ocupan las moléculas de un gas es en realidad mayor que el volumen pequeño, despreciable, que supone el modelo de gas ideal, y además que las moléculas de gas ejercen fuerzas de atracción de largo alcance entre sí [21].

Así, no todo el volumen de un recipiente resulta utilizable por las moléculas del gas, y las fuerzas que ejercen sobre sus paredes quedan reducidas como consecuencia de las fuerzas atractivas que existen entre las moléculas. Empleando estos argumentos moleculares elementales, la ecuación de estado de Van der Waals es:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(v - b) = RT \quad (3.2)$$

- P es la presión del fluido.

- V es el volumen total del recipiente en que se encuentra el fluido.
- a mide la atracción entre las partículas.
- b es el volumen disponible de un mol de partículas.
- ($R = 8.31 \text{ J/K mol}$) constante de los gases ideales.
- T es la temperatura.

La ecuación de Van der Waals 3.2 cuenta con dos constantes dependiendo de la sustancia en la Tabla 3.1. Para una sustancia específica, los valores de las constantes a y b pueden hallarse ajustando la ecuación a los datos P - V - T . Con este método pueden ser necesarios varios conjuntos de constantes si se quiere cubrir todos los estados de interés.

Sustancia	$a \left(\frac{\text{m}^3}{\text{Kmol}} \right)^2$	$b \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
Agua	5,531	0,0305
Aire	1,368	0,0367
Helio	0,034	0,0237
Butano	13,86	0,1162
Dióxido de azufre	6,883	0,0569
Dióxido de carbono	3,647	0,0428
Metano	2,293	0,0428
Monóxido de carbono	1,474	0,0395
Nitrógeno	1,366	0,0386
Oxígeno	1,369	0,0317
Propano	9,349	0,0901
Refrigerante	10,49	0,0971

Tabla 3.1: Tabla de Van Der Waals

3.3. Ciclo ideal del motor Stirling

El motor Stirling funciona comúnmente con algunos tipos de fluido de trabajo en específico, que podría derivar del aire, helio, hidrógeno y otros fluidos mecánicos que se adecuen al sistema tratando de mejorar su funcionamiento específicamente su rendimiento.

El ciclo general del motor Stirling que se muestra en la Figura 3.1, esta compuesto por dos procesos isotermicos y dos isocóricos. Por el calentamiento y enfriamiento a volumen constante (isocoros) y compresión y expansión a temperatura constante (isotermicos). Considerando la ecuación de estado para gases ideales.

Proceso 1 \rightarrow 2 (Compresión isotérmico): El gas en su estado inicial comienza absorber el calor del foco caliente manteniendo una temperatura constante en la parte del cilindro

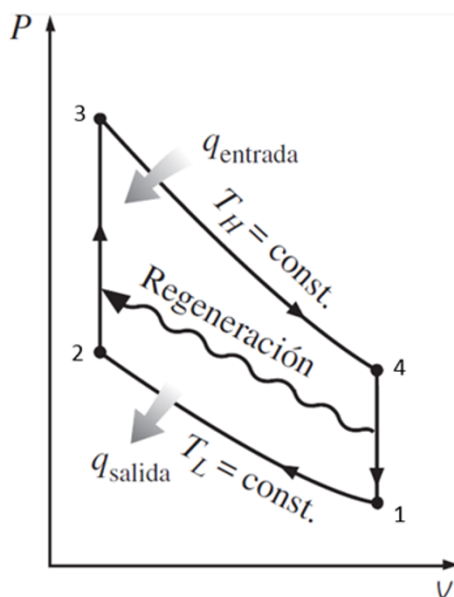


Figura 3.1: Ciclo ideal del motor Stirling P-v [14].

(Figura 3.2), donde la energía interna ΔU depende de la temperatura, debido a que la temperatura es constante en su estado inicial y final demostrando que es igual a 0 puesto que la energía interna no cambia tenemos que:

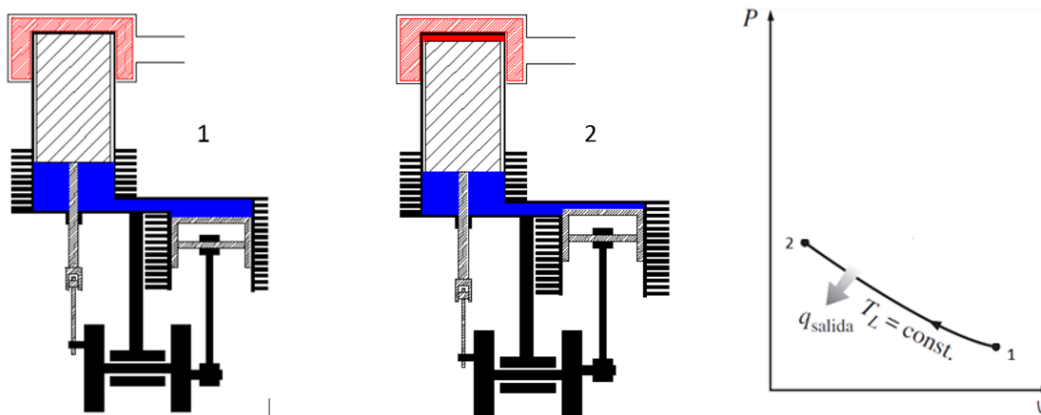


Figura 3.2: Compresión isotérmico [18], [14].

$$\Delta U^{1 \rightarrow 2} = 0 \quad (3.3)$$

donde el calor Q en este proceso lo obtenemos a partir del primer principio de la termodinámica:

$$Q^{1 \rightarrow 2} = \Delta U^{1 \rightarrow 2} - W^{1 \rightarrow 2} \quad (3.4)$$

Puesto que la energía interna es igual a cero la siguiente ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q^{1 \rightarrow 2} = -W^{1 \rightarrow 2} \quad (3.5)$$

El trabajo se calcula a partir de su expresión para un proceso isotérmico reversible a temperatura constante, este proceso se realiza mediante las acciones de expansión-compresión. El trabajo realizado en la expansión de uno a dos $1 \rightarrow 2$ es dado como

$$W^{1 \rightarrow 2} = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT_f}{V} dV = nRT_f \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \quad (3.6)$$

Como el proceso es sobre compresión, el volumen disminuye a un punto estable lo que implica que el trabajo en este proceso $1 \rightarrow 2$ siempre sea negativo.

$$W^{1 \rightarrow 2} = -nRT_f \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (3.7)$$

Proceso $2 \rightarrow 3$ (Absorción de calor): El foco de calor provoca que el gas se caliente haciendo que se mueva el desplazador, provocando que se transfiera el movimiento al foco frío del motor. El gas absorbe el calor a medida que pasa por el regenerador bajando así su temperatura (Figura 3.3).

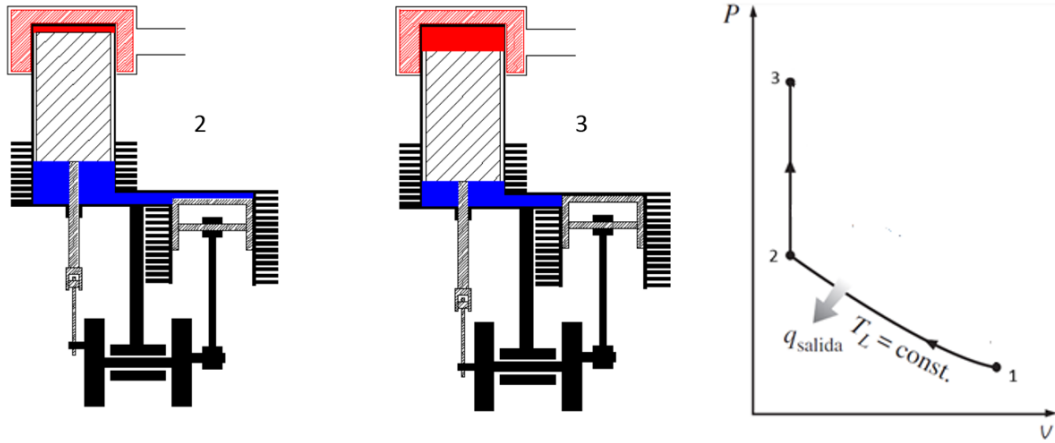


Figura 3.3: Suministro de calor a volumen constante [18], [14].

En el segundo proceso, por ser a volumen constante, el trabajo realizado sobre el gas es nulo esto implica que:

$$W^{2 \rightarrow 3} = \int_{V_2}^{V_3} PdV = 0 \quad (3.8)$$

la variación de energía es:

$$\Delta U^{2 \rightarrow 3} = Q^{2 \rightarrow 3} + W^{2 \rightarrow 3} \quad (3.9)$$

donde el calor Q es la energía transferida de un sistema a otro y c_V es el calor específico a volumen constante, esto es:

$$Q^{2 \rightarrow 3} = nc_V(T_3 - T_2) \quad (3.10)$$

Proceso $3 \rightarrow 4$ (Expansión isotérmico): Se le suministra calor a temperatura constante provocando que el gas se expanda, llegando a un punto de máxima. Este proceso es llamado expansión isotérmico (Figura 3.4).

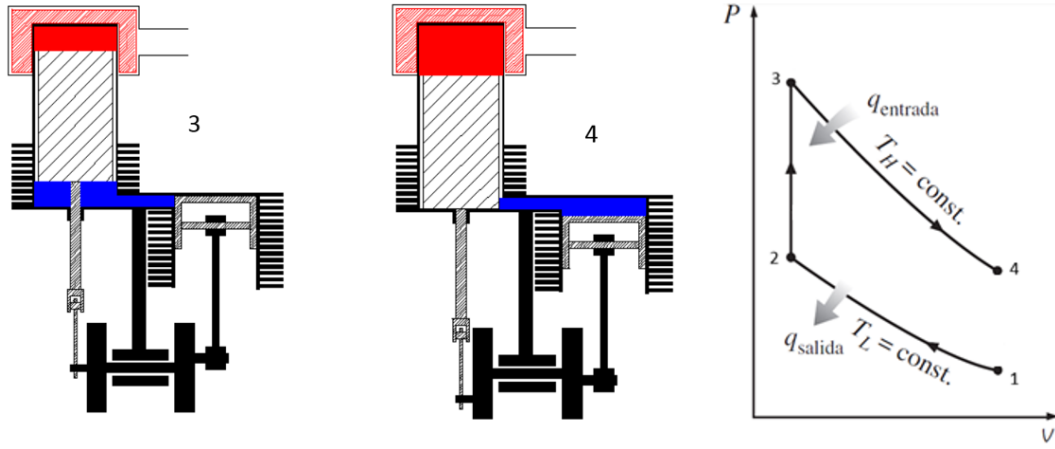


Figura 3.4: Expansión isotérmico [18], [14].

Aquí, el cambio de la energía interna es nulo, debido a que este proceso actúa de forma paralela al estado $1 \rightarrow 2$ sabiendo que este proceso depende de la misma manera ante una constante de temperatura en un estado inicial y final, tenemos que:

$$\Delta U^{3 \rightarrow 4} = 0 \quad (3.11)$$

Por otro lado, el trabajo se calcula con los mismos procesos de la ecuación 3.6 pero esta vez enfocado a los procesos $3 \rightarrow 4$ de la Figura 3.4 con sus respectivos volúmenes, debido a que es un proceso de expansión, el trabajo será positivo cuando el gas se expanda.

$$W^{3 \rightarrow 4} = nRT_c \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right) \quad (3.12)$$

y el calor es:

$$Q^{3 \rightarrow 4} = \Delta U^{3 \rightarrow 4} - W^{3 \rightarrow 4} \quad (3.13)$$

Proceso $4 \rightarrow 1$ (Extracción de calor): Se reduce la temperatura a su estado inicial provocado por el espacio que hay entre el desplazador y el pistón, puesto que este se

encuentra en temperatura ambiente provocando que el deslizador regrese a su estado inicial (Figura 3.5).

En este proceso el gas se enfría manteniendo su volumen constante lo que impli-

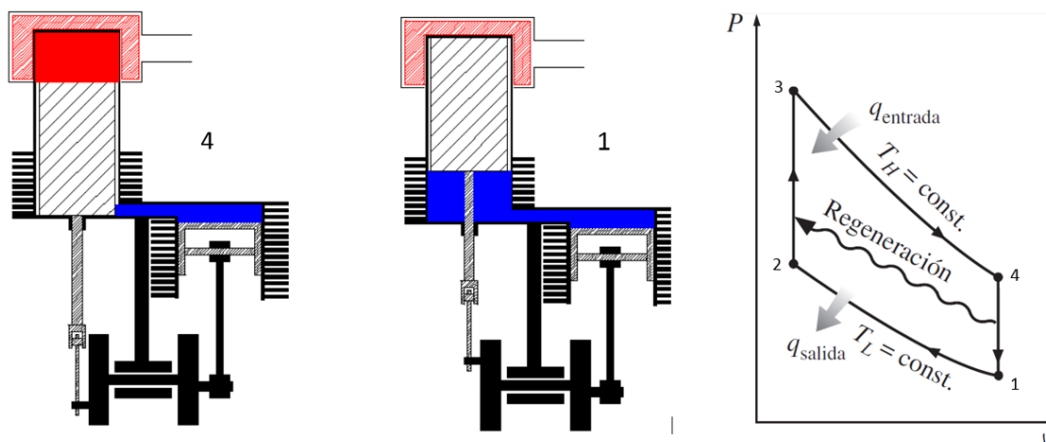


Figura 3.5: Extracción de calor a volumen constante [18], [14].

ca que el trabajo de este proceso sea nulo.

$$W^{4 \rightarrow 1} = \int_{V_3}^{V_4} p dV = 0 \quad (3.14)$$

El calor en este proceso es el correspondiente a un proceso a volumen constante

$$Q^{4 \rightarrow 1} = n c_v (T_1 - T_4) \quad (3.15)$$

mientras que la variación de energía es:

$$\Delta U^{4 \rightarrow 1} = Q^{4 \rightarrow 1} + W^{4 \rightarrow 1}$$

3.4. Rendimiento del motor Stirling

Se mencionó anteriormente que las máquinas térmicas son dispositivos cíclicos y que el fluido de trabajo de una de estas máquinas vuelve a su estado inicial al final de cada ciclo. Durante una parte del ciclo el fluido realiza trabajo y durante otra se hace trabajo sobre el fluido. La diferencia entre estos dos trabajos es el trabajo neto que entrega la máquina térmica. El rendimiento del ciclo de una máquina térmica depende en gran medida de cómo se ejecute cada uno de los procesos que constituyen el ciclo. El trabajo neto y, por lo tanto, el rendimiento del ciclo, se pueden maximizar mediante procesos que requieren la mínima cantidad de trabajo y entregan lo más posible, es decir, mediante procesos reversibles [14].

El rendimiento de una máquina térmica es la relación existente entre el trabajo producido y el calor absorbido, en general tenemos que:

$$\eta = \frac{W_{Total}}{Q_{Entra}} \quad (3.16)$$

donde

- η es el rendimiento.
- W_{Total} es el trabajo total.
- Q_{Entra} es el calor entrante.

Sustituimos los términos obtenidos por cada uno de los procesos que se explicaron anteriormente, la ecuación 3.17 queda expresada de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{W^{3 \rightarrow 4} - W^{1 \rightarrow 2}}{Q^{3 \rightarrow 4}} \quad (3.17)$$

A continuación se sustituyen los procesos del trabajo y el calor entrante:

$$\eta = \frac{RnT_{m\acute{a}x} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - RnT_{m\acute{i}n} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{RnT_{m\acute{a}x} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad (3.18)$$

Se aplica racionalización para poder simplificar el rendimiento:

$$\eta = \frac{RnT \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{RnT \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} - \frac{RnT_{m\acute{i}n} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{RnT_{m\acute{a}x} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad (3.19)$$

Se obtiene el rendimiento del ciclo de Stirling.

$$\eta = 1 - \frac{T_{m\acute{i}n}}{T_{m\acute{a}x}} \quad (3.20)$$

El rendimiento del motor Stirling dependerá de los estados iniciales que se expongan, puesto que este afectará su rendimiento con respecto a la intensidad de calor expuesta, cabe mencionar que el rendimiento es la misma que la del ciclo de Carnot debido a que este trabaja con las mismas leyes en base a la temperatura, fuentes de calor, fluido de trabajo y trabajo mecánico [22].

Puesto que se a investigado que los rendimientos son idénticos en todas las máquinas que operen con el ciclo de Carnot, podemos utilizar los procesos isotérmicos e isocóricos para demostrar el rendimiento. Tenemos que el rendimiento es igual al trabajo total realizado por la máquina, entre el calor absorbido entrante.

Los motores Stirling son usados ampliamente en la actualidad, ya que como vimos, poseen el máximo rendimiento posible para una máquina térmica al igual que la de

CAPÍTULO 3. CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING

3.4. RENDIMIENTO DEL MOTOR STIRLING

Carnot. para mejorar el rendimiento de esta máquina se busca la máxima temperatura posible en el foco caliente. Así, a continuación se analizan los parámetros involucrados en el ciclo térmico Stirling considerando el ciclo ideal (basado en la ley de los gases ideales) y una aproximación al ciclo real usando el modelo de Van der Waals para los gases; además, se presentan los diferentes rendimientos obtenidos considerando al aire y el gas Helio como fluidos de trabajo.

Capítulo 4

Obtención de los parámetros del motor Stirling

En este capítulo se realiza el análisis general del motor Stirling, en este mecanismo se plantean los procesos termodinámicos del ciclo Stirling como se explica en el capítulo 3. Se pretende inicialmente analizar el estado del gas ideal teniendo en cuenta el estado del gas real para poder comparar las ventajas y desventajas del sistema, también saber qué fluidos de trabajo son óptimos y necesarios. Se usa aire como fluido de trabajo y se compara con otro fluido para tener una referencia del gas propuesto que en este caso es el Helio; cabe mencionar que este fluido de trabajo está representado teóricamente con los datos obtenidos del motor Stirling.

4.1. Análisis sobre el ciclo termodinámico del motor Stirling

Para el análisis sobre el ciclo termodinámico se consideran:

- 1 → 2: Expansión isotérmico con absorción de calor (Isotermo)
- 2 → 3: Extracción de calor de regeneración a volumen constante(Isocoro)
- 3 → 4: Compresión isotérmico con extracción de calor (Isotermo)
- 4 → 1: Aportación de calor de regeneración a volumen constante (Isocoro)

El tipo de procedimiento matemático que se ha desarrollado se basa en el conjunto de ecuaciones que se describe en el Capítulo 3 para cada proceso isotérmico e Isocórico.

4.1.1. Análisis termodinámico ideal del motor Stirling

A partir de la información recabada y las mediciones obtenidas en el proceso de experimentación, se ha realizado una tabla con los estados individuales de cada proceso y aproximaciones matemáticas del comportamiento inicial del motor Stirling del tipo

CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR STIRLING
4.1. ANÁLISIS SOBRE EL CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING

gamma mostradas en la Tabla 4.1 usando la ecuación del gas ideal 4.1:

$$PV = nRT \quad (4.1)$$

En la Tabla 4.1 se muestra las mediciones del gas ideal con los datos obtenidos sobre la experimentación el sistema.

$T_c = 417.05\text{K}$
$T_f = 297.45\text{K}$
$P_a = 1\text{bar}$
$P_b = 3\text{bar}$
$R = 8.31 \text{ J/mol.K}$

Tabla 4.1: Datos iniciales sobre el gas ideal.

En la ecuación 4.1 los parámetros son:

- T_c es la temperatura caliente.
- T_f temperatura en frío (en estado inicial).
- P_a presión mínima inicial.
- P_b presión máxima final.
- R constante de los gases ideales ($R = 8.31 \text{ J/K mol}$).

En la ecuación 4.1 con los datos de la Tabla 4.1 se pueden obtener los volúmenes restantes por medio del despeje y poder obtener los datos faltantes.

$$V = \frac{nRT}{p} \quad (4.2)$$

Para hallar las presiones de los estados restantes se emplea la ecuación 4.1, pero esta vez despejando la presión y así poder tener todos los datos de la Tabla 4.2 para poder proseguir con los cálculos de cada proceso del ciclo completo P-v.

$$p = \frac{nRT}{V} \quad (4.3)$$

En la Tabla 4.1 se comenzó escribiendo los datos de algunos estados iniciales como las temperaturas de los estados 1, 2, 3, 4 y las presiones iniciales de los estados 1, 3, con las ecuaciones 4.2, 4.3 se fueron completando cada uno de los estados.

En el caso para la obtención de los datos de la Tabla 4.3 se retoman los datos obtenidos de la Tabla 4.2 usando las ecuaciones 3.9, 3.11, 3.15 y 3.16 para cada proceso que se muestran en el Capítulo 3 y así obtener los valores numéricos para los procesos restantes.

CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR STIRLING
4.1. ANÁLISIS SOBRE EL CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING

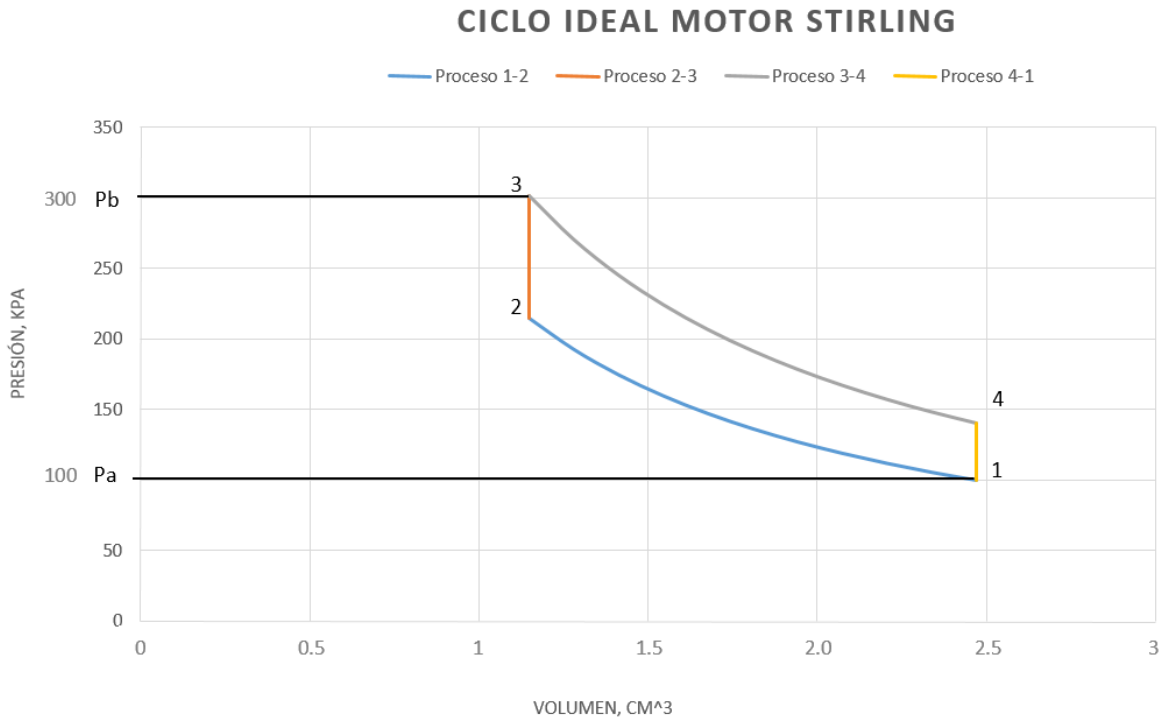


Figura 4.1: Gráfica sobre el gas ideal P-V.

Estado	P(Bar)	V(M ³)	T(K)
1	1	2.471	297.450
2	2.14	1.155	297.450
3	3	1.155	417.050
4	1.40	2.471	417.050

Tabla 4.2: Datos de los estados P-V.

Proceso	W(J)	Q(J)	Δ U(J)
1 → 2	187.986	-187.986	0
2 → 3	0	248.469	248.469
3 → 4	-263.573	263.573	0
4 → 1	0	-248.469	-248.469
Total	-75.587	75.587	0

Tabla 4.3: Datos totales del ciclo completo P-V.

El rendimiento de la ecuación 4.4 se obtiene por medio del *Capítulo 3* (ver ecuación 3.20).

$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 28.669\% \quad (4.4)$$

CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR STIRLING
4.1. ANÁLISIS SOBRE EL CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING

4.1.2. Análisis termodinámico real por Van der Waals

La ecuación de Van der Waals comparada con la ecuación del gas ideal demuestra ser mas precisa y completa puesto que la ecuación toma los parámetros a y b que estos son obtenidos por los puntos críticos de un compuesto en específico es decir cuando la parte de la densidad (aire, helio , hidrógeno dependiendo con que elemento se este trabajando) sea igual al vapor en función de la temperatura.

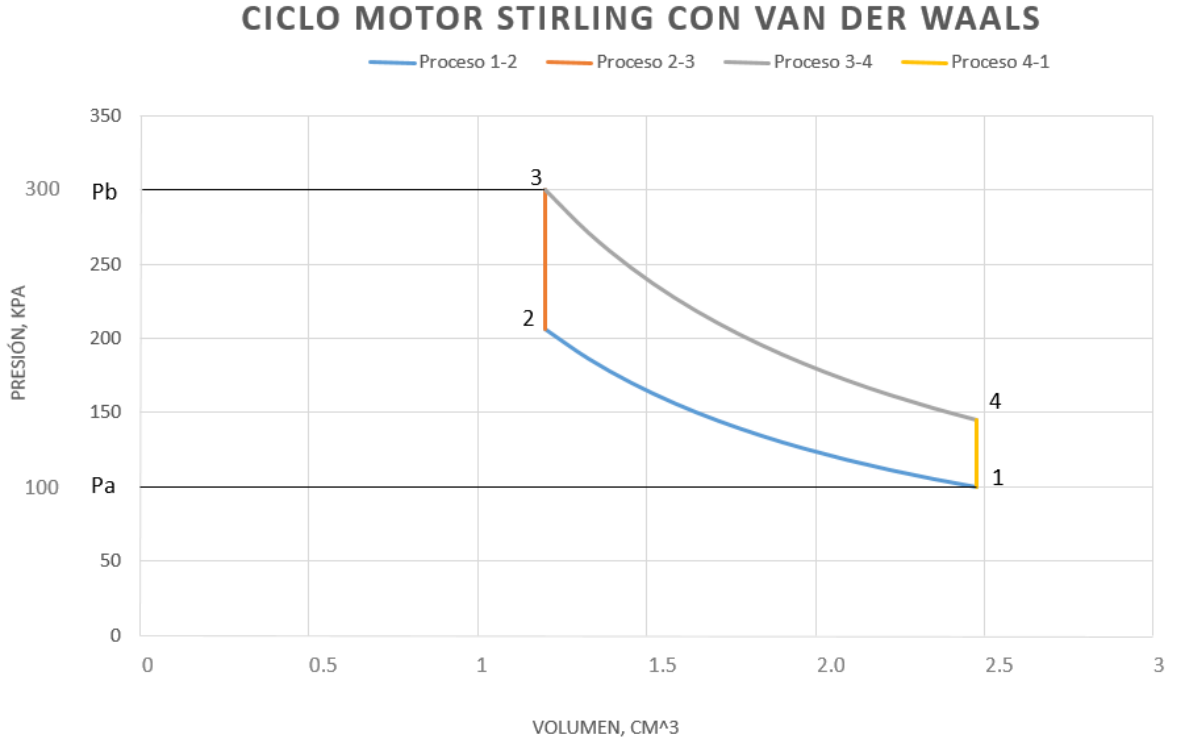


Figura 4.2: Gráfica sobre el gas helio con Van der Waals P-V.

Estado	P(Bar)	V(M³)	T(K)
1	1	2.475	297.450K
2	2.06	1.199	297.450K
3	3	1.199	432.050K
4	1.45	2.475	432.050K

Tabla 4.4: Datos de los estados P-V con Van der Waals.

El rendimiento de la ecuación 4.5 se obtiene por medio del *Capítulo 3* (ver ecuación 3.20).

$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 31.153\% \quad (4.5)$$

CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR STIRLING
4.1. ANÁLISIS SOBRE EL CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING

Proceso	W(J)	Q(J)	$\Delta U(J)$
1 \rightarrow 2	179.376	-179.376	0
2 \rightarrow 3	0	169,692	169.692
3 \rightarrow 4	-260.546	260.546	0
4 \rightarrow 1	0	-169.692	-169.692
Total	-81.170	81.170	0

Tabla 4.5: Datos totales del ciclo completo P-V Van der Waals.

4.1.3. Análisis termodinámico por manivela

En los análisis anteriores se desprecia el movimiento continuo de la manivela, puesto que en los sistemas ideales se enfoca solo en presiones y temperaturas. Muchos mecanismos de manivela generan movimientos armónicos semi-continuos por la oposición del pistón de expansión que conduce al pistón de compresión que es conocido como *angulo de fase termodinámico* (Figura 4.3).

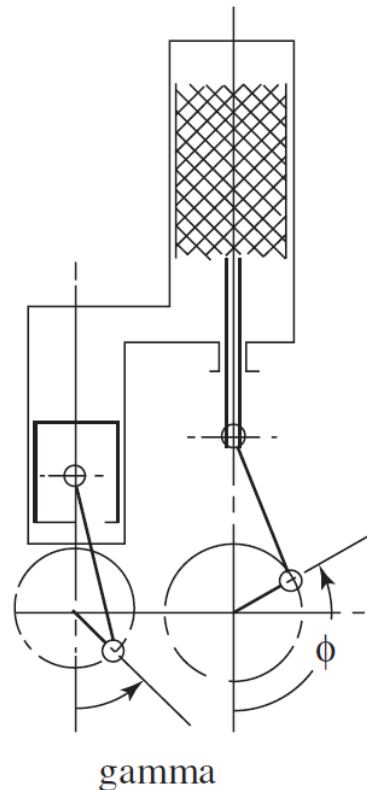


Figura 4.3: Giro de la manivela del motor Stirling tipo gamma.

Esto con lleva a un análisis termodinámico nuevo retomando nuevas variables sobre la suma total de los estados, a causa de que solo el pistón llega a una temperatura constante referente al foco de calor provocando que el desplazador gire proporcionalmente con su

CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR STIRLING

4.1. ANÁLISIS SOBRE EL CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING

giro.

A continuación en la Figura 4.4 se muestra una gráfica aproximada al estado real, tomando en cuenta el giro de la manivela mas la suma de los datos recabados, debido a que este provoca un proceso cada vez mas cercano al real, creando los procesos de expansión y compresión sean diferentes, modificando cada estado que se muestra en el *Capítulo 3*.

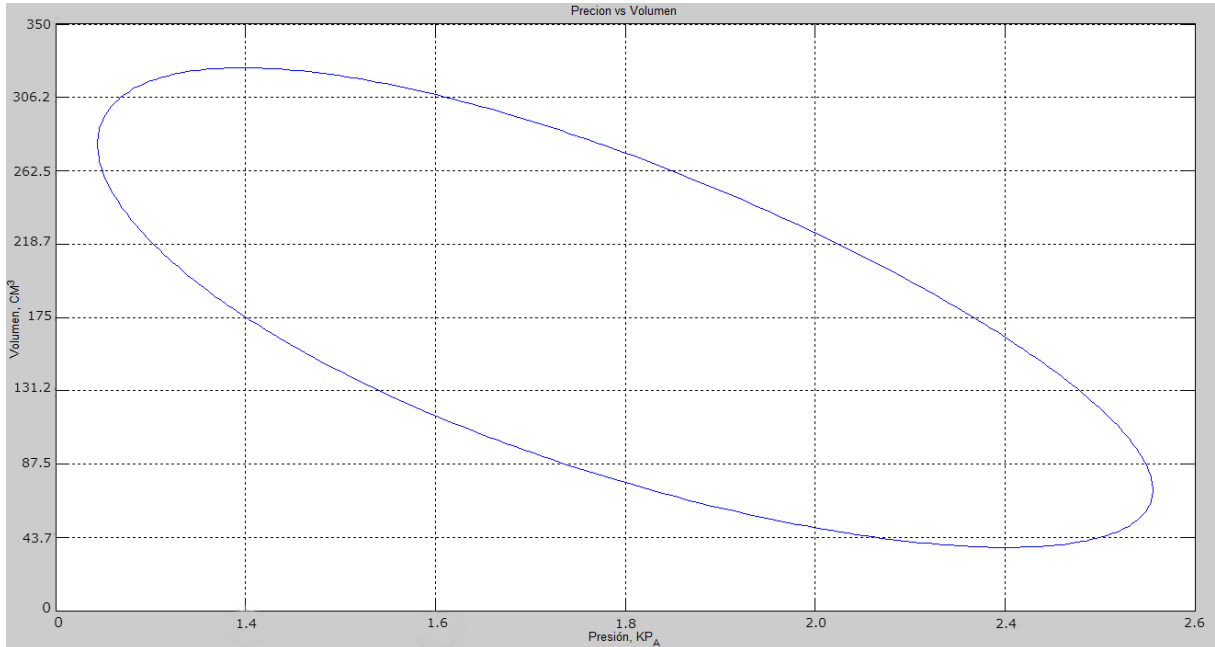


Figura 4.4: Gráfica sobre el gas real.

Se analizaron los parámetros involucrados en el ciclo térmico Stirling considerando el ciclo ideal (basado en la ley de los gases ideales) y una aproximación al ciclo real usando el modelo de Van der Waals para los gases aire y Helio. Como se vio anteriormente, los motores Stirling son usados ampliamente, a continuación se presentan dos aplicaciones de este motor.

Capítulo 5

Desarrollo mecánico del motor Stirling y aplicaciones

En este capítulo se muestran algunas aplicaciones actuales del motor Stirling y cómo este influye para minimizar la emisión de gases invernadero. En este trabajo el motor Stirling Grizzly H8103 se revisa para hacerlo funcional, dado que en este capítulo se muestra la secuencia y el proceso de cómo el motor ya antes mencionado puede ser funcional manufacturando las piezas defectuosas por medio del torno convencional y el CNC (Control Numérico Computarizado). Además, se emplean posibles adaptaciones para la generación de energía. A continuación se explica el saneamiento del motor Stirling Grizzly H8103 (Figura 5.1) para ser caracterizado termodinámicamente, como ya se explicó en el *Capítulo 4*.



Figura 5.1: Stirling Grizzly H8103

5.0.1. Sellado del pistón de trabajo

Un nuevo componente en el motor Stirling es el oring. Debido a que se localizó una fuga de aire considerable en el sistema, se propuso implementar el oring. En la Figura 5.2 se muestra el uso de un oring y un empaque.

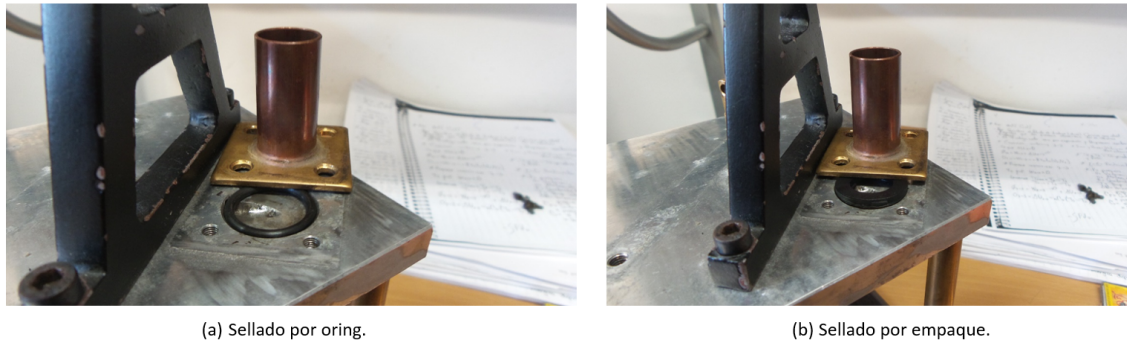


Figura 5.2: Oring para sellado del pistón de trabajo.

Se propusieron dos tipos de sellado: empaque y oring. Se evaluó cuál de los dos sellados funcionaría mejor. Puesto que anteriormente partes del motor Stirling se evaluaron individualmente buscando posibles fugas, rupturas y deformaciones de piezas para poder repararlas o sustituirlas, al poder montar el pistón contra el oring se notó una mejor presión sobre la superficie, evitando la pérdida de presión en el pistón de trabajo, cabe destacar que se introdujo agua demostrando que no había salida del líquido sobre la superficie.

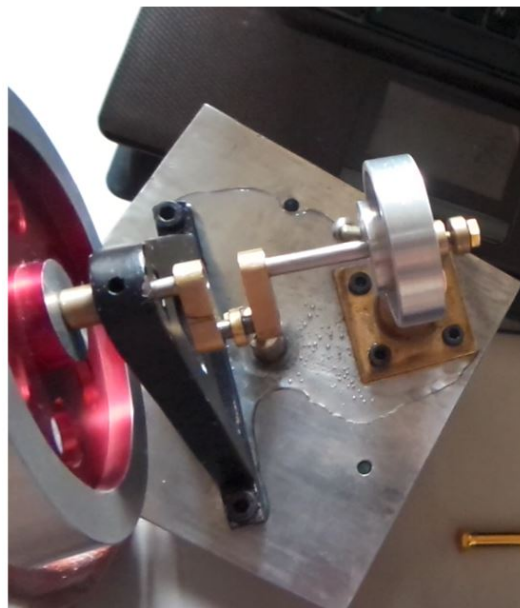


Figura 5.3: Fuga de agua.

Por otra parte, se encontró un problema con relación a la presión, como se muestra en la Figura 5.3. Se notó que no era suficiente el sellado por oring puesto que al poner en marcha el sistema este no funcionaba, al no percibir que más pudiera ser el causante de la pérdida de presión se optó por inyectarle agua, se identificó una fuga de agua considerable implicando microfisuras en algunas de las piezas.

En la Figura 5.4 se muestra las fugas que se localizaron por medio de la inyección de agua. Como se puede notar, las piezas que se muestran son difíciles de replicar. Se nos recomendó usar un pegamento industrial marca "loctite", sus propiedades son para uso industrial ya que este pegamento puede llegar a soportar de 180°C a 200°C. después del sellado por pegamento se volvió a inyectar agua obteniéndose una excelente mejora, ya que este no presento más fugas.

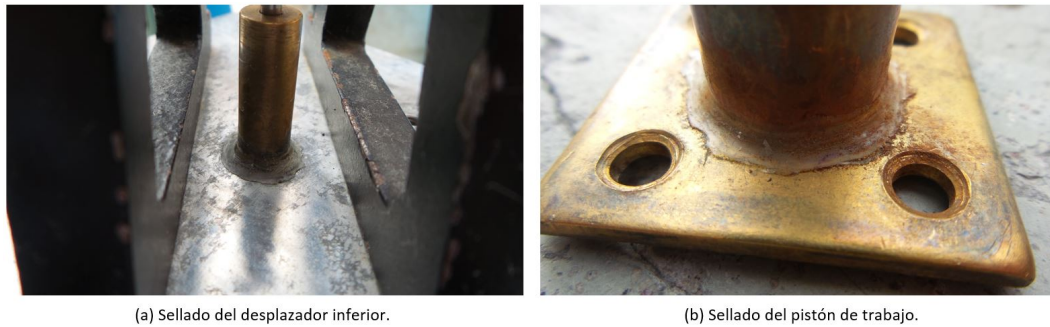


Figura 5.4: Sellado por medio del pegamento loctite.

5.0.2. Manufacturación del dispositivo receptor de calor (foco de calor)

Una pieza clave en el sistema de interés es el foco de calor. En el sistema original el dispositivo receptor de calor está manufacturado con latón-aluminio. Como el proceso de sellado de este era una de las tareas a realizar, consideramos pertinente manufacturar piezas como esta en latón.

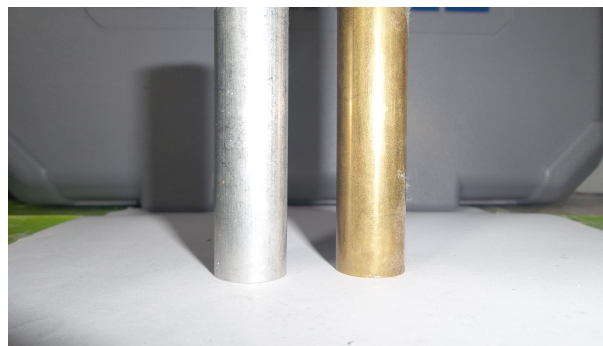


Figura 5.5: Tubo de aluminio (izquierda), tubo de latón (derecha).

Al inicio se experimentó con aluminio y con latón (Figura 5.5) puesto que se observó que el aluminio se dilata un poco más en comparación al latón, en propiedades para manufacturar son similares. Se optó por trabajar el latón, ya que en comparación al aluminio el coeficiente de dilatación es menor, (Latón) $19 * 10^{-6} (^{\circ}C^{-1})$ y (Aluminio) $24 * 10^{-6} (^{\circ}C^{-1})$, respectivamente.

Así, para el foco de calor se realizaron algunas réplicas para resguardar el foco original, ya que este es difícil de manipular por su tamaño y su forma; el foco está sellado de fabrica, ver Figura 5.6(c).



(a) Focos de calor replicas.

(b) Foco de calor replica (izquierdo, centro), foco de calor original (izquierdo).



(c) Vista aérea.

Figura 5.6: Realización del foco de calor.

En las Figuras 5.6 (a),(b),(c) se usaron los focos de calor y se sellaron por ambos lados, con sellos de aluminio, dejando un orificio para el uso del manómetro con el diámetro preciso para poder medir la presión y así evitar una perdida de presión.

5.1. Manufactura los desplazadores

Uno de los factores importantes fue la construcción del pistón principal también llamado desplazador, puesto que es el corazón del sistema para impulsarlo. En la Figura

5.7(a) se muestra el pistón original demostrando pérdida de su forma original cilíndrica debido a los continuos usos a los que se ha expuesto, provocando fugas de presión. En la Figura 5.7(b) se puede mostrar un sellado de fuga por medio del oring ayudando considerablemente a su eficiencia y la conservación de aire caliente dentro del foco caliente.



(a) Desplazador original.



(b) Sellado de fugas.

Figura 5.7: Proceso de sellado.

En la parte del desplazador se realizaron varias medidas, para sustituir el desplazador viejo y mejorarlo con alta precisión por medio del CNC Kimitsu, midiendo el diámetro interno del foco del calor tratando de acercarnos a una medida lo más precisa posible y así evitar grandes pérdidas de presión. Esto es importante, ya que se debe preservar la presión idónea al ver que este debe tener un movimiento libre y evite pasar al pistón de trabajo, ya que si el aire caliente llegara a la sección del aire frío sus temperaturas se equilibrarían y el motor dejaría de funcionar por no tener un pistón de trabajo en estado frío.

En la Figura 5.8(a) se utilizó para el molde interno del foco de calor material epoxico que favorece la fricción y funcionó como regenerador ya que el foco caliente no tenía fugas hacia el foco frío (ver Figura 5.9); una de sus propiedades es que este no retiene mucho el calor directamente al desplazador, en comparación a otros materiales como el aluminio que absorbe el calor y tiende a expandirse.



(a) Material: Plastilina epóxica.

Propiedades: Resistividad volumétrica sin perder su forma original.

Gran dureza y buena adhesividad después de ser moldeado.

Puede ser lijada, taladrada o torneada con facilidad.



(b) Material: Cold Roll 1018.

Propiedades: Acero bajo en carbón por lo tanto es maleable para su manufacturación.

Es uno de los materiales más pesados en comparación al epóxico y aluminio.

Propenso a deformaciones con aplicación de temperatura.



(c) Material: Aluminio 1100.

Propiedades: Es muy resistente y es fácil de darle forma.

Es un buen conductor de calor.

Propenso a deformaciones con aplicación de temperatura.

Muy liviano con respecto al Cold roll



(d) Material: Aluminio 2000.

Propiedades: Posee alta resistencia mecánica y baja resistencia a la corrosión.

Propenso a deformaciones con aplicación de temperatura.

Muy liviano con respecto al Cold roll.

Figura 5.8: Materiales para el desplazador.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO MECÁNICO DEL MOTOR STIRLING Y APLICACIONES

5.1. MANUFACTURA LOS DESPLAZADORES

En la Figura 5.8(b) se muestra el material Cold roll 1018 que se utilizó como una opción para el desplazador. Puesto que este material es usado para uso rudo, su manufacturación es algo lenta en comparación con el aluminio ya que la fresa convencional del laboratorio de prototipos mecatrónicos (LPM) no proporciono las demandas que esperábamos tal que se uso en CNC Kimitsu del laboratorio para un uso más rudo y preciso. Se encontró que la pieza es muy pesada para poder montarlo el foco de calor puesto que al exponerlo al fuego este tenía una considerable expansión de su medida original, este se atoraba en el foco de calor esperando un tiempo considerable a que este regresara a su forma original para poder sacarlo.

En las Figuras 5.8(c),(d) Aluminio 1100 y 2000, se utilizaron para la manufacturación del desplazador. Su manufacturación es rápida en comparación con los materiales anteriormente trabajados, puesto que al montarlo en el CNC Kimitsu este evitaba vibraciones proporcionalmente a los RPM (Revoluciones por minuto). Este material con respecto a su aplicación es muy bueno, tal que en comparación a la dureza del Cold Roll 1018, su réplica es muy rápida y se disminuye considerablemente el peso. Esto es crucial por qué se notó que con relación a la presión interna este empuja más rápido el desplazador provocando un cambio armónico con respecto al pistón de trabajo.



Figura 5.9: Molde interno.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos obtenidos con respecto a la manufacturación de las Figuras 5.8. Cada uno de los materiales se trabajó experimentalmente para saber cual era el más adecuado para la puesta en marcha del sistema de interés.

Material	Presión a(Bar)	Presión b(Bar)
Plastilina epóxica	1.0	Nulo
Cold Rolle 1018	0.5	Nulo
Aluminio 1100	1.0	3.0
Aluminio 2000	0.8	2.8

Tabla 5.1: Datos sobre las pruebas de los materiales.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO MECÁNICO DEL MOTOR STIRLING Y APLICACIONES

5.1. MANUFACTURA LOS DESPLAZADORES

En la Tabla 5.1 la plastilina epóxica muestra una presión nula puesto que tiene la medida exacta al diámetro interno, esto provocó una fricción considerable en las paredes del foco de calor, provocando que este no llegara a la presión final que se esperaba alcanzar.

El material Cold Rolle 1018, para su manufacturación se usó el CNC Kimitsu tal que se necesitaba un buril más robusto por ser un material relativamente duro en comparación al convencional. Al introducir la pieza al sistema se notó que la presión llegaba a la mitad por el peso mismo ya que esto también implicó que la presión fuera nula.

El aluminio 1100 y 2000 son materiales muy parecidos, al ser maquinados estos son creados rápidamente en comparación a los otros materiales tal que son muy buenos para su experimentación. Al introducirlo al sistema se descubrió un conjunto amigable con la presión y su peso puesto que el material es liviano en comparación a los otros materiales, provocando que este llegara a la presión final deseada.

Para las mediciones finales de los focos de calor se manufacturaron sellos para evitar las fugas de aire esto ayudo a tener mediciones más precisas, por cuestión de seguridad, los sellos están metidos a presión con el mismo diámetro ya que estos se botarán proporcionalmente cuando el aire se expanda al aumentar su temperatura se descubrió que los tubos se microfisuraban.



Figura 5.10: Tapones para foco de calor.

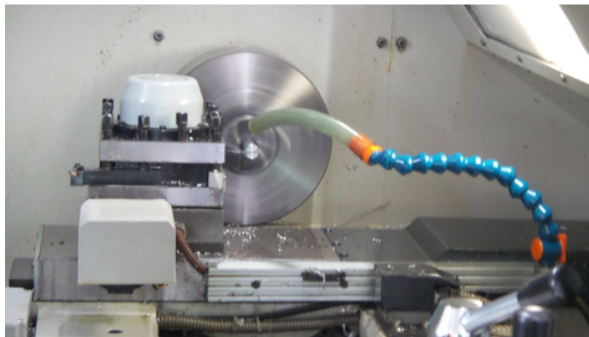
En la Figura 5.11 se muestra el comienzo de las mediciones con un termómetro infrarrojo digital, esto ayudó a tener medidas más precisas sin afectar al sistema para dar comienzo a los cálculos termodinámicos.

En la Figura 5.12 se muestra el proceso de ensamblado y pruebas finales con respecto a la medida interna que se encontró para su funcionamiento óptimo.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO MECÁNICO DEL MOTOR STIRLING Y APLICACIONES
5.1. MANUFACTURA LOS DESPLAZADORES



Figura 5.11: Mediciones con termometro infrarojo digital.



(b) Manufacturación del desplazador.



(a) Foco de calor con el desplazador.



(C) Medida del desplazador.

Figura 5.12: Creación del desplazador.

5.2. Plataforma Solar de Almería, Centro de Investigación Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

La Plataforma Solar de Almería España (PSA), a finales de los años 1970, inicia con la construcción en el Desierto de Tabernas en Almería-España de dos proyectos para la demostración de la viabilidad técnica de la producción de energía eléctrica mediante Sistemas Termosolares de Concentración (ahora denominados “Centrales Termosolares de Primera Generación”).

El primer proyecto, conocido como *Small Solar Power Systems* (SSPS, por sus siglas en inglés), estaba auspiciado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y contó con la participación de nueve países: Alemania, Austria, Bélgica, España, Estados Unidos, Grecia, Italia, Suecia y Suiza. Consistió en el diseño, construcción y ensayo de dos plantas termosolares de producción de electricidad de 500kW de potencia nominal cada una; la primera de ellas basada en la tecnología de torre o receptor central y la segunda en la tecnología de captadores cilindro-parabólicos [13].

5.2.1. Sistemas de concentración solar

Las centrales termosolares para producción de electricidad o aplicaciones químicas implican diseños que tienden a aproximarse al diseño del concentrador parabólico ideal.

Habitualmente se usan concentradores solares por reflexión para alcanzar las temperaturas requeridas en la operación de los ciclos termodinámicos o los procesos químicos. Los tres conceptos de concentración solar más utilizados son:

- Concentradores cilindro-parabólicos: concentradores de foco lineal con seguimiento en un solo eje; concentraciones de la radiación de 30 a 80 veces y potencias de 30 a 80MW eléctricos.
- Sistemas de torre o de receptor central: campo de helióstatos que siguen la posición del Sol en todo momento y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Los órdenes de concentración son de 200 a 1000 veces y las potencias unitarias son de 5 a 25kW.
- Discos parabólicos: pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado a un motor Stirling situado en el foco. Niveles de concentración de 1000 a 4000, potencias unitarias de 5 a 25kW.

Las tecnologías de concentración solar (TCS) mostradas en la Figura 5.13 juegan un papel relevante en la producción de electricidad a gran escala. Las tres tecnologías presentan entre sí diferencias de costes en la primera fase de implantación, pero proyectan posteriormente costes de producción muy similares.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO MECÁNICO DEL MOTOR STIRLING Y APLICACIONES

5.2. PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA, CENTRO DE INVESTIGACIÓN ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS (CIEMAT)

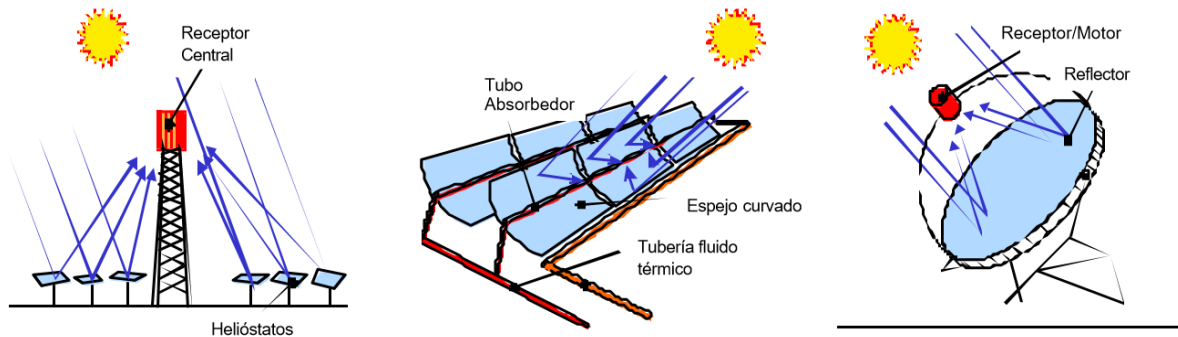


Figura 5.13: Configuraciones más habituales de los sistemas de concentración solar utilizados en centrales termosolares [13].

Las medidas para la implantación de las plantas termosolares y la consecución de los objetivos de costes fijados, conjugan iniciativas en los ámbitos tecnológico, económico y social, pasan sin duda por la construcción en una primera etapa de una pequeña serie de unidades de demostración con operación en régimen comercial y potencias solares en el entorno de las decenas de MW [13].

5.2.2. DISTAL I

El proyecto DISTAL I-Stirling (Figura 5.14) puesto en marcha en España-Alemania en la Plataforma Solar de Almería. Los concentradores solares se construyeron utilizando la tecnología de membranas de metal y con bisagras a lo largo del eje polar en los discos parabólicos de concentrador solar estos están equipados con una versión mejorada del motor Stirling y el primer sistema sencillo de control semi-automático fue desarrollado.

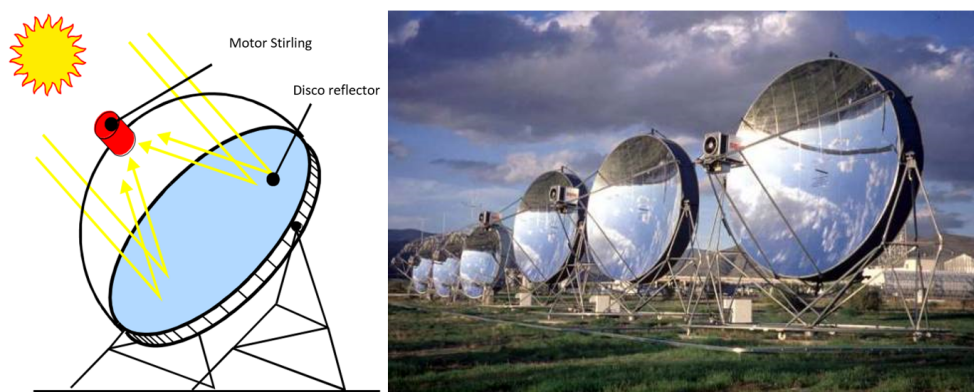


Figura 5.14: Sistema de disco solar DISTAL I [13].

El sistema DISTAL I-Stirling se compone de sistemas parabólicos de generación de energía eléctrica mediante el uso de la radiación solar directa. La capacidad de generar

energía de una sola unidad es normalmente de 9 kW. Este tamaño de las unidades individuales califica el sistema DISTAL I para aplicaciones muy flexibles, incluso se espera que los sistemas Dish-Stirling pueden satisfacer las demandas de consumo de energía [23].

5.2.3. DISTAL II

El sistema DISTAL II-Stirling (Figura 5.15) consiste en un conjunto de sistemas parabólicos de generación de energía eléctrica mediante el uso de la radiación solar directa. La capacidad de generar energía de una sola unidad es normalmente de 10 kW [23].



Figura 5.15: Sistema de disco solar DISTAL II [13].

5.3. Aplicación con disco solar Stirling Grizzly H8103

Esta aplicación está basada en un disco solar reflejando lo más posible la luz solar dirigida al foco de calor del motor Stirling. Como se vio en el inicio de este capítulo, algunos países están usando varios discos solares con el motor Stirling 161 explicado en el *Capítulo 1* resistiendo temperaturas hasta 700°C protegiendo el pistón de trabajo con disipadores de agua o con nitrógeno líquido, en este caso se analizará teóricamente con los datos tomados del *Capítulo 4* y poder tener una idea más general sobre la aplicación.

La ventaja de este tipo de sistemas parabólicos es el poder de concentración del haz de luz en un solo punto, el objetivo de la mayoría de estos sistemas termoeléctricos es la recaudación de la radiación calorífica en un punto en específico, que en este caso sería el foco de calor, alcanzando niveles de temperatura ideales que permiten convertir la energía calorífica en movimiento mecánico sin la necesidad de usar un combustible fósil[5].

A continuación en la Figura 5.17 se muestra un disco parabólico para la adaptación del disco solar de la Figura 5.16, puesto que este estará acoplado en una base actuando

CAPÍTULO 5. DESARROLLO MECÁNICO DEL MOTOR STIRLING Y APLICACIONES

5.3. APLICACIÓN CON DISCO SOLAR STIRLING GRIZZLY H8103

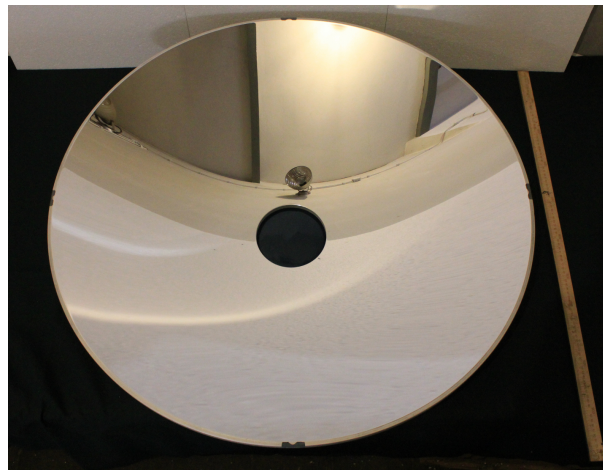


Figura 5.16: Disco solar parabólico.

como receptor del disco solar.

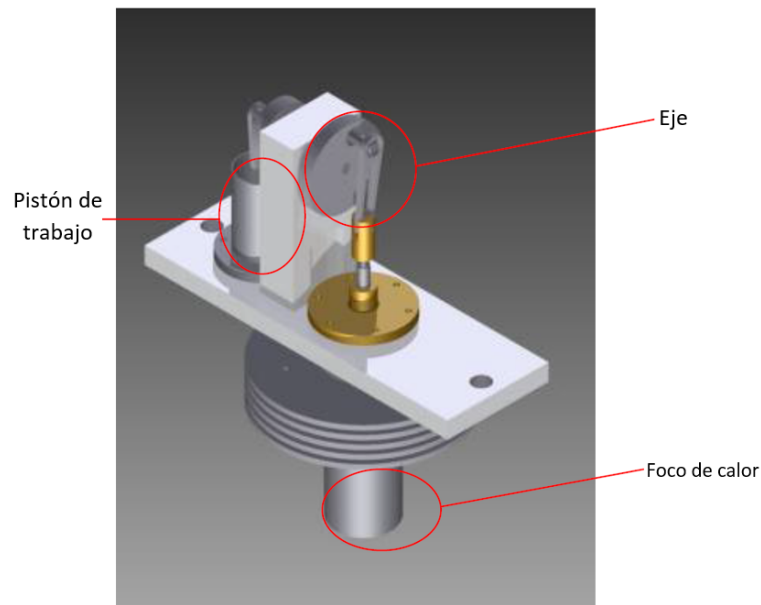


Figura 5.17: Rediseño para aplicarlo a un disco solar.

En la Figura 5.18 se muestra un posible diseño del disco solar Stirling. Como se explicó anteriormente, su principal fuente de energía es el calor proporcionado por la luz solar, provocando que el aire se caliente y se expanda en el interior del cilindro accionando el desplazador provocando el movimiento de la manivela o eje (Figura 5.17), que a su vez mueve el pistón de trabajo, puesto que el aire está en un estado frío con relación al foco de calor provocando un efecto de repulsión, ya que el eje tiene una forma de cigüeñal

provocando que el desplazador actúe de manera opuesta al pistón de trabajo.

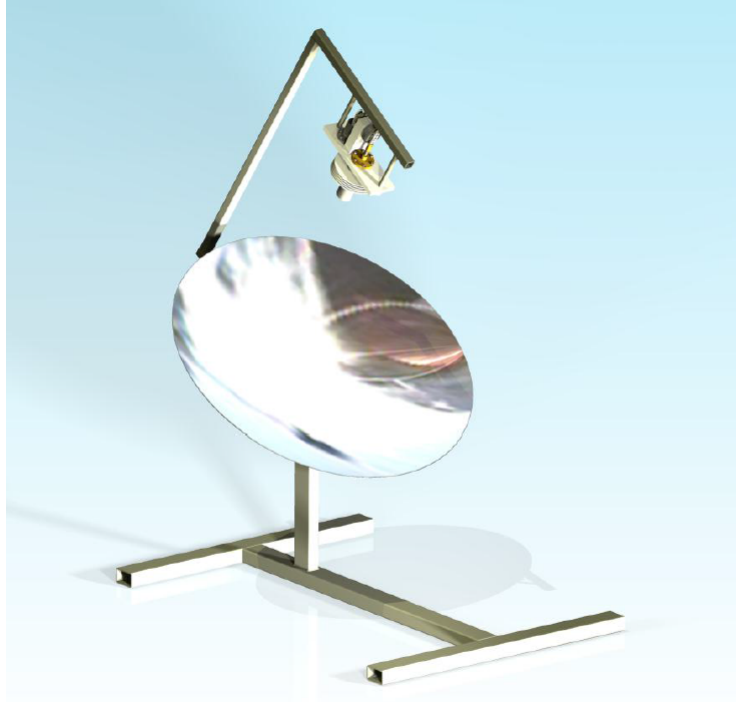


Figura 5.18: Disco solar con motor Stirling.

5.3.1. Aplicación con dínamo Stirling Grizzly H8103

Esta aplicación se debe sobre algunos métodos que se utilizan actualmente para comunidades que necesitan generar energía eléctrica dependiendo de los lugares, ya que dependiendo de la zona geográfica la luz solar no es continua y no es posible almacenar energía suficiente para necesidades básicas.

Esta aplicación está basada sobre una modificación del diseño original. Esta idea surge con la adaptación de un dínamo o un alternador, en la Figura 5.19 se muestra un motor Stirling combinando los tipos alfa y gamma, puesto que este proporcionará un mantenimiento más rápido y eficaz, su construcción o reproducción de piezas sería más rápida en comparación con las piezas del motor original debido a que para el motor tipo gamma su mantenimiento sería un poco más difícil en cuestión del desarmado, visto que esta opción de diseño da la posibilidad de cambiar o poner un alternador más robusto para mayor producción de energía.

En la Figura 5.20 se muestra la eliminación de la base del motor Stirling (ver Figura 5.1) puesto que esto facilitaría el montaje del dínamo o del alternador. Como se explicó anteriormente, el motor cuenta con una combinación de dos estilos de configuración

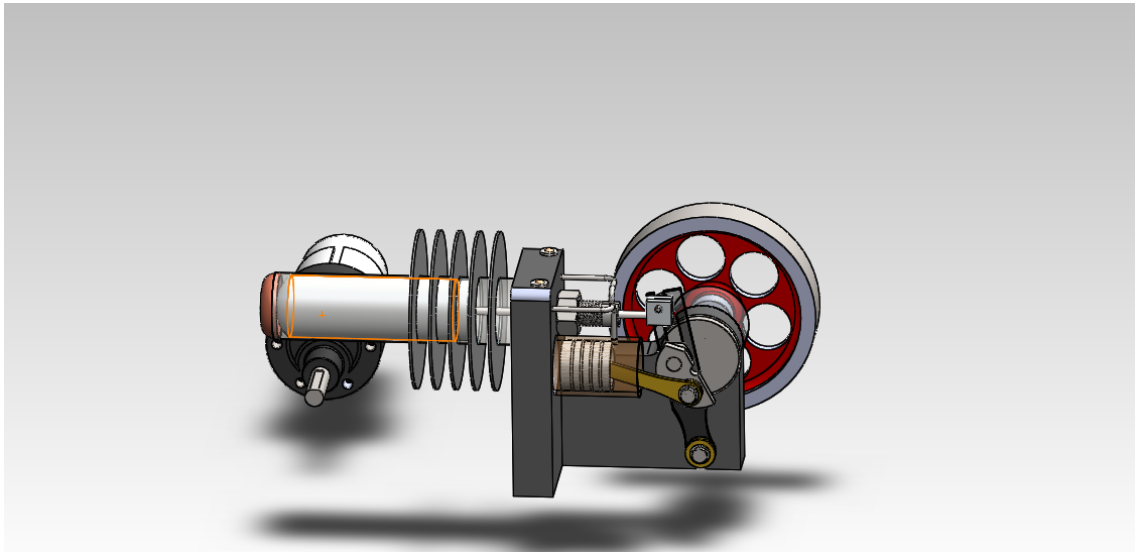


Figura 5.19: Diseño alfa-gamma.

alfa-gamma mantenido una distancia adecuada con el foco de calor y con el dínamo, provocando que cada uno de los sistemas no afecten su funcionamiento.

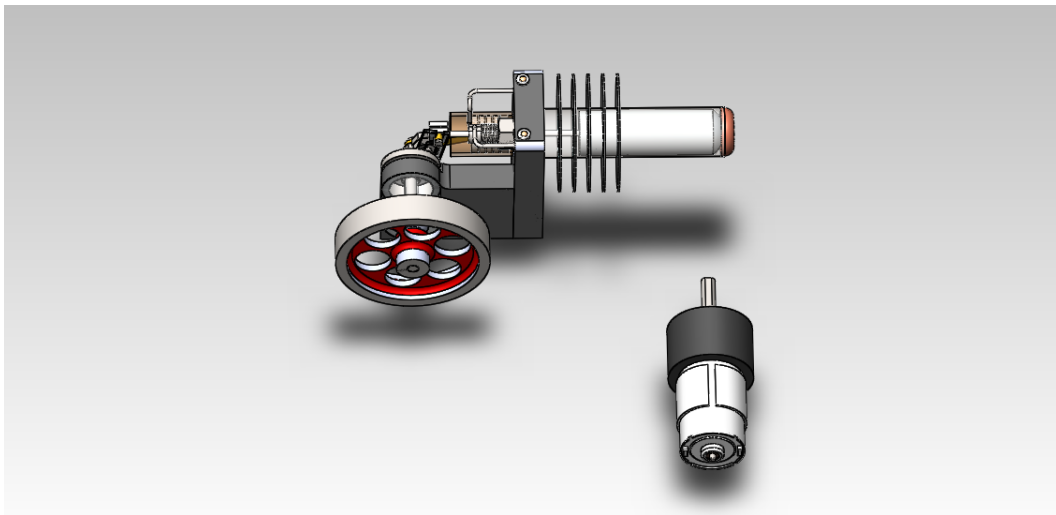


Figura 5.20: Diseño para la adaptación de un dínamo.

En la Figura 5.21 se muestra una mejor perceptiva conforme a la complementación del volante y el eje esto da una facilidad para el intercambio y desarmado de una banda de transmisión provocando la generación de energía con base al calor suministrado al foco de calor provocando una mayor velocidad al volante.

En este capítulo dimos algunas aplicaciones del motor Stirling. En este trabajo el motor Stirling Grizzly H8103 se revisó para hacerlo funcional, mostramos la secuencia y

**CAPÍTULO 5. DESARROLLO MECÁNICO DEL MOTOR STIRLING Y
APLICACIONES**

5.3. APLICACIÓN CON DISCO SOLAR STIRLING GRIZZLY H8103

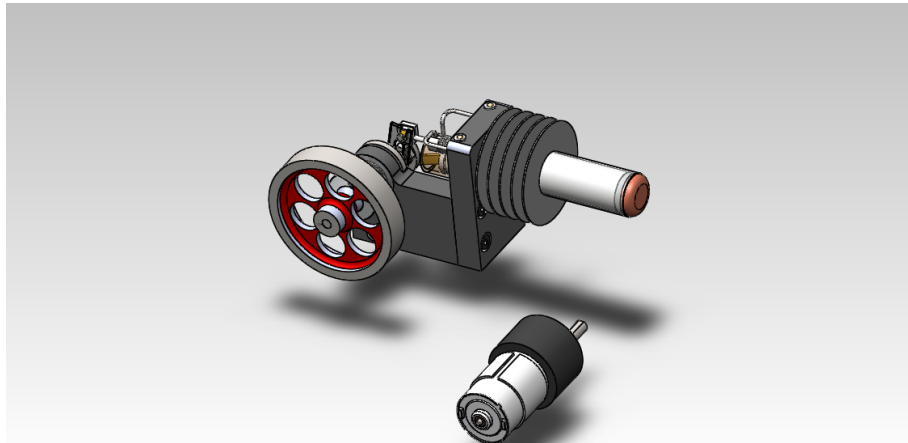


Figura 5.21: Diseño lateral alfa-gamma.

el proceso de su funcionamiento. Finalmente, se presentan posibles adaptaciones de este tipo de motor para la generación de energía.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se propuso rediseñar un motor Stirling tipo Vertical usando como combustible un mechero de alcohol de combustión limpia. Para ello se presentó el estudio de los modelos termodinámicos con el fin de proponer como sustancia de trabajo al aire y analizar de manera teórica al gas Helio.

Inicialmente se priorizó la restauración del motor Stirling puesto que este daría pauta al estudio y caracterización del mismo, alcanzando el objetivo de que este fuera funcional en la parte mecánica. Se llegó a determinar que el desplazador y el foco de calor influyeron constantemente en el funcionamiento del motor. Se manufacturaron seis medidas diferentes del desplazador con pequeños cambios de tamaño milimétricos manufacturados en el CNC Kimitsu. Se concluyó que si el tamaño del diámetro del desplazador se hace al tamaño del diámetro interno del foco de calor este puede generar una mayor transferencia de calor y menos desplazamiento de aire caliente a la cámara del pistón del trabajo. Esto es debido a que este tiene que estar en un ambiente frío. Se encontró que si el diámetro del desplazador es igual o mayor al diámetro interno del foco de calor, este se fractura o la presión puede llegar a ser tanta que el aire caliente botará al desplazador.

Con el motor Stirling funcional se consideró la sustancia de trabajo gas ideal para poder caracterizarlo, posteriormente se realizó la comparación con el gas real de Van der Waals. El resultado de estas simulaciones fue el esperado en relación a los datos recabados basados en los resultados teóricos obtenidos del proceso termodinámico usando aire y gas Helio, tal que se complementó la parte experimental con la parte teórica obteniéndose una idea más clara con los resultados mostrados en diagramas P-V. Al aplicarle un aumento de temperatura al foco de calor se observó que el motor deja de ser funcional debido a que el pistón de trabajo se calienta provocando que el foco frío alcance una temperatura similar. Esto se puede mejorar con un sistema de enfriamiento añadido al pistón de trabajo, la información adquirida sugiere que en los motores Stirling que alcanzan los 900°C se debe usar un sistema de enfriamiento como el agua o el nitrógeno en flujo continuo para que su movimiento sea igualmente continuo.

Se encontró en la experimentación que los desplazadores, el peso y el material influyen mucho en el foco de calor. En el caso de la plastilina epoxica y el Cold Rolle 1018, su rendimiento es nulo puesto que la presión no pudo romper la inercia por sí solo. Las propiedades del aluminio 1100 en comparación a las propiedades del aluminio 2000 son muy parecidas pero tienen muy pequeñas variaciones con relación a la presión inicial y final, el aluminio 1100 con la presión inicial de 1 Bar y final 3 Bar en comparación al aluminio 2000 con la presión 0.8 Bar y final 2.8 Bar, se obtiene un mejor rendimiento del 28.6% en comparación al aluminio 2000 que es del 28.5%, se tomo el de mejor rendimiento aunque este tenga una pequeña diferencia.

Como se explico al inicio, a este motor se propuso adaptarle un disco solar, sustituyendo el combustible fósil (o alcohol), para poderlo hacer libre de emisiones, proyectando el haz de luz en el foco de calor para provocar un movimiento continuo. También se sugirió el uso de un dínamo para la generación de energía enfocado a las energías alternas ya que este puede complementarse con el disco solar que da la posibilidad de que la energía sea almacenada.

Adicionalmente, se observó que tenemos alternativas para poder generar energía. Aplicando los conocimientos adquiridos a lo largo de mi formación académica se puede incidir tanto en desarrollo tecnológico como en la concientización de la población, en el sentido de que existe otra manera de adquirir energía limpia. Finalmente, con base en los materiales que se adquirieron para la reparación del motor Stirling, en un futuro se piensa construir un motor con tres focos de calor conectándolos por medio de las manivelas provocando que el motor tenga una mayor capacidad de giro, ya que se tienen las medidas para poder replicarlo creando un motor tipo V3, como se propone en la literatura, puesto que este puede mejorar el rendimiento.a

Bibliografía

- [1] R. Rubén A. Matas. *Análisis de la evolución histórica de las máquinas térmicas durante el periodo 1826-1914 a través de las patentes españolas de la época.* (2004).
- [2] R. J. Meijer. *The Philips Stirling thermal engine: analysis of the rhombic drive mechanism and efficiency measurements.* (1960).
- [3] H. Müller-Steinhagen and F. Trieb. Concentrating solar power. *A review of the technology. Ingenia Inform QR Acad Eng*, 18:43–50, (2004).
- [4] W. R. Martini. Stirling engine design manual. Technical report, Washington Univ., Richland (USA). Joint Center for Graduate Study, (1978).
- [5] I. Kolin. Stirling motor: history-theory-practice, inter university center. *Dubrovnik*, (1991).
- [6] C. S. Vineeth. *Stirling Engines: A Beginners Guide.* Vineeth CS, (2011).
- [7] Motores de ciclo Stirling <http://personales.able.es/jgros/>. (2000).
- [8] Y. A Çengel, M. A. Boles, and G. N. Cázares. *Termodinámica.* McGraw-Hill México, (2003).
- [9] Centro de computación universidad de chile <http://www.cec.uchile.cl>. (1998).
- [10] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, and M. Leahy. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4):1059–1082, (2010).
- [11] David Haywood. An introduction to stirling-cycle machines. *Department of Mechanical Engineering, Cambridge University (19 Oct 2007)*, pages 1–11, (2006).
- [12] A. Nuvolari, B. Verspagen, and N.f Von Tunzelmann. The early diffusion of the steam engine in britain, 1700–1800: a reappraisal. *Cliometrica*, 5(3):291–321, (2011).
- [13] N. Badea. *Design for Micro-Combined Cooling, Heating and Power Systems: Stirling Engines and Renewable Power Systems.* Springer, (2014).
- [14] Información recopilada por el coordinador de Proyectos de Grado de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad EAFIT. Artículos de los proyectos de grado realizados por los estudiantes de ingeniería mecánica, (2007).

- [15] B. Kongtragool and S. Wongwises. A review of solar-powered stirling engines and low temperature differential stirling engines. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 7(2):131–154, (2003).
- [16] J. A. A. Flórez, I. C. Agramunt, S. F. Farrús, P. R. Carles, D. B. Grande, J. C. Rossell, T. N. Odriozola, C. F. Freixa, A. G. Fontal, and A. M. Luque. *Máquinas térmicas motoras (volum II)*, volume 135. Univ. Politèc. de Catalunya, (2004).
- [17] Allan J Organ. *Stirling Cycle Engines: Inner Workings and Design*. John Wiley & Sons, (2013).
- [18] T. Keck and W. Schiel. Envirodish and eurodish system and status. In *Proceedings of ISES Solar World Congress*, (2003).
- [19] T Finkelstein. *Air engines: the history, science, and reality of the perfect engine/Theodor F., Allan J.* (2001).
- [20] X. E. Castells. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos, (2012).
- [21] M. J Moran and H. N. Shapiro. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverté, (2004).
- [22] G. Walker. *Stirling engines, (1980)*. Clarendon Press, Oxford.
- [23] T. Keck and W. Schiel. Dish/stirling-anlagen zur dezentralen solaren stromerzeugung, (2002).