



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ingeniería Mecánica e Industrial

“DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN MOTOR STIRLING”

T E S I S

Para obtener el título de
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

MIGUEL HERNANDEZ GUILLERMO
SANCHEZ RAMIREZ JOSE SALVADOR



Ciudad Universitaria, México, D.F. Febrero de 2013.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Objetivos	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
Introducción	5
i Motor Stirling como generación alternativa de energía eléctrica	6
ii Antecedentes.....	15
Capítulo I Motor Stirling	24
1.1 Antecedentes históricos.....	25
1.2 Clasificación de los motores Stirling	27
1.2.1 Motor tipo alfa	27
1.2.2 Motor tipo beta	28
1.2.3 Motor tipo gamma.....	29
1.3 Ciclo Stirling.....	31
1.4 Ventajas y desventajas de motores Stirling.....	33
1.5 Usos comunes del motor Stirling.....	35
1.5.1 Motor Stirling en el área automotriz.....	35
1.5.2 Motor Stirling en la industria naval.....	37
1.5.3 Motores Stirling y la energía solar	38
Capítulo II Teoría de Schmidt para motor Stirling	40
2.1 Concepto de la teoría de Schmidt.....	41
2.2 Trabajo y calor transferido por ciclo.....	47

DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN MOTOR STIRLING

2.3 Eficiencia	48
2.4 Número de Beale	49
Capítulo III Proceso de diseño	50
3.1 Especificaciones para el motor Stirling	51
3.2 Definición de tipo de motor Stirling	52
3.3 Análisis termodinámico	53
3.4 Diseño de piezas de un motor Stirling.....	55
Conclusiones	60
Bibliografía	62
Anexos	63

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN MOTOR STIRLING.



Objetivos

Objetivo general

Utilizar las herramientas adecuadas y la información necesaria para crear el prototipo de un motor Stirling que estará diseñado para la generación alternativa de energía eléctrica, con el propósito de proporcionar un medio para obtener energía eléctrica con menos emisiones de contaminantes y un motor altamente eficiente.

Objetivos específicos

- Elaborar una lista de ventajas y desventajas que muestre los beneficios de un motor Stirling.
- Diseñar y crear un prototipo de motor Stirling a partir de un análisis termodinámico.
- Mostrar aplicaciones próximas para motores Stirling como generación alternativa de energía eléctrica.

Introducción

En la actualidad la energía eléctrica es una necesidad para la sociedad en general, la generación de la misma se ha hecho un reto para todos, en la búsqueda de fuentes alternativas de energía.

La generación de energía eléctrica en México es principalmente mediante uso de combustibles fósiles en las termoeléctricas del país; se utilizan otros medios como el agua mediante las hidroeléctricas y de forma eólica. En cualquiera de estas formas de generación es bastante costosa para obtener el producto final (energía eléctrica) y la distribución de la misma, además de ser altamente contaminante.

En México se ha iniciado a fomentar el ahorro de energía eléctrica en los distintos sectores (doméstico, empresarial, etc.), implementando lámparas fluorescentes compactas, renovación de refrigeradores, uso adecuado de lavadoras, corrección de factor de potencia, implementación de iluminación mediante LED's, etc.; todo esto con el fin de ahorrar los recursos naturales y tener menores índices de contaminación ambiental.

Surge la necesidad de pagar menos por este producto y una solución es tener otros medios para poder generar su propia energía eléctrica; se cuenta con distintos medios para esta generación como paneles solares, generadores eólicamente accionados mediante aspas, etc.

Un medio que se ha dejado en el olvido en los años recientes; es el MOTOR STIRLING, que puede ser una forma de generar energía, si no para suministrar energía para una casa, por sus desventajas, sí se puede utilizar para el funcionamiento de unos cuantos aparatos.

Los motores Stirling solo requieren una fuente que les proporcione calor y empezarán a generar energía eléctrica, esta fuente de calor se puede obtener de muchos medios a costos más bajos y hay menor porcentaje de contaminación con estos.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

¡ Motor Stirling como generación alternativa de energía eléctrica



Fuentes de generación de energía eléctrica en México

Principales plantas generadoras de energía eléctrica en México

La Comisión Federal de Electricidad es la empresa del Estado que se encarga de la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en el país. Actualmente atiende a 25.3 millones de servicios. Sin embargo, poco se sabe de dónde proviene la energía que todos los días de forma permanente mantiene las actividades de personas, empresas y gobierno.

La capacidad de generación cuenta con 177 centrales generadoras de energía, lo que equivale a 49,854 MW (megawatts), incluyendo a aquellos productores independientes que por ley están autorizados para generarla.

Los clientes a los que se suministra energía eléctrica están divididos por su actividad, así el 4.5% se destina al sector agrícola, el 3.8% al municipal, el comercial y servicios 7.5%, el 25.4% al doméstico y el industrial con 58.8%, además, la demanda aumenta cada año.

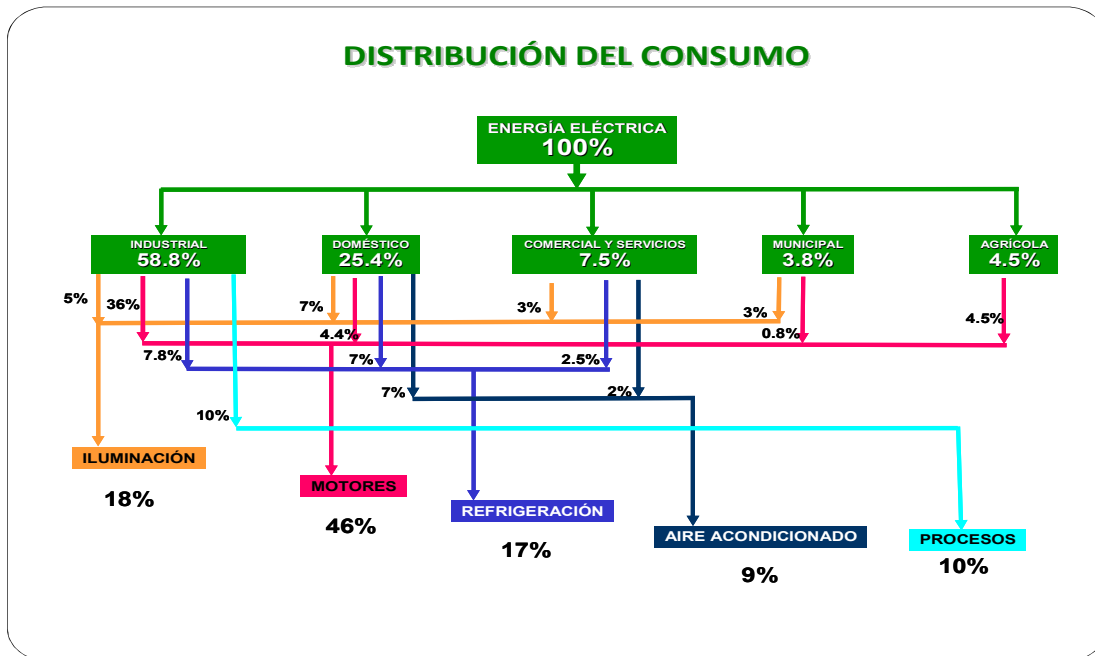


Figura A. Distribución del consumo.

La capacidad instalada se integra con todas las formas de generación; las termoeléctricas representan el 59.28% de la generación, carboeléctricas 7.37%, en tanto las hidroeléctricas el 27.52%, mientras que las nucleoeeléctricas contribuyen con el 3.71%, con menor capacidad están las Geotermoeléctricas con 1.959% de generación total y las Eoloeléctricas con sólo 0.171%. Un caso especial son los productores independientes que producen un alto porcentaje en relación con las otras formas de generación, ya que aportan el 22.98% de la capacidad instalada, según la misma CFE.

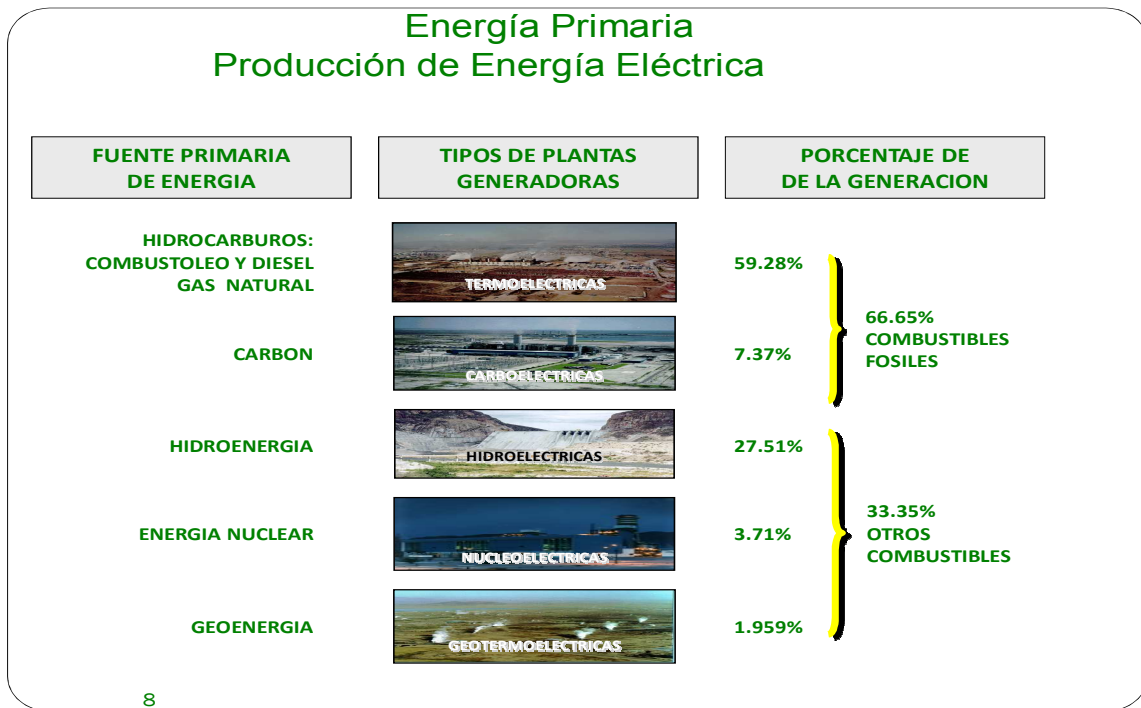


Figura B. Producción de energía eléctrica.

Como se puede observar en los datos anteriores la mayor parte de la energía eléctrica generada en México es destinada a dos principales sectores, el industrial y el doméstico por ello puede ser una gran área de oportunidad para producir energía eléctrica con fuentes alternas y limpias en estos dos sectores.

Implementación de un motor Stirling para generar energía eléctrica

En el sector doméstico e industrial CFE, ya permite que el usuario tenga una propia fuente de energía eléctrica, siempre y cuando sea renovable, esto es gracias a que el 8 de abril del 2010 se publica en el DOF (Diario Oficial de la Federación) la resolución RES/054/2010 con la que se aprueba el Modelo de Contrato de Interconexión para Fuentes de Energía Renovable o Sistema de Cogeneración en pequeña y mediana escala, mismo que sustituye al de la resolución RES/176/2007.

Características principales

El contrato de interconexión tendrá vigencia indefinida y debe mantener un contrato de Energía Eléctrica.

Se establece que el Generador pondrá a disposición de CFE, la energía producida por la fuente de energía renovable y CFE se compromete a recibirla.

Aplicable a:

Baja Tensión Domésticas hasta 10 kW.

De Uso General hasta 30 kW.

Media Tensión Hasta 500 kW.

Para ambos casos solo aplica auto-abastecimiento; no es posible portear energía.

Para efectos de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el

Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), se define como Energía Renovable (ER):

- a) El viento.
- b) La radiación solar, en todas sus formas;
- c) El movimiento del agua en cauces naturales o artificiales;
- d) La energía oceánica en sus distintas formas.
- e) El calor de los yacimientos geotérmicos.

Esquema de un sistema de energía renovable (ER)

El sistema está conformado por una fuente de ER y un generador de energía eléctrica, misma que es utilizada en las cargas del cliente. Los excedentes generados se aportan al sistema eléctrico de CFE.

Ambos flujos de energía (el aportado por el sistema eléctrico de CFE y el del cliente), son registrados por un medidor bidireccional.



Figura C. Esquema de un sistema de energía renovable.

Gracias a esta ley que permite al usuario generar su propia energía eléctrica para su autoabastecimiento se puede adaptar un Motor Stirling en un servicio doméstico y generar energía eléctrica durante el día y así inyectarle el excedente a las líneas de CFE y posteriormente utilizar ese excedente para energizar sus domicilios por la noche, en la actualidad la energía generada en el sector doméstico es por medio de celdas solares pero en realidad se podría adaptar un motor Stirling y aprovechar la energía solar de igual forma.

Energías renovables en la industria

Central térmica solar

La central térmica solar se encuentra en la industria como una buena opción, a este tipo de proyectos se les denomina energía termo solar.

Es una instalación industrial, en la que a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover un alternador para generación de energía eléctrica como en una central térmica clásica.

Es necesario concentrar la radiación solar para que se puedan alcanzar temperaturas elevadas, de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, y obtener así un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico, que no se podría obtener con temperaturas más bajas.

Sistemas disco Stirling

Son pequeños equipos de generación de energía que convierten la energía térmica de la radiación solar en energía mecánica y luego en energía eléctrica.



Figura D. Disco Stirling.

DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN MOTOR STIRLING

El receptor es el enlace entre el concentrador y el motor Stirling, tiene dos tareas fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.

- Transmitir esta energía absorbida al motor Stirling en forma de calor con las pérdidas mínimas.

Los receptores directamente iluminados permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling convencionales. En estos receptores la radiación solar absorbida está formado con un haz de tubos por donde circula el fluido de trabajo del motor (helio o hidrógeno) altamente presurizado.

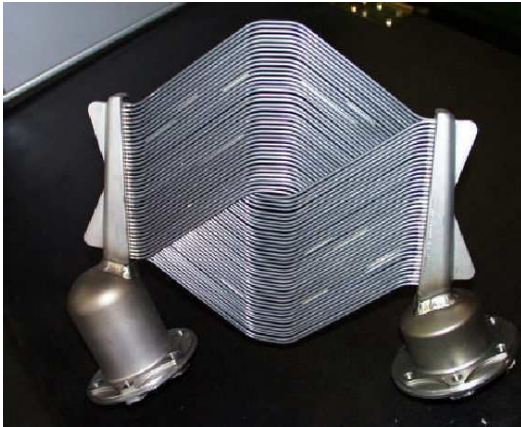


Imagen del motor Stirling V161 con receptor solar.

Figura E. Motor Stirling.

Las centrales de torre

También conocida como sistema de receptor central.

Está compuesta por un sistema concentrador o campo de helióstatos, que capta y concentra la componente directa de la radiación solar sobre un receptor —donde se produce la conversión de la energía radiante en energía térmica que suele instalarse en la parte superior de una torre.



Figura F. Centrales de Torre.

En general, el motor Stirling es de suma importancia de manera indirecta para la generación de energía eléctrica por su alta eficiencia y fácil utilización por lo que se busca implementar en distintos procesos para la generación alternativa de energía eléctrica o energías renovables. Una tecnología olvidada durante años, vuelve a ser vista con mucho interés para muchos proyectos de esta índole.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ii Antecedentes



Motores de aire caliente

El término de motores de aire caliente se le da a las máquinas térmicas que hacen uso de la expansión y compresión de aire bajo influencia de un cambio de temperaturas al tener un depósito de temperatura alta y un depósito de temperatura baja para convertir la energía térmica del mismo en energía mecánica. En seguida se ilustra un diagrama de los motores de aire caliente (ver Figura G).

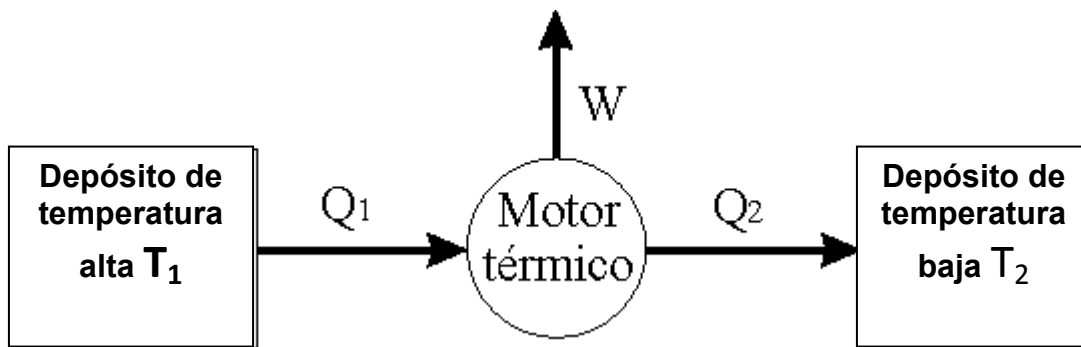


Figura G. Diagrama de un motor de aire caliente que produce energía mecánica (W), por una diferencia de temperaturas.

En este tipo de motores, el aire se calienta y enfría en repetidas ocasiones dentro de un cilindro, tal efecto produce una expansión y compresión del aire, provocando el movimiento del pistón; produciéndose así trabajo útil.

Existen distintos tipos de motores de aire:

- a) Motor Carnot.
- b) Motor Ericsson. (ver figura H)
- c) Motor Stirling. (ver figura I)



Figura H. Motor Stirling

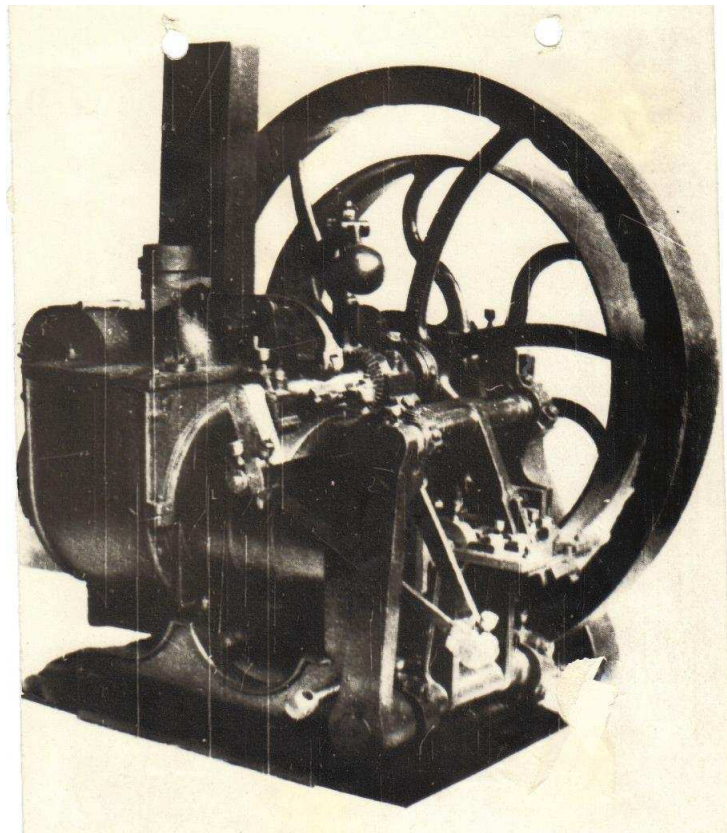


Figura I. Motor Ericsson.

Estos tipos de motores se aproximan a la eficiencia de un ciclo de Carnot ideal.

Ciclo de Carnot

En 1824 el ingeniero francés Sadi Carnot estudió la eficiencia de las diferentes máquinas térmicas que trabajan transfiriendo calor de una fuente de calor a otra y concluyó que las más eficientes son las que funcionan de manera reversible. Para ello diseñó una máquina térmica totalmente reversible que funciona entre dos fuentes de calor de temperaturas fijas. Esta máquina se conoce como la máquina de Carnot y la base de su funcionamiento se llama el ciclo de Carnot.

El ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico ideal reversible, entre dos fuentes de temperatura, en el cual el rendimiento es máximo.

La máquina de Carnot tiene un cilindro con un pistón y una biela que convierte el movimiento lineal del pistón en movimiento circular.

El cilindro contiene una cierta cantidad de un gas ideal y la máquina funciona intercambiando calor entre dos fuentes de temperaturas constantes $T_1 > T_2$. Las transferencias de calor entre las fuentes y el gas del cilindro se hacen isotérmicamente, es decir, manteniendo la temperatura constante lo cual hace que esa parte del proceso sea reversible.

El ciclo se completa con una expansión y una compresión adiabáticas, es decir, sin intercambio de calor, que son también procesos reversibles.

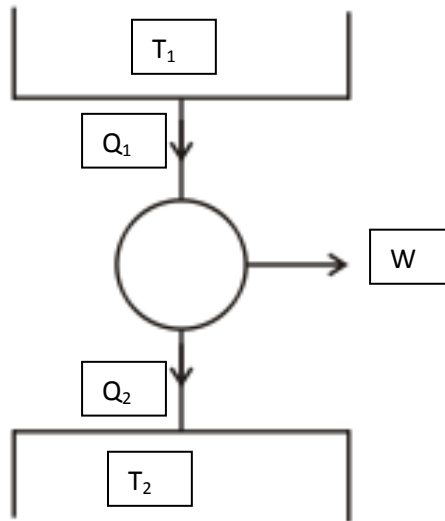


Figura J. Esquema del ciclo de Carnot.

El rendimiento viene definido, como en todo ciclo, por (1):

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \dots\dots\dots (1)$$

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo puede invertirse. Entonces la máquina absorbe calor de la fuente fría y cede calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría se denomina máquina frigorífica, y si es aportar calor a la fuente caliente bomba de calor.

El ciclo de Carnot consta de 4 procesos (ver Figura K):

- a) Expansión isotérmica (Proceso 1-2).
- b) Expansión adiabática (Proceso 2-3).
- c) Compresión isotérmica (Proceso 3-4).
- d) Compresión adiabática (Proceso 4-1).

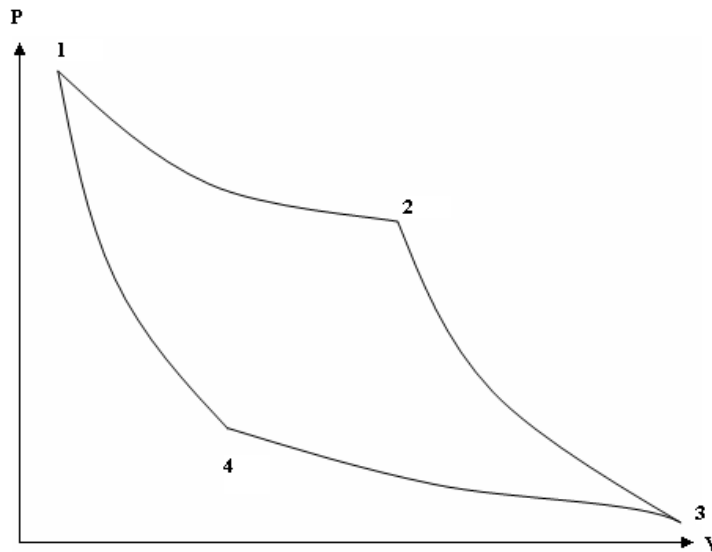


Figura K. Diagrama P-V del ciclo de Carnot.

Motores de combustión interna

El motor de combustión interna es un tipo de máquina térmica que transforma la energía química, producida por un combustible que se quema dentro de una cámara de combustión en energía mecánica.

Existe una gran variedad de motores de combustión interna, los cuales tienen distintos fines de uso.

Motor convencional del tipo Otto

El motor Otto es una máquina que transforma la energía química contenida en el combustible en energía mecánica utilizada para propulsar un émbolo que actúa sobre una biela, la cual mueve el cigüeñal. El funcionamiento del mismo es con base en explosiones que se producen en su interior por la expansión y compresión de los gases detonados por un salto de chispa.

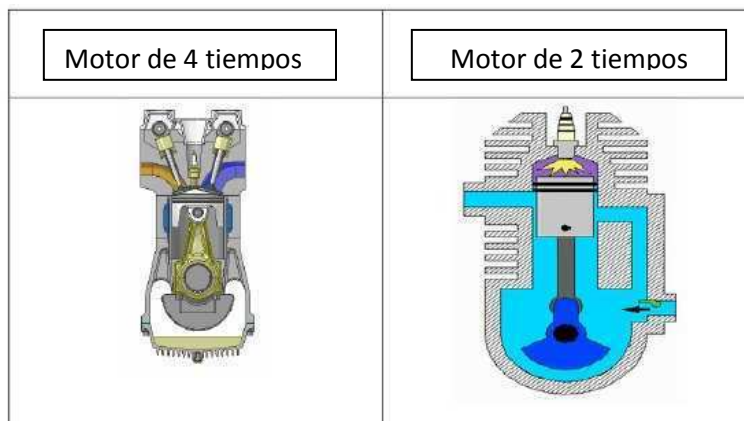


Figura L. Motor Otto.

Motor Diesel

Este motor es muy parecido al Otto solo tiene una variación respecto al otro y es la forma en que se lleva a cabo la explosión del combustible y el tipo de combustible utilizado. Generalmente este tipo de motores se utilizan para grandes torques con potencias altas.

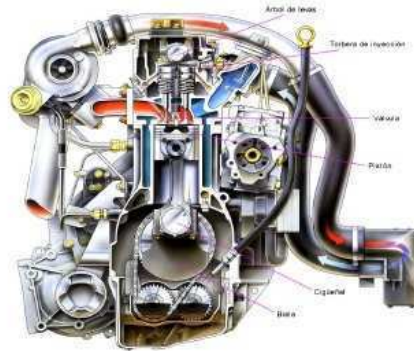


Figura M. Motor Diesel.

Motor Wankel

El motor Wankel fue diseñado para que la fuerza de la explosión se empleara íntegramente en mover el cigüeñal y para que utilizara menos partes móviles. Consta de una cavidad curva que es la cámara de combustión, dentro de ella se halla el pistón, que tiene forma de triángulo con los bordes cóncavos. La parte interior de dicho pistón tiene una circunferencia dentada que va unida a un engranaje del cigüeñal. Al ir girando el pistón en la cavidad, toma el combustible en un punto y lo comprime hasta llegar a un segundo punto en el que se produce la explosión siguiendo con el giro, llega al área de expulsión de gases al exterior, y a continuación vuelve a admitir combustible. Se puede considerar por tanto como un motor de explosión de cuatro tiempos.



Figura N. Motor Wankel.

El principio de funcionamiento de los motores de combustión interna es:

1.- Admisión: la válvula de entrada se abre. El pistón desciende por el cilindro dejando entrar una mezcla de combustible y aire previamente mezclada en el carburador y que se llama carga.

2.- Compresión: la válvula de entrada se cierra de un golpe, y el pistón sube comprimiendo la carga en un pequeño espacio, en la parte superior del cilindro.

3.- Combustión: La chispa emitida por la bujía incendia la carga a presión. Los gases en expansión empujan el pistón hacia abajo. El pistón mueve el cigüeñal.

4.- Escape: la válvula de salida se abre. Los gases, a gran temperatura salen expulsados empujados por el pistón. El ciclo empieza de nuevo.

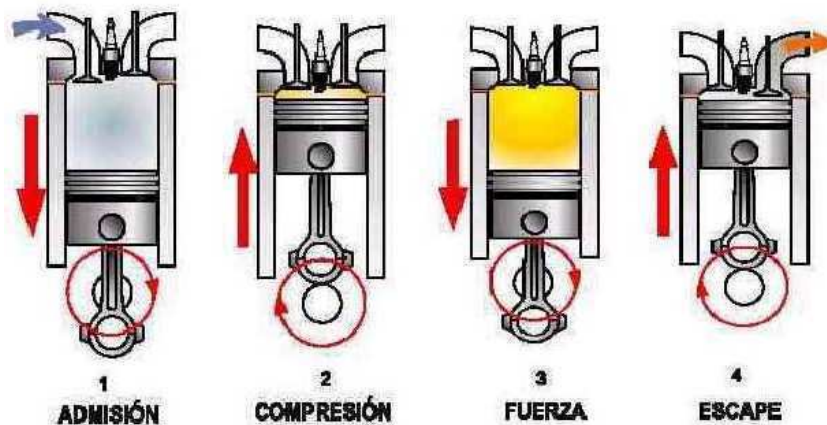


Figura O. Ciclo de un motor de combustión interna.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Capítulo I

Motor Stirling



1.1 Antecedentes históricos

El motor Stirling fue originalmente inventado en 1816 por el fraile escocés Sir Robert Stirling. En esta época existía un gran interés en diseñar un sustituto para los motores de vapor, ya que estos trabajaban con calderas a muy altas presiones que frecuentemente estallaban, esto sumados a que los materiales sufrían mucho desgaste por efecto de la corrosión causada por el agua.

Sus usos más frecuentes eran como fuente de potencia para pequeñas bombas de agua y aplicaciones en donde era requerida una potencia baja. Se volvió obsoleto con la aparición de los motores de combustión interna y eléctrica y fue rápidamente remplazado.

El motor Stirling era reconocido por su facilidad de operación, la sencillez de sus mecanismos, la capacidad de utilizar como combustible cualquier material que ardiera, su confiabilidad y su poco mantenimiento aunque era bastante pesado con respecto a la potencia generada y era muy costoso.

A pesar de todas sus ventajas, este tipo de motor no logró competir con los nuevos motores de combustión interna y eléctrica, que eran más económicos, livianos y potentes lo que tuvo como consecuencia una eventual desaparición en la escena comercial.

En la época de la segunda guerra mundial hubo grandes avances en la fabricación de aceros inoxidables así como una mayor comprensión del ciclo Stirling, lo que hizo que algunos científicos volvieran sus ojos a esta tecnología. El desempeño de los antiguos motores fue mejorado y su tamaño y costo disminuido con la ventaja de que conservó la capacidad de utilizar materiales diversos como combustible.

En la década de los 40's Phillips Electronics dedicó gran cantidad de recursos para el desarrollo de un generador de energía que fuera versátil, esto con el fin de abrir nuevos mercados para sus productos eléctricos en lugares donde no había acceso al fluido eléctrico. Este programa duró hasta la década de los 70's pero el único producto que se logró desarrollar comercialmente fue la máquina Stirling inversa que sirve para alcanzar temperaturas criogénicas y es utilizada para la licuefacción de gases.

La investigación en los motores Stirling fue direccionada hacia aplicaciones especiales tales como generación de potencia en el espacio, motores para autos y

hasta para corazones artificiales, pero fueron muy pocos los esfuerzos encaminados para desarrollar motores para aplicaciones sencillas y comunes.

Una de las empresas que más trabajó en el desarrollo de los motores Stirling fue Phillips que por largo tiempo trató de desarrollar motores con resultados bastante buenos.

En la década de los 80's la agencia americana para el desarrollo internacional (USAID) financió el desarrollo de un motor Stirling sencillo y económico para países en vía de desarrollo. El motor fue diseñado, construido, ensayado y llevado a Bangladesh y varias copias fueron puestas en operación lo que demostró que motores tan sencillos podrían ser elaborados en países del tercer mundo.

En la actualidad los motores Stirling no son comunes. Se les puede encontrar como medio de locomoción para submarinos, como plantas de energía en yates y una serie de aplicaciones muy complejas. Sin embargo siguen teniendo un gran potencial como medios de generación de energía en lugares apartados a donde no llegan los hidrocarburos o el fluido eléctrico.

En la actualidad el motor Stirling es objeto de muchas investigaciones debido al potencial que tiene para alcanzar altas eficiencias y a su operación silenciosa y limpia. Los niveles de desempeño de los motores Stirling actuales son bastante buenos gracias al desarrollo de nuevos materiales que soportan altas temperaturas y reducen el desgaste, la utilización de hidrógeno o helio a altas presiones como fluido de trabajo.

1.2 Clasificación de los motores Stirling

1.2.1 Motor tipo alfa

Diseñado por RIDER en Estados Unidos (ver Figura 1.1), consta de dos cilindros independientes conectados por un tubo en el que se sitúa el regenerador el que almacena y cede calor. En cada uno de los cilindros hay un pistón que se mueve 90° desfasado respecto al otro.

Uno de los cilindros se calienta mediante una fuente de calor y el otro se enfría mediante aletas o agua.

El desfase entre los dos pistones hace que el aire pase de un cilindro a otro calentándose o enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.

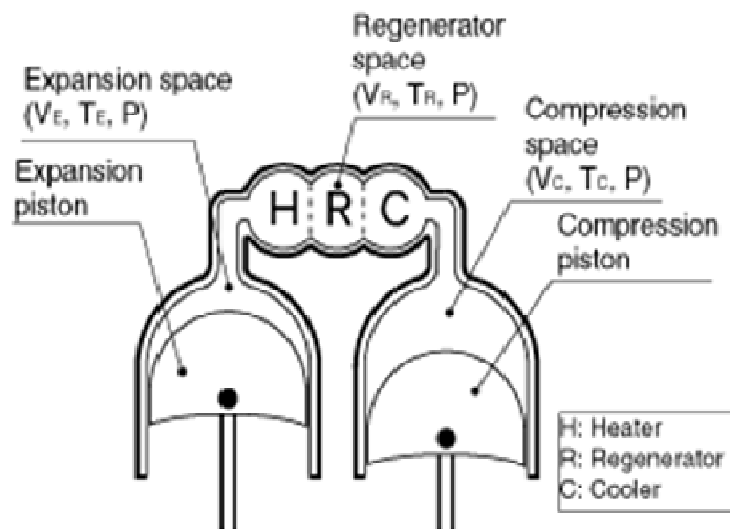


Figura 1.1 Motor Stirling tipo alfa.

1.2.2 Motor tipo beta

Motor original de Stirling (ver Figura 1.2), consta de un cilindro con una zona caliente y una zona fría, en el interior del cilindro está el pistón desplazador cuya misión es pasar el aire de la zona fría a la caliente o viceversa.

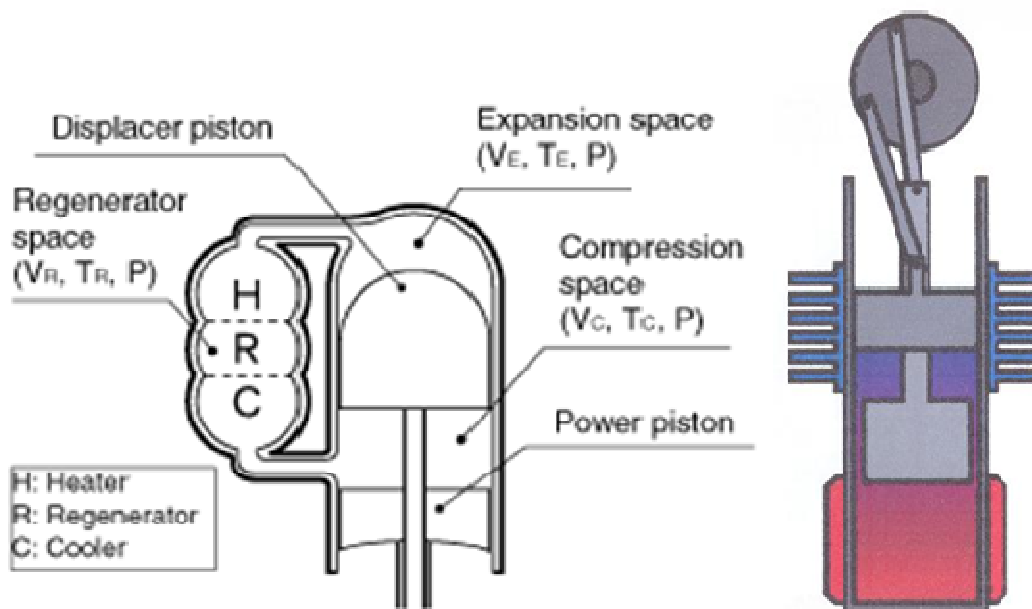


Figura 1.2 Motor Stirling tipo beta.

Los motores pequeños no suelen llevar regenerador únicamente una holgura de algunas décimas de milímetro entre el pistón desplazador y el cilindro para permitir el paso del aire.

El pistón de trabajo y el pistón desplazador están desfasados 90° y tienen dos bielas.

1.2.3 Motor tipo gamma

Derivado del beta, consta de dos cilindros separados en uno de los cuales está el desplazador y en el otro el pistón de potencia (ver Figura 1.3).

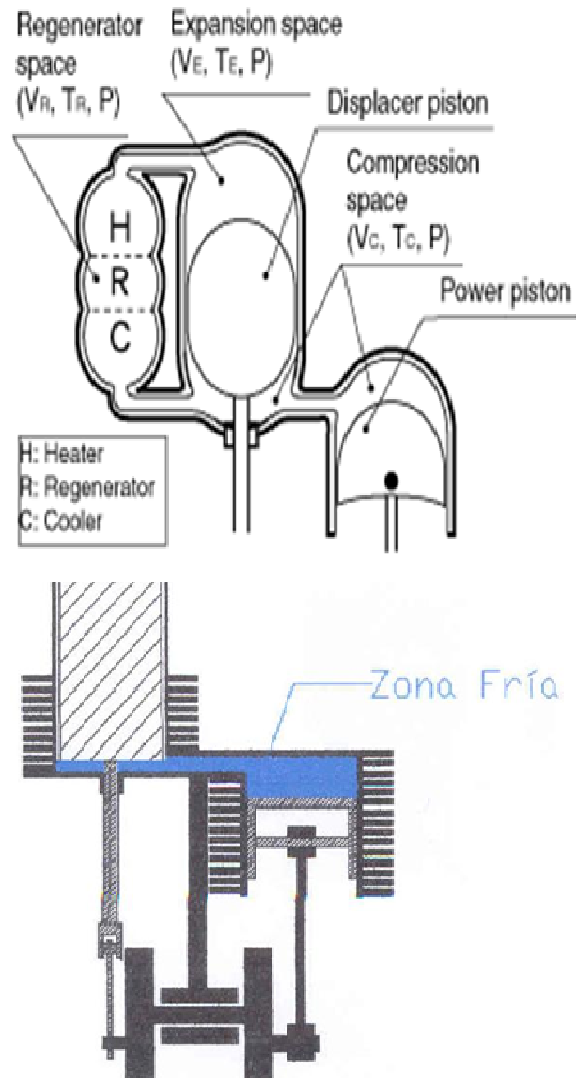


Figura 1.3 Motor Stirling tipo gamma.

A continuación se muestra una tabla comparativa de estos tres tipos de motores Stirling:

Tipo de Motor	Ventajas	Desventajas
Alfa	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen alta relación potencia-volumen. • Consta de mecanismos muy sencillos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es difícil de sellar las cámaras de expansión y compresión.
Beta	<ul style="list-style-type: none"> • En este se recrea el diseño original de Stirling. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizan mecanismos complejos y voluminosos.
Gamma	<ul style="list-style-type: none"> • Consta de mecanismos muy sencillos. • El sellado de las cámaras es sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen una relación de compresión baja.

TABLA 1: Ventajas y desventajas de Motores Stirling.

1.3 Ciclo Stirling

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

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

El ciclo se compone de cuatro procesos (ver Figura 1.4): dos procesos isométricos en las que el gas pasa a través del regenerador absorbiendo o cediendo calor y dos procesos isotérmicos en los que el gas está en contacto con un depósito de temperatura alta (T_H) o uno de temperatura fría (T_C).

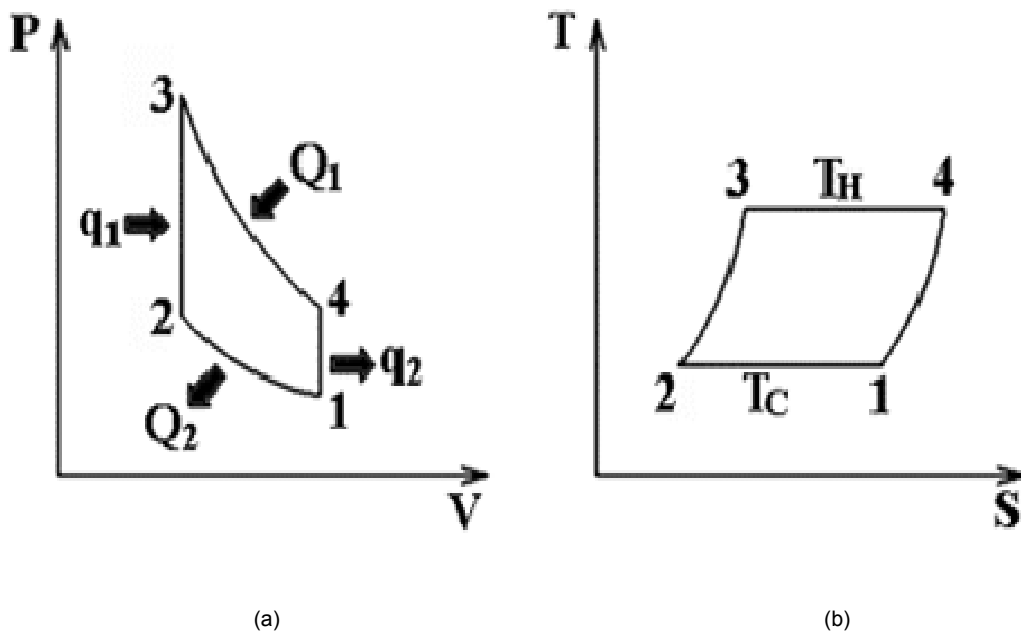


Figura 1.4 Diagramas P-V y T-S de un ciclo Stirling.

En el punto 1, el desplazador se encuentra en la zona caliente y el pistón de potencia se encuentra en el extremo del cilindro por lo que el volumen del gas es máximo. Este se encuentra en la zona fría y la presión es mínima (ver Figura 1.5a).

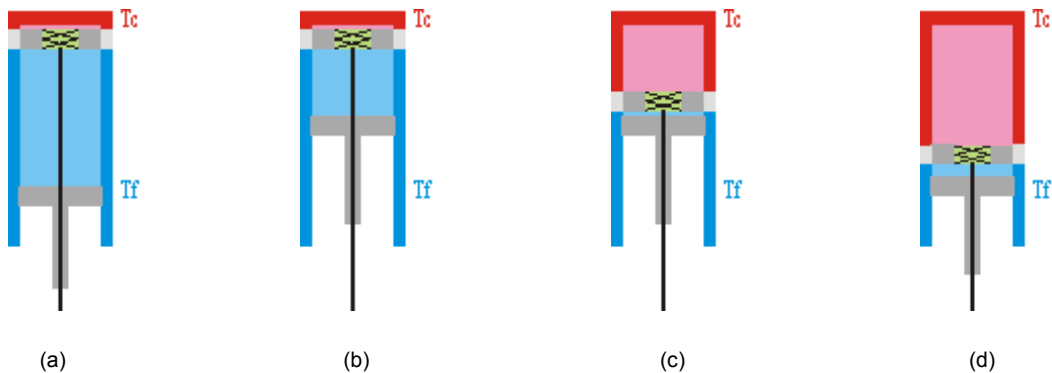


Figura 1.5

En el punto 2 el pistón se encuentra totalmente adelante, lo que hace que la presión aumente y el gas permanezca en la zona fría (ver Figura 1.5b).

En el punto 3 el pistón permanece en su lugar mientras el desplazador se mueve hacia la zona fría haciendo que el gas ocupe la zona caliente. Por lo tanto el volumen sigue siendo mínimo mientras que el gas está a temperatura alta y máxima presión (ver Figura 1.5c).

En el punto 4 el aire caliente a presión alta mueve el pistón hasta el final del recorrido. En este punto se tiene el volumen máximo y el gas ocupa la zona caliente para volver a iniciar el ciclo (ver figura 1.5d).

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

Ahora se describen los procesos (ver Figura 1.6):

1-2(A) Compresión isotérmica del gas a la temperatura inferior T_c , el proceso cede calor al exterior Q_2 a la fuente fría.

2-3(B) Absorción de calor a volumen constante, el gas absorbe del regenerador una cantidad de calor q_1 y aumenta su temperatura y por lo tanto su presión.

3-4(C) Expansión isotérmica del gas a temperatura alta, se absorbe calor Q_1 de la fuente caliente.

4-1(D) Cesión de calor al regenerador a volumen constante, disminuye la temperatura del gas y su presión.

El ciclo Stirling teórico trabajando con un gas ideal se aproxima al rendimiento que la de Carnot, que es el máximo rendimiento que puede tener un motor térmico.

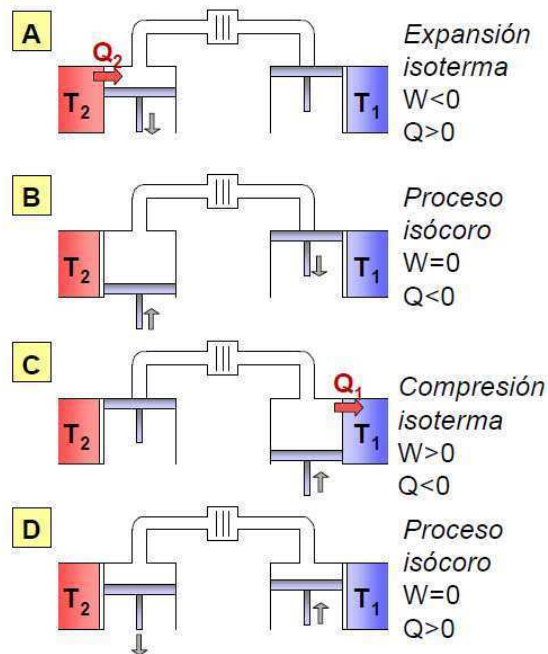


Figura 1.6

1.4 Ventajas y desventajas de motores Stirling

Para mostrar las ventajas y desventajas de utilizar un motor Stirling respecto de un motor de combustión interna en general, se muestra la siguiente tabla comparativa.

DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN MOTOR STIRLING

Motor Stirling	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Funciona con cualquier fuente de calor, no solo por combustión, por lo que se pueden utilizar fuentes de calor como solar, geotérmica, nucleares, biológicas, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los motores Stirling requieren intercambiadores de calor de entrada y salida, que tienen que contener el fluido de trabajo a alta temperatura, así como soportar los efectos corrosivos de la fuente de calor y la atmósfera. Esto supone un encarecimiento de la máquina
<ul style="list-style-type: none"> • Se puede usar un proceso de combustión continua, por lo cual se pueden reducir la mayor parte de las emisiones (NOx, hidrocarburos, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Los motores que funcionan con pequeños diferenciales térmicos son muy grandes en comparación con el trabajo realizado por culpa de los intercambiadores. Aumentar la diferencia de temperatura o la presión permite motores más pequeños.
<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de los motores Stirling tienen los mecanismos y juntas en zonas o lugares fríos, y por tanto necesitan menos lubricación y duran más que otras máquinas alternativas de combustión interna. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un motor Stirling no puede arrancar instantáneamente, tiene que primero "calentarse", a diferencia de otros motores como los motores de combustión interna.
<ul style="list-style-type: none"> • Una máquina Stirling usa un fluido de trabajo de una única fase, manteniendo las presiones internas cercanas a la presión de diseño y por tanto se reducen los riesgos de explosión. En contraste una máquina de vapor usa agua en fases líquidas y gaseosas, por lo que un fallo en una válvula puede provocar una explosión peligrosa. 	<ul style="list-style-type: none"> • El trabajo realizado por un motor Stirling tiende a ser constante y para ajustarlo se requiere un diseño cuidadoso y mecanismos adicionales. Generalmente se hace variando el desplazamiento del motor o la cantidad de fluido de trabajo.
<ul style="list-style-type: none"> • Los mecanismos son más sencillos que en otras máquinas alternativas de combustión interna, esto es, no necesitan válvulas, el quemador puede simplificarse. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Arrancan con facilidad y funcionan mejor con temperaturas ambientales frías, en contraste con los de combustión interna que arrancan con facilidad en temperatura templada. 	

TABLA 2: Ventajas y desventajas de motores Stirling vs motores de combustión interna.

1.5 Usos comunes del motor Stirling

1.5.1 Motor Stirling en el área automotriz

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

Ford, GM (General Motors Company), y American Motors Corp. (AMC) gastaron millones de dólares desarrollando motores Stirling para autos antes de los años 70. Ford también construyó un Stirling que puede arrancar (con una potencia relativamente baja) 20 segundos después de que le des la partida. Muchos prototipos fueron construidos y probados. Luego el precio del petróleo se vino abajo en los años 80 y la gente comenzó a comprar grandes autos, sin preocuparse por cierto de su rendimiento. A pesar de ello no hay aparentemente una buena razón para construir un motor que sea sustancialmente más eficiente que el motor de combustión interna, pero que no parta instantáneamente.

Un automóvil AMC Spirit del año 1979 el cual estaba equipado con un motor Stirling experimental de planta llamado el "P-40" (ver Figura 1.7). Este auto era capaz de quemar bencina, petróleo o un tipo de gas. Este motor Stirling P-40 prometía una baja polución, una mejoría del 30% en rendimiento, y un igual desempeño que el motor estándar de combustión interna.

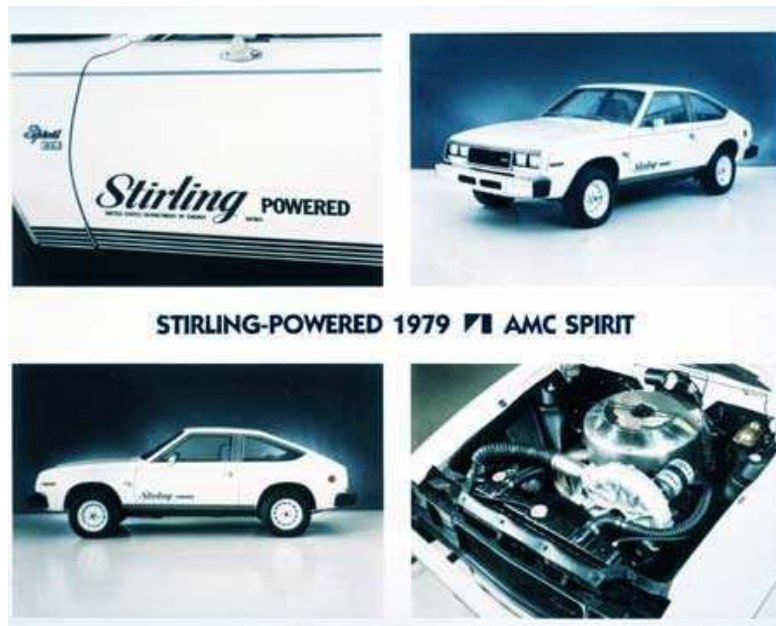


Figura 1.7 Automóvil AMC Spirit.

El motor Stirling desarrollado por GM (General Motors Company) usa hidrógeno como fluido de trabajo y tiene varias particularidades; la principal es un disco rotatorio montado en ángulo y unido al pistón (swash plate) que reemplaza a la tradicional biela (ver Figura 1.8).



Figura 1.8 Motor Stirling desarrollado por GM.

Actualmente, la NASA ha retomado estos intentos de tratar de utilizar el motor Stirling, y hace investigaciones de prototipos para vehículos que puedan ser utilizados por ellos.

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

1.5.2 Motor Stirling en la industria naval

Kockums (ver Figura 1.9) es un astillero suizo que ha fabricado por lo menos 10 submarinos para la armada de ese país cuyo medio de locomoción es el motor Stirling.

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

Wishper Tec. Es una compañía que se especializa en diseñar motores Stirling para la generación de energía eléctrica. Esta empresa fabrica generadores eléctricos para yates donde la operación silenciosa es indispensable para el confort de los tripulantes.



Figura 1.9 Aplicación del motor Stirling en la industria naval.

1.5.3 Motores Stirling y la energía solar

En agosto de 2006 comenzó la construcción de una planta comercial de 1 MW con 40 discos-Stirling en Mojave, y continuará hasta alcanzar los 500 MW en 2009, en una extensión de 1821 hectáreas. El contrato de venta de energía eléctrica con Edison Internacional es de 20 años, con una opción de proyecto de alcanzar los 850 MW.

Alan Fohrer, de Edison Internacional, se ha mostrado entusiasmado en participar en la mayor planta termosolar del mundo, y además sin subvención estatal.

Otro proyecto que refuerza el tándem disco-Stirling es el de San Diego, SES Solar Two, de 300 MW, que venderá la energía a San Diego Gas & Electric con contrato de 20 años. En el contrato también hay una opción para una fase futura de 600 MW.

Se trata de 777 hectáreas de desierto con 12000 discos-Stirling, en el Imperial Valley del sur de California.

La revista Modern Power Systems, el 16 de febrero pasado dice a propósito de estas plantas con disco-Stirling:

“Fuera de EE.UU. las ventas potenciales se concentran en España, en la costa mediterránea, y en Australia, en donde las subvenciones hacen más fácil la

introducción del disco-Stirling (ver Figura 1.10). En España los incentivos son de 0.2 dólares por kWh. En África es posible un contrato con South Africa's Eskom, donde hay un disco-Stirling en Johannesburg”.

Después de 26000 horas de funcionamiento, como planta piloto y dos décadas de desarrollo tecnológico, ahora pasamos a la operación comercial, con poca competencia por parte de la industria fotovoltaica.



Figura 1.10 Motor Stirling y energía solar.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Capítulo II

Teoría de Schmidt para motor Stirling



2.1 Concepto de la teoría de Schmidt

La teoría de Schmidt es uno de los métodos de cálculo isotérmico para los motores Stirling. Es el método más simple y muy útil para el análisis del motor Stirling.

Esta teoría se basa en la expansión isotérmica y la compresión de un gas ideal.

Para el uso de esta teoría se hacen las siguientes consideraciones: el desempeño del motor puede ser dibujado en un diagrama P-V. El volumen del motor es calculado usando la geometría interna y el ángulo en el que se encuentra el cigüeñal. Cuando se establece en un estado termodinámico el volumen interno, la temperatura y la masa del fluido de trabajo, la presión en ese estado puede ser calculada usando la ecuación del gas ideal.

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

- a) No hay pérdida de presión en los conductos internos del motor y no hay diferencias de presión interna para un instante y tiempo determinado.
- b) El proceso de expansión y el proceso de compresión son isotérmicos.
- c) Las condiciones de trabajo del gas analizan como un gas ideal.
- d) Existe una regeneración perfecta.
- e) El volumen del espacio muerto de la zona de temperatura alta se mantiene a la temperatura del gas de expansión T_H , el volumen del espacio muerto se mantiene a la temperatura de compresión del gas T_L , durante el ciclo.
- f) La temperatura de los gases del regenerador es un promedio de la temperatura del gas de expansión T_H y la temperatura de los gases de compresión T_L .
- g) El espacio de expansión V_E y el espacio de compresión V_C cambian en función de una curva sinusoidal.

En la tabla 3 se muestra la simbología utilizada para las relaciones que se dan en esta teoría de Schmidt.

Nombre	Símbolo	Unidades
Presión del gas en el motor	p	Pa
Volumen desplazado por el pistón de expansión	V_{DE}	m^3
Volumen desplazado por el pistón de compresión	V_{DC}	m^3
Volumen muerto en la zona de expansión	V_{ME}	m^3
Volumen muerto en la zona de compresión	V_{MC}	m^3
Volumen del regenerador	V_R	m^3
Volumen total de la zona temperatura alta	V_E	m^3
Volumen total de la zona temperatura baja	V_C	m^3
Volumen total	V	m^3
Volumen de espacio muerto	V_M	m^3
Masa del fluido de trabajo	m	kg
Constante del gas	R	J/kgK
Temperatura de la zona temperatura alta	T_E	K
Temperatura de la zona temperatura baja	T_C	K
Temperatura del regenerador	T_R	K
Ángulo de fase	dx	grados
Ángulo de variación de volumen	α	grados
Ángulo de cigüeñal	x	grados
Relación de temperaturas	τ	Sin
Relación de volúmenes desplazados	v	Sin
Relación de volúmenes muertos	X	Sin
Reducción de volumen muerto	S	Sin
Velocidad del motor	n	RPM
Trabajo de expansión	W_e	J
Trabajo de compresión	W_c	J
Trabajo total	W_i	J
Potencia de expansión	Le	W
Potencia de compresión	Lc	W
Potencia del ciclo	Li	W
Eficiencia	E	Sin

Tabla 3. Simbología de la teoría de Schmidt.

El volumen total, es el volumen en cada parte del ciclo, y está determinado por el ángulo x ($x=0$ cuando el pistón de expansión se encuentra en la parte más alta del recorrido).

El volumen total en la zona caliente V_E es determinado por las ecuación (1) y depende de V_{DE} y V_{ME} así como del ángulo x .

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

El volumen total en la zona fría está determinado por la ecuación (2):

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

El volumen total está definido por:

$$V = V_E + V_C + V_R \dots \dots \dots (3)$$

El volumen del espacio muerto está determinado por la ecuación (4):

$$V_M = KV_{DE} \dots \dots \dots (4)$$

Tomando en cuenta las consideraciones descritas en la página 38 a), b) y c), la masa total al interior del motor "m" es calculada usando la presión del motor p y las temperaturas en las diferentes zonas, por tanto:

la masa del fluido de trabajo en el espacio de expansión está dada por:

$$M_E = \frac{P_E V_E}{RT_E} \dots \dots \dots (5)$$

La masa del fluido de trabajo en el espacio de compresión está dada por:

$$M_C = \frac{p_C V_C}{RT_C} \dots \dots \dots (6)$$

La masa del fluido de trabajo en el espacio muerto está dada por:

$$M_M = \frac{p_M V_M}{RT_M} \dots \dots \dots (7)$$

Como la masa total del fluido de trabajo permanece constante se tiene:

$$m = \frac{p_E V_E}{RT_E} + \frac{p_C V_C}{RT_C} + \frac{p_M V_M}{RT_M} = \frac{KV_{DE}}{2RT_C} \dots \dots \dots (8)$$

Si T_E y T_C son constantes, entonces sustituyendo para los volúmenes las ecuaciones (1) y (2), eliminando R, al reagrupar se tiene:

$$\frac{KV_{DE}}{2mRT_C} = \frac{T_C}{T_E} (1 + \cos x) + \frac{V_{DC}}{V_{DE}} [1 + \cos(x - dx)] + \frac{2V_M T_C}{V_E T_M} \dots \dots \dots (9)$$

Si la variación de temperatura en el espacio muerto es lineal en la dirección axial, entonces:

$$T_M = T_C + \frac{1}{2}(T_E - T_C) = \left(1 + \frac{T_E}{T_C}\right) \left(\frac{T_C}{2}\right) \dots \dots \dots (10)$$

Las relaciones de temperaturas, de volúmenes desplazados y de volúmenes muertos está dado por:

$$\tau = \frac{T_C}{T_E} \dots \dots \dots (11)$$

$$v = \frac{V_{DC}}{V_{DE}} \dots \dots \dots (12)$$

$$X = \frac{V_M}{V_{DE}} \dots \dots \dots (13)$$

Al combinar las ecuaciones (10) a (13) obtenemos que la masa de aire es:

$$m = \frac{KV_{DE}}{2RT_c \left[(\tau^2 + 2\tau v \cos dx + v^2)^{1/2} \cos(x - \alpha) + \tau + v + 2S \right]} \dots \dots \dots (14)$$

Como p es la presión instantánea del gas en el motor y está dada por:

$$p = \frac{2mRT_c}{V_{DE}} \dots \dots \dots (15)$$

Por tanto:

$$p = \frac{K}{\{B[1 + \delta \cos(x - \alpha)]\}} \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

$$\alpha = \text{ang tan} \frac{v \text{ sen } dx}{\tau + v \cos dx} \dots \dots \dots (17)$$

$$A = (\tau^2 + 2\tau v \cos dx + v^2)^{1/2} \dots \dots \dots (18)$$

$$B = \tau + v + 2S \dots \dots \dots (19)$$

$$\delta = \frac{A}{B} \dots \dots \dots (20)$$

Donde S es la reducción de volumen muerto: $S = \frac{2V\tau}{\tau+1}$

La presión instantánea p es:

- a) Mínima, cuando $x = \alpha$, es decir, $x - \alpha = 0$.
- b) Máxima, cuando $x = (\alpha + \pi)$, es decir, $x - \alpha = \pi$.

Por lo tanto: $p_{\min} = \frac{K}{[B(1+\delta)]}$ y $p_{\max} = \frac{K}{[B(1-\delta)]}$

Por lo tanto:

$$p = \frac{p_{\max}(1 - \delta)}{[1 + \delta \cos(x - \alpha)]} \dots \dots \dots (21a)$$

$$p = \frac{p_{\min}(1 + \delta)}{[1 + \delta \cos(x - \alpha)]} \dots \dots \dots (21b)$$

La presión media es un valor que equivale a la presión promedio que hay en el interior del motor durante todo el ciclo. Esta presión media está dada por:

$$p_{media} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d(x - \alpha) \dots \dots \dots (22)$$

Resolviendo, se tiene:

$$p_{media} = p_{m\acute{a}x} \left(\frac{1 - \delta}{1 + \delta} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (23)$$

2.2 Trabajo y calor transferido por ciclo

Como el proceso de expansión y compresión se llevan a cabo isotérmicamente, el calor transferido Q es igual al trabajo, por lo tanto:

$$Q = W = \int p dV \dots \dots \dots (24)$$

Si $V = \frac{1}{2} V_{DE} (1 + \cos x)$,

$$dV = -\frac{1}{2}V_{DE} \operatorname{sen} x dx$$

Y como:

$$p = p_{media} [1 - \Delta \cos(x - \alpha)]$$

Donde:

$$\Delta = \frac{2\delta}{1 + (1 - \delta^2)^{1/2}}$$

Entonces:

$$W = \frac{1}{2} \pi p_{media} V_{DE} \Delta \operatorname{sen} \alpha \dots \dots \dots (25)$$

2.3 Eficiencia

La eficiencia η es la fracción de energía en forma de calor suministrado que fue capaz de convertirse en trabajo mecánico útil.

Por tanto:

$$\eta = \frac{W}{Q_{sum}} \dots \dots \dots (27)$$

Donde:

$W \equiv$ Trabajo mecánico útil.

$Q_{sum} \equiv$ Calor suministrado.

Se sabe por la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado:

$$Q_{sum} = W + Q_{rech}$$

Por tanto:

$$\eta = \frac{Q_{sum} - Q_{rech}}{Q_{sum}}$$

Considerando que el fluido de trabajo (gas) se comporta como gas ideal, y al analizar la figura 2.4a, el rendimiento térmico será:

$$\eta = \frac{Q_1 + q_1 - Q_2 - q_2}{Q_1 + q_1}$$

2.4 Número de Beale

William Beale observó hace varios años que la potencia de salida de muchos motores Stirling se obtenía aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$\dot{W} = 0.015 p_{media} f V_{DE} \dots \dots \dots (28)$$

Donde:

\dot{W} = potencia del motor (watts)

p = presión media del ciclo (bar)

f = frecuencia del ciclo o velocidad del motor (hertz)

V_{DE} = volumen desplazado del pistón de expansión (cm³)

La ecuación fue encontrada por Beale y es válida para todo tipo y tamaño de motores Stirling, la combinación $\frac{P}{P_{media} f V_{DE}}$ es un grupo adimensional que es

llamado número de Beale. Los valores de este número de Beale varían de 0.015 a 0.03, dependiendo el tamaño del motor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Capítulo III

Proceso de diseño



3.1 Especificaciones para el motor Stirling

Tomando en cuenta que el motor será diseñado para entregar una potencia de 25 watts, se determinaron las condiciones de operación tales como las temperaturas en las zonas fría y caliente, la presión media interna y la velocidad angular. La geometría será el resultado del análisis termodinámico.

Para determinar la temperatura a la cual se va a calentar el motor se tomará en cuenta lo siguiente:

- a) La resistencia del material con el cual se va a manufacturar.
- b) El dispositivo con el cual se va a calentar.
- c) El punto de fusión del material a utilizar.

Se utilizó hierro galvanizado para la fabricación de los cilindros del motor debido a las propiedades térmicas y resistivas a los esfuerzos que posee este material y que favorece para la utilización que este tendrá.

La administración de energía en forma de calor se llevará a cabo por medio de una lata de gas de butano, esta nos entrega una temperatura aproximada de 500°C a 700°C (esta será utilizada para la zona de temperatura alta) y para el caso de la zona de temperatura baja se mantendrá refrigerada con el aire exterior (ambiente) que es aproximadamente 25°C, lo que nos permite decir que se

trabaja con una temperatura de 50°C. Debido a las temperaturas en la zona caliente que se utilizarán, se decidió usar hierro galvanizado.

Para manufacturar las demás partes del motor se decidió utilizar aluminio por su fácil manipulación en la manufactura de las pequeñas piezas.

El motor se diseñó teniendo en cuenta una presión de carga, como la presión atmosférica de la ciudad de México que está alrededor de los 78 kPa.

La velocidad del motor depende en gran medida de la capacidad que se tenga para calentar pero también está limitado por la velocidad de transferencia de calor que se da entre la fuente de calor y el interior de la zona caliente y de la zona fría al exterior. Por tanto considerando otros motores comerciales y para un motor al cual no se le hizo énfasis en intercambiadores de calor se optó por diseñar el motor con bajas revoluciones, una cantidad aceptable fue de 650 RPM.

Por tanto, tomando en cuenta lo anterior:

Especificación	Cantidad
Potencia	25W
Temperatura de la zona caliente	500°C
Temperatura de la zona fría	50°C
Velocidad del motor	650 RPM
Presión de carga	78kPa

Tabla 4. Especificaciones de motor Stirling.

3.2 Definición de tipo de motor Stirling

La definición de motor a realizar se decidió por las ventajas y desventajas que muestran cada uno de los tipos de motor (alfa, beta y gamma).

El prototipo realizado se definió como un motor Stirling tipo alfa, debido a que la fabricación de las piezas tienen un grado de dificultad menor comparada con los otros dos tipos de motor, además de que el sellado de los cilindros es mucho más sencillo.

Este tipo de motor seleccionado tiene la facilidad de utilizar o no un regenerador, esto facilita aún más su fabricación y se evita que pueda tener alguna fuga por la implementación del regenerador.

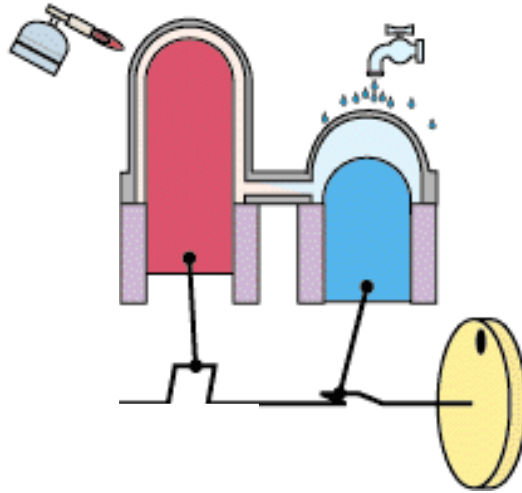


Figura 3.1 Motor Stirling alfa.

3.3 Análisis termodinámico

Para empezar, el problema que surgió fue que la presión media es el resultado del análisis de volúmenes del gas dentro del motor y de las temperaturas. Es decir, que el motor debería estar ya diseñado para poder determinar esta variable.

La presión media del motor está definida en la ecuación (23). Analizando cada término de la ecuación se concluye que:

Si se conserva una relación de volúmenes V_{DE}/V_{DC} el resultado de V_{DE}/m será igual para una presión de carga constante. T_C es un parámetro de entrada y siempre será igual (50°C). R es una constante del gas. B (ecuación 13) depende de la relación de temperaturas τ que es una constante y de v que es la relación de volúmenes. S depende de τ que es la relación de temperaturas y esta permanece constante, también depende de X_{DE} y de X_{DC} .

La solución al problema de la presión media fue hacer que todas las relaciones se mantuvieran constantes. V_{DE} sería igual a V_{DC} con lo que se garantiza que la relación v sería constante. Los volúmenes muertos V_{ME} y V_{MC} serían cada uno el 10% del volumen V_{DE} .

Con este análisis se pueden obtener los valores de las ecuaciones (17) hasta (20). Otro punto importante a considerar es el ángulo de variación entre el pistón de expansión y de compresión (ángulo de fase ϕ), por tanto, se definió con un ángulo de 120° . Con todo lo anterior se pudo calcular una presión media de 226.6 [kPa], con una masa de aire de 0.0000285 [kg] (obtenida a partir de la ecuación 15).

Así con el análisis anterior y con las especificaciones antes mencionadas se puede obtener el volumen desplazado en el pistón de potencia, esto con la ecuación del número de Beale (ecuación 28).

Por tanto se tiene un V_{DE} igual a 67.89 [cm³], lo que nos lleva a que:

$$V_{DE} = A_{DE} * L \dots \dots \dots (29)$$

Donde: L es la carrera del pistón y por diseño la carrera del pistón será la mitad de la longitud del diámetro del pistón, por lo tanto se tendrá:

$$V_{DE} = \frac{\pi}{8} D^3 \dots \dots \dots (30)$$

Aplicando la ecuación (30), se obtiene un diámetro de 5.57 [cm] con una carrera (L) de 2.79 [cm].

Por lo que $V_{ME} = V_{MC} = 6.79$ [cm³].

Después de haber obtenido el volumen (el motor dimensionado) se realizó la gráfica presión contra volumen (P-V), estas variables se obtuvieron a partir de las ecuaciones (1) a (3) y (16), de esto resultó:

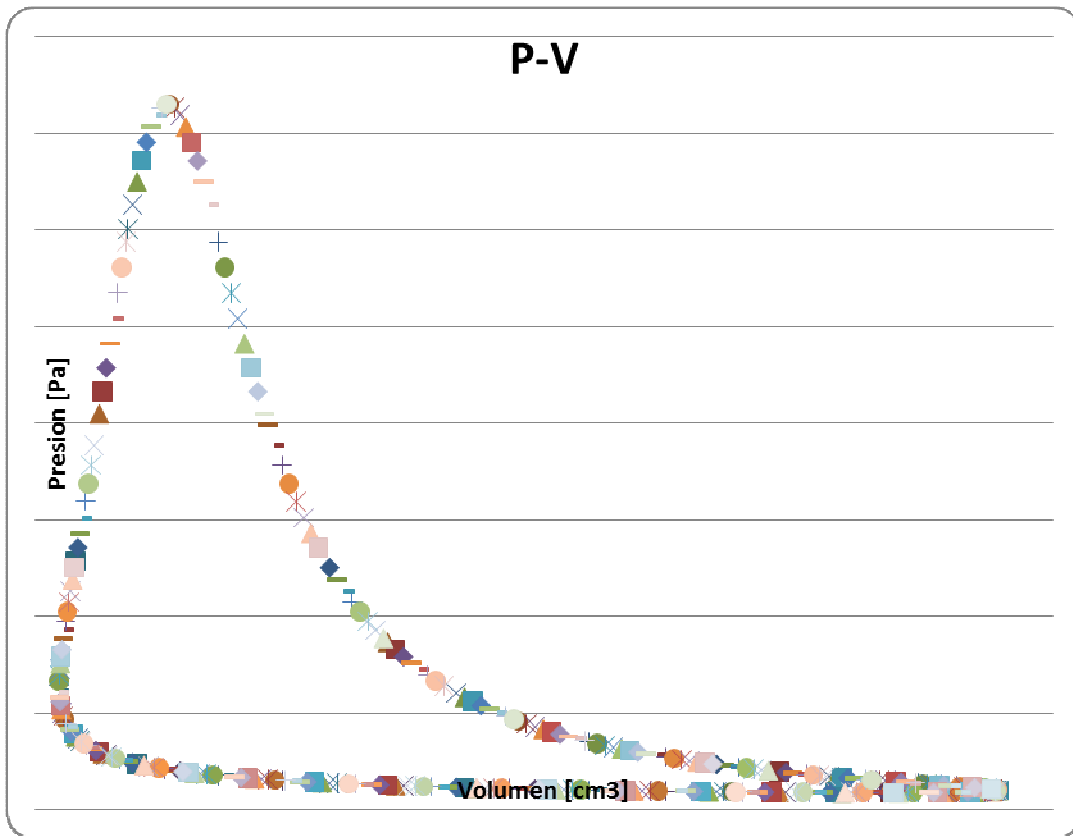


Figura 3.2 Gráfica P-V de motor Stirling.

3.4 Diseño de piezas de un motor Stirling

El diseño de piezas se inicia a partir del análisis termodinámico, con los resultados obtenidos en el apartado anterior. Para la construcción de los cilindros se consideraron unos tubos de hierro galvanizado de 2 pulgadas de diámetro (5.08 cm), por lo tanto al reducir el diámetro del pistón se aumenta la carrera del mismo, de la ecuación (29) se obtiene que se requiere una carrera de 3.4 cm.

A partir de lo anterior, se diseñaron los pistones y los cilindros, la paquetería utilizada es el Solid Edge, en la figura 3.3 y 3.4 se muestran los pistones.

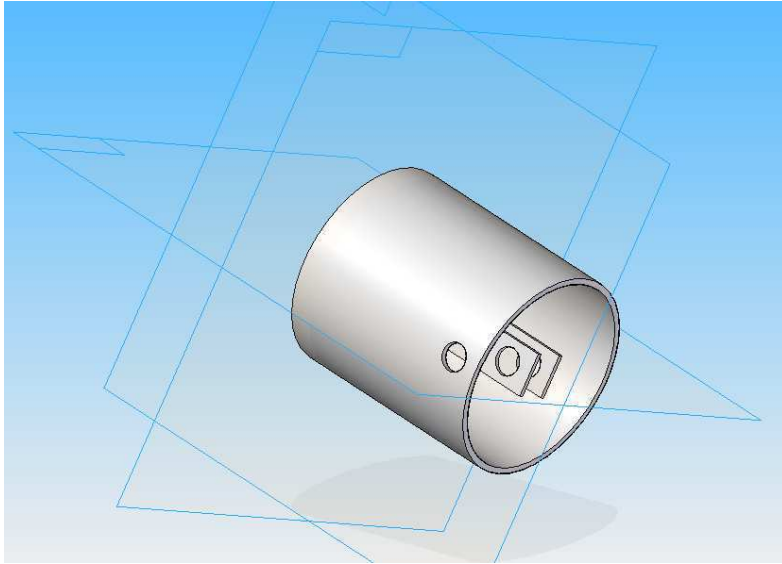


Figura 3.3 Pistón zona caliente.



Figura 3.4 Pistón zona fría.

El pistón de la zona caliente tiene una longitud mayor, la razón de este cambio es para que se tenga un área más grande de transferencia de calor que beneficie el trabajo del motor.

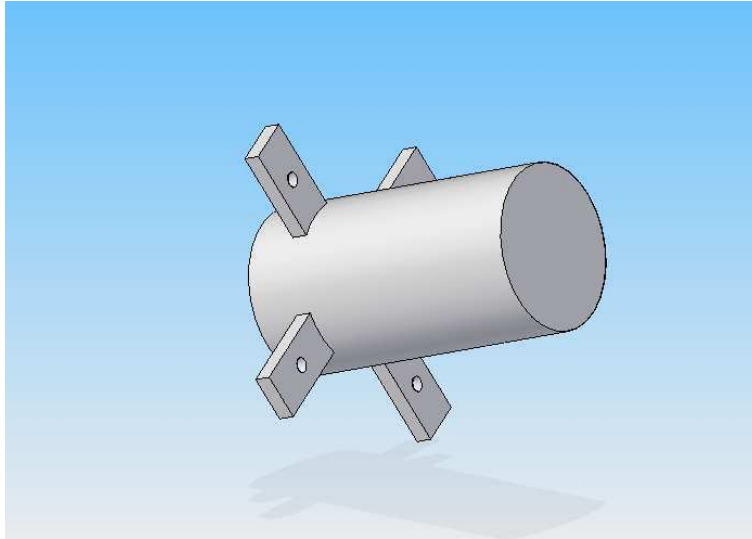


Figura 3.5 Cilindro zona caliente.

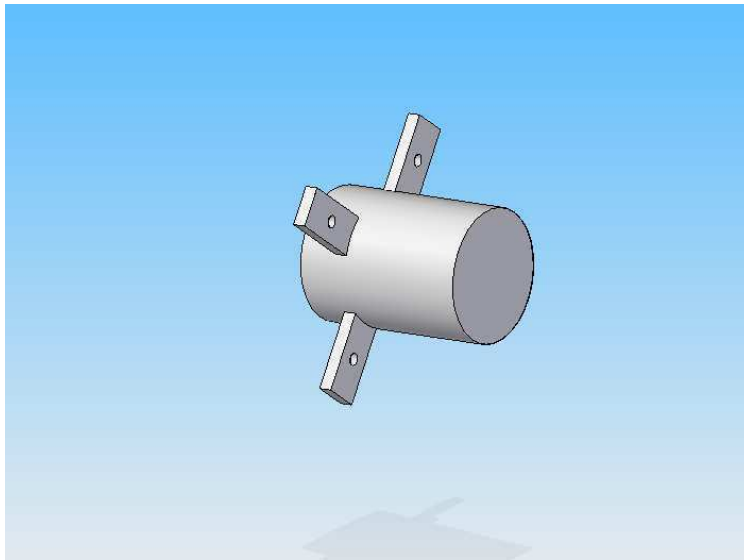


Figura 3.6 Cilindro zona fría.

El diseño de los cilindros es de esta manera debido a la base en la que están montados (ver figura 3.7) y para el caso de la zona caliente sirven de pequeñas aletas para mayor área de transferencia de calor.

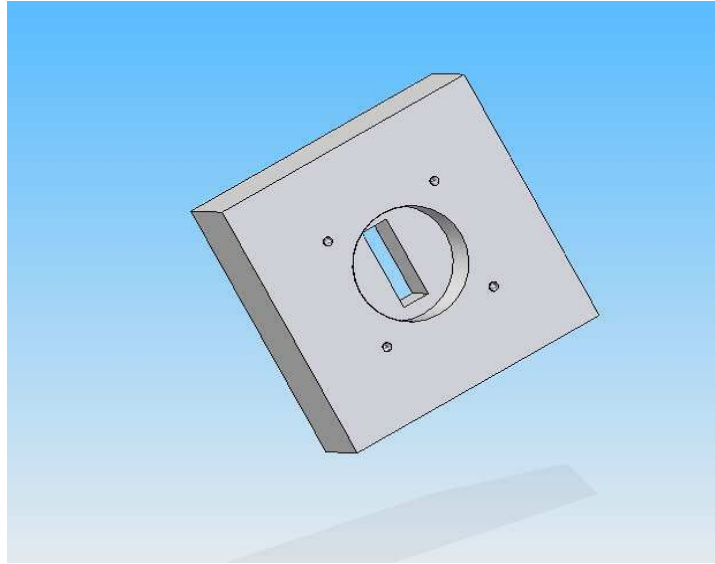


Figura 3.7 Base de cilindros.

Se optó por este diseño para tener menores fugas de aire en los cilindros.

Para el diseño del cigüeñal se definió la posición de ambos pistones la cual se eligió anteriormente por un ángulo de fase de 120° entre pistones, para las bielas se seleccionaron de un tamaño pequeño para no tener momentos de inercia grandes, en la figura 3.8 se muestra el diseño de las bielas.

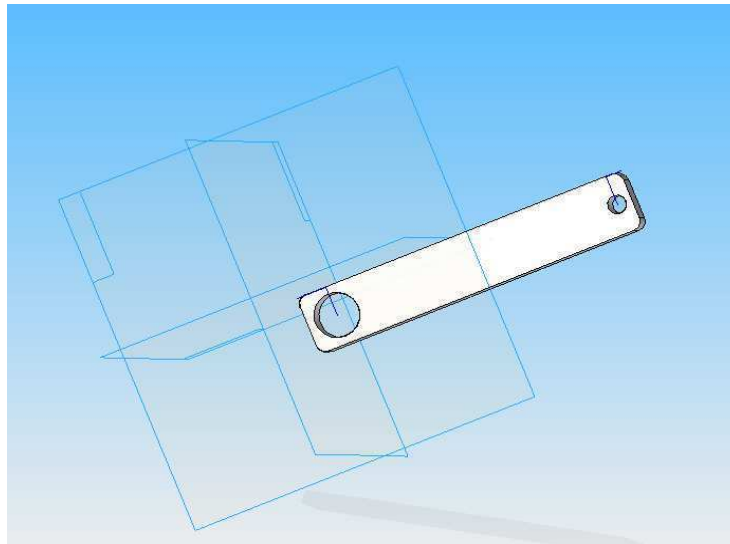


Figura 3.8 Biela.

El ensamble del motor Stirling que se definió se muestra en la figura 3.9.

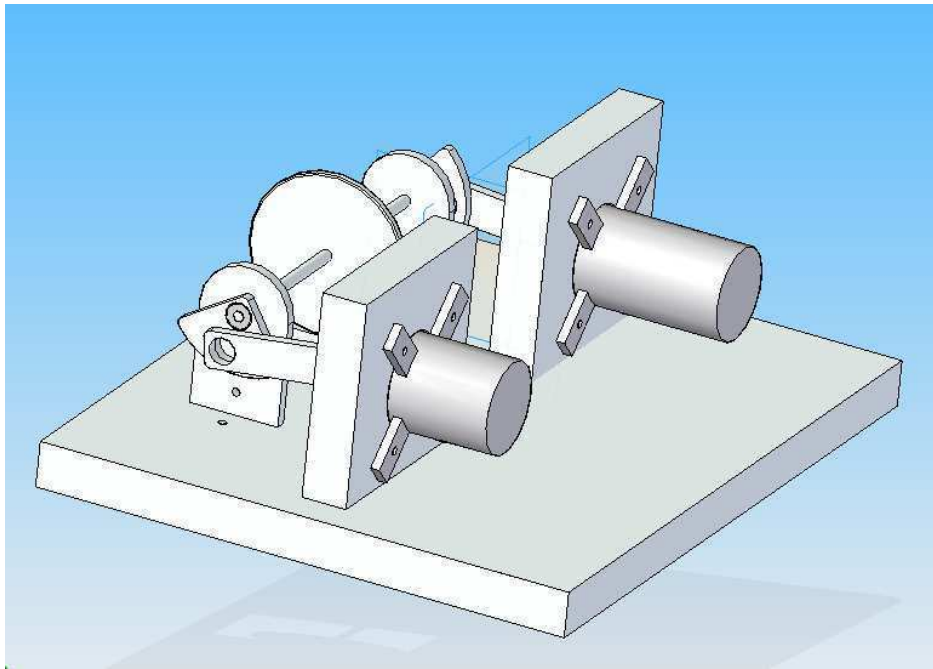


Figura 3.9 Motor Stirling.

El material a utilizar para la construcción del prototipo de motor Stirling se definió por la fácil manipulación del material y procesamiento del mismo, el material utilizado fue aluminio; con excepción de los cilindros y pistones, en lo que se decidió utilizar hierro galvanizado.

En los anexos se detallan todas las piezas para el diseño de este motor Stirling por medio de planos.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Conclusiones



Conclusiones

Los objetivos propuestos en un principio se lograron con el diseño y la construcción de un prototipo de motor Stirling.

Durante la investigación y desarrollo de nuestro trabajo, nos encontramos con diferentes temas y cuestiones que son interesantes para nuestro crecimiento tanto profesional como personal, el cual tiene que ver con la ingeniería mecánica; desde la termodinámica básica, mecánica clásica hasta la manufactura de piezas.

Al realizar cada uno de los capítulos se presentaron muchas dudas, preguntas que se empezaron a contestar con una investigación; utilizamos todas las herramientas posibles que teníamos en nuestras manos desde apuntes, libros, la Internet, para poder concluir nuestro trabajo y así mismo poder llegar a nuestro objetivo final de diseñar y construir un prototipo de motor Stirling que pueda ser útil para mejorar el diseño y ampliar su utilización para la generación alternativa de energía eléctrica.

El resultado de este prototipo fue en principio gracias al análisis termodinámico que se realizó a partir de la teoría de Schmidt, que es la base para el diseño de motores Stirling más completo y detallado.

Se pueden hacer mejoras en el motor diseñado, como la adecuación para que la fuente de calor sea por medio solar, aumentar la potencia del mismo modificando carrera de pistones o revoluciones diferentes a las que se utilizaron en este prototipo.

Al finalizar nuestro proyecto nos dimos cuenta que tenemos muchas bases del cómo y del porqué de la importancia de nuevas fuentes alternativas de generación de energía eléctrica, teniendo en cuenta nuestros conocimientos adquiridos durante nuestro desarrollo académico y profesional.

Bibliografía

- “William R. Martini”. Stirling Engine Design Manual. National Aeronautics and Space Administration. USA. 1978.
- “Termodinámica”, Kenneth Wark and D. E. Richards; 6ª. Ed., Mc Graw-Hill, 2001.
- “Termodinámica”, Yunus Cengel and M. Boles; 4ª. Ed., Mc Graw-Hill, 2002.

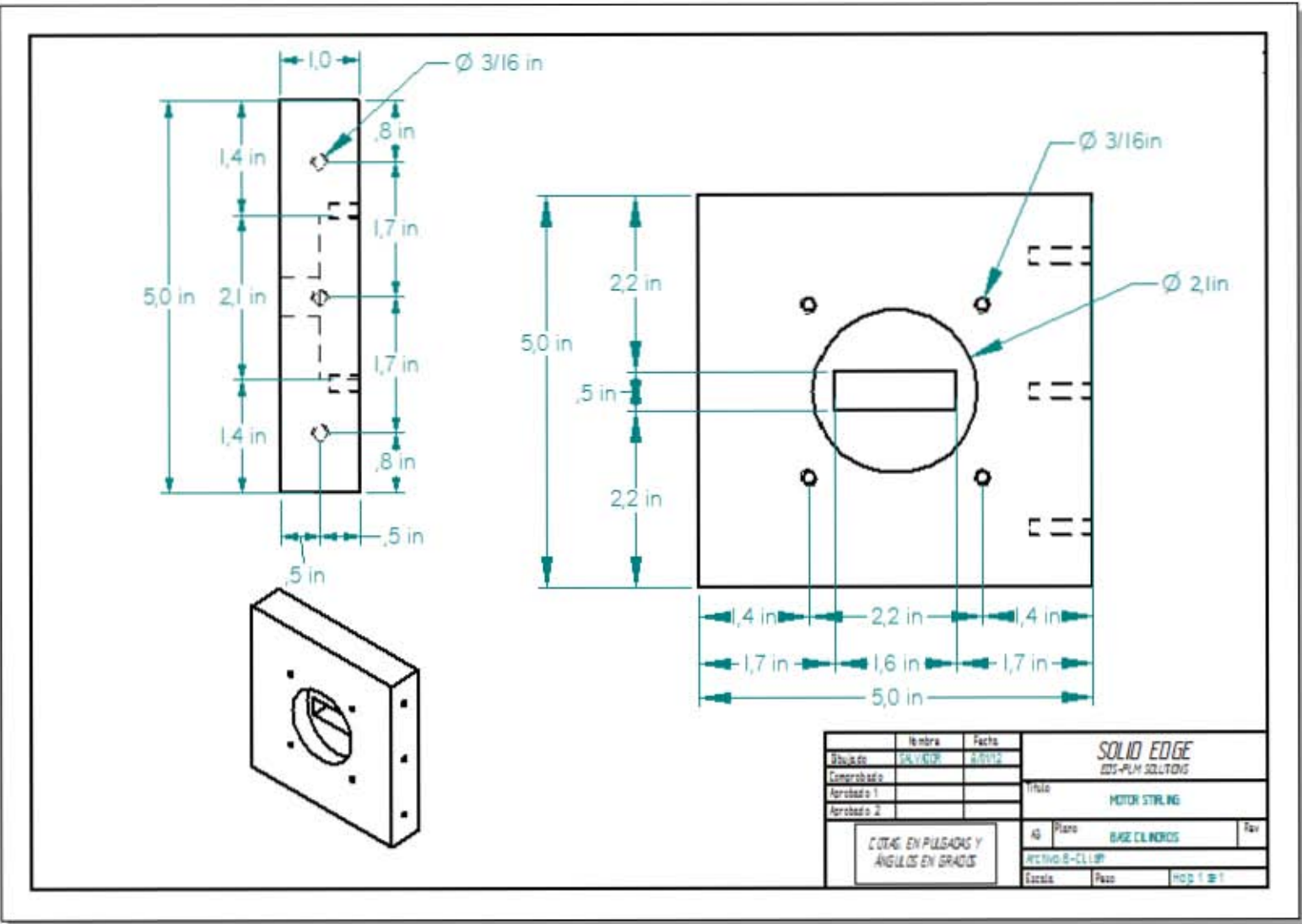
Mesografía

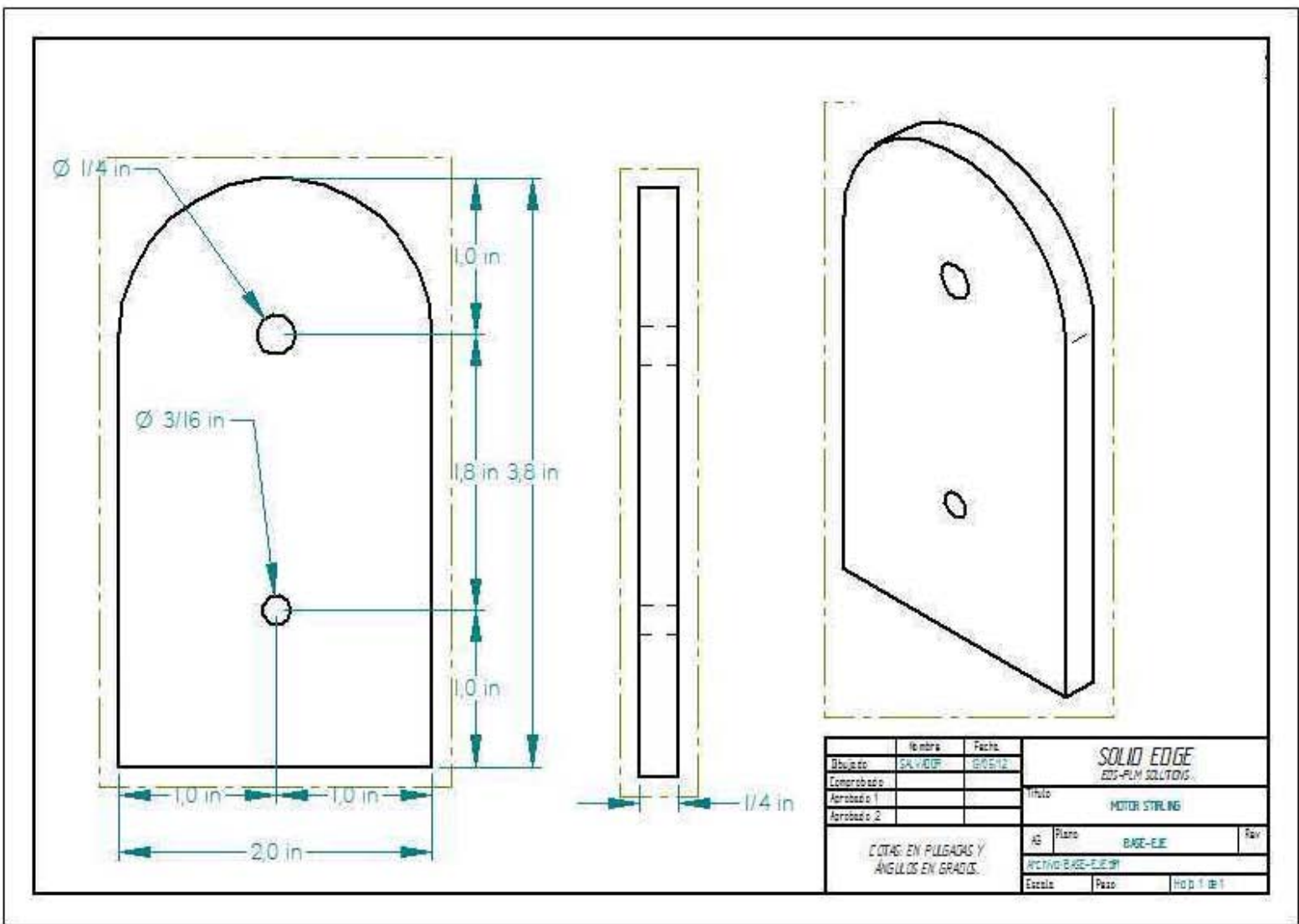
- <http://www.stirling-tech.com/>
- <http://www.sunpower.com/index.php>
- http://www.whispergen.com/efficient_en.php?fm=thecompany&fp=Efficient%20Home%20Energy

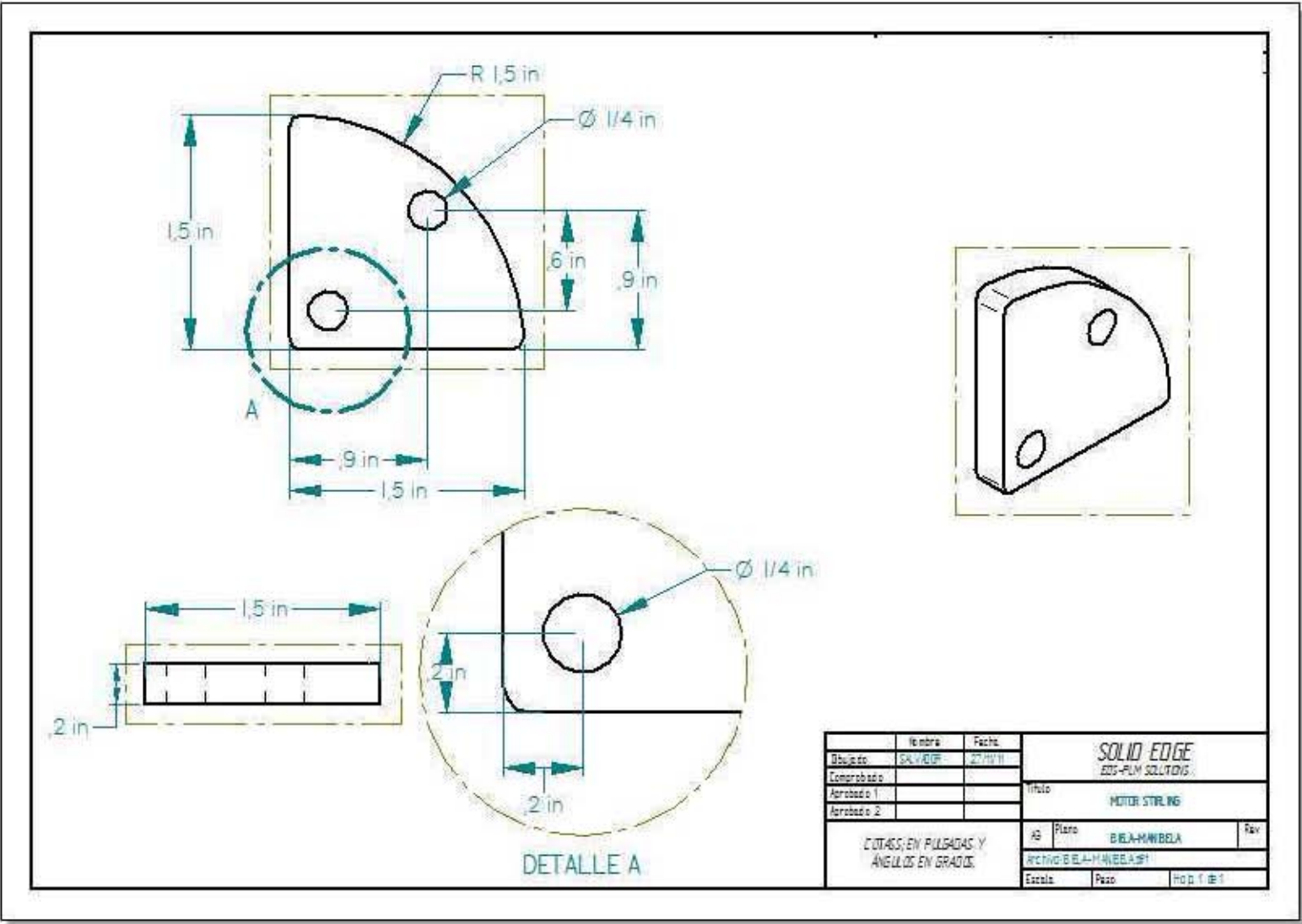
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

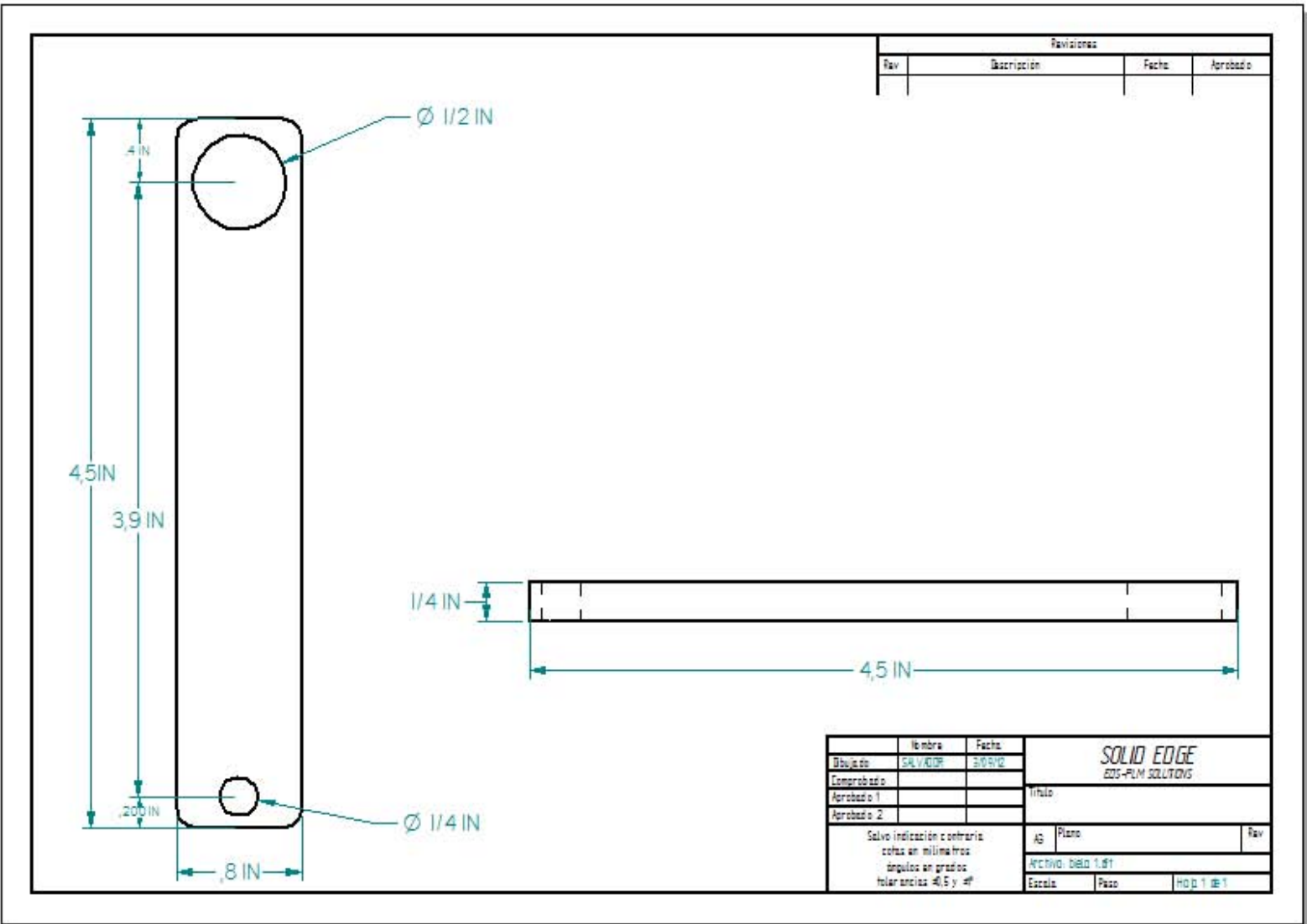
Anexos

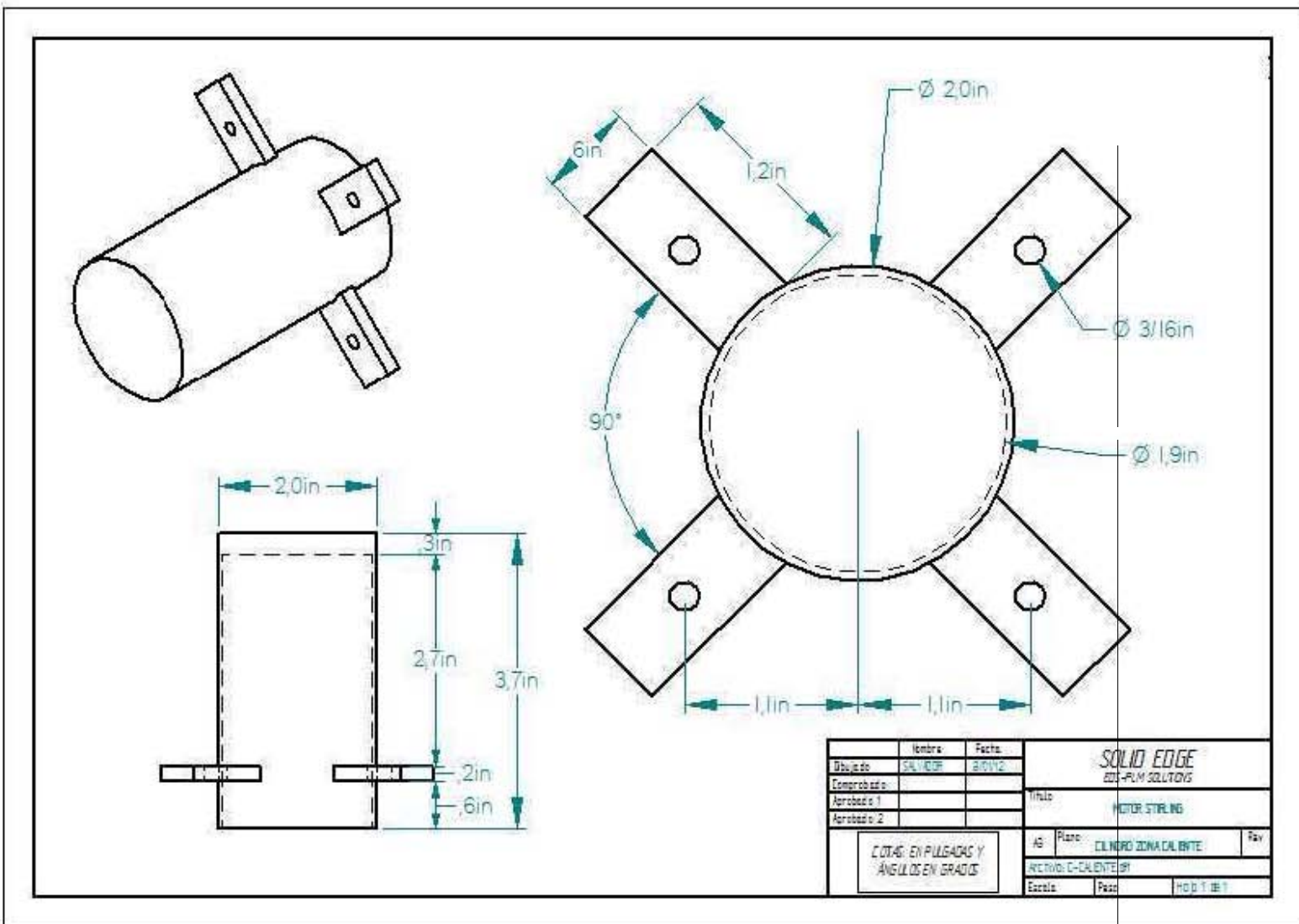


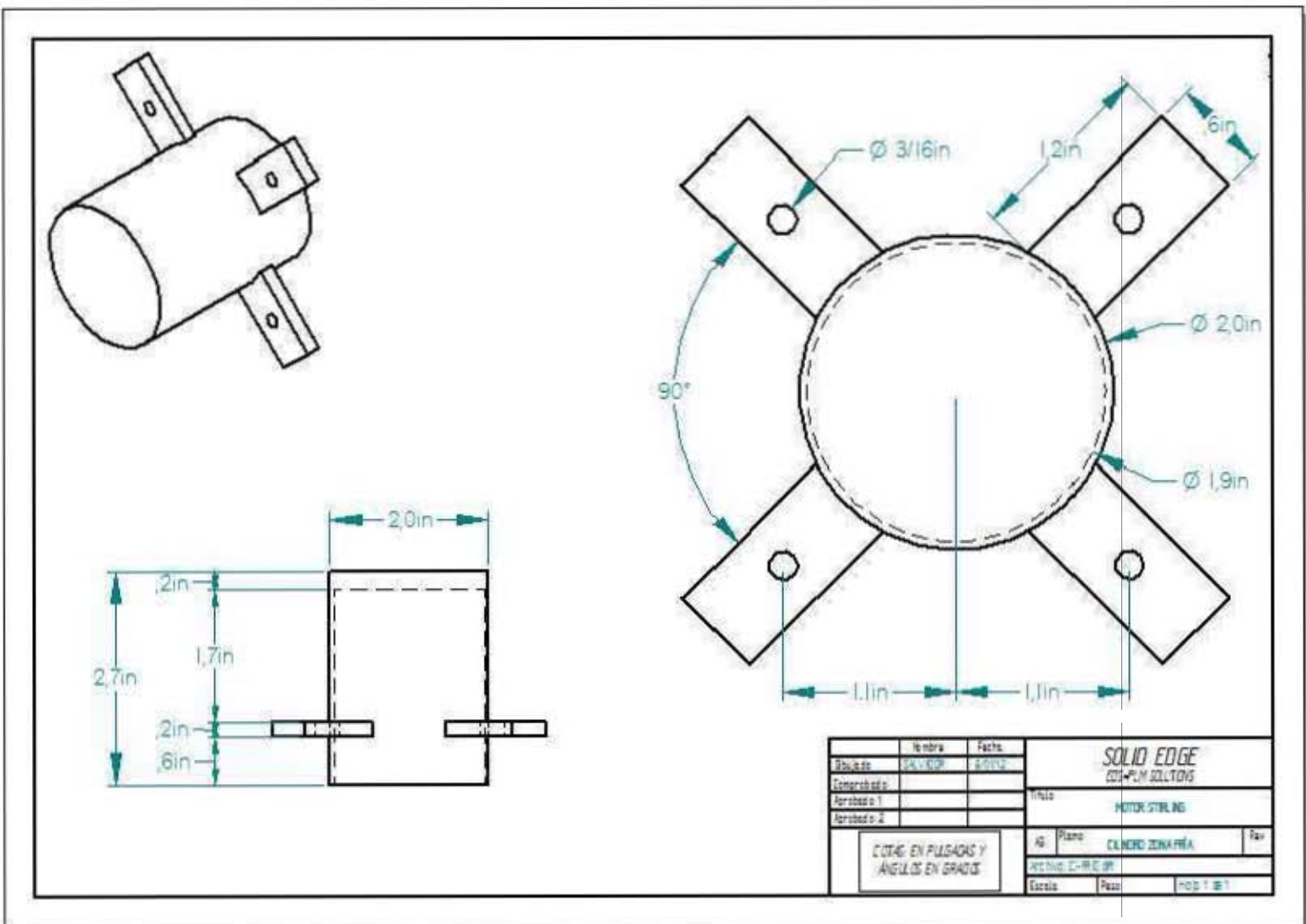


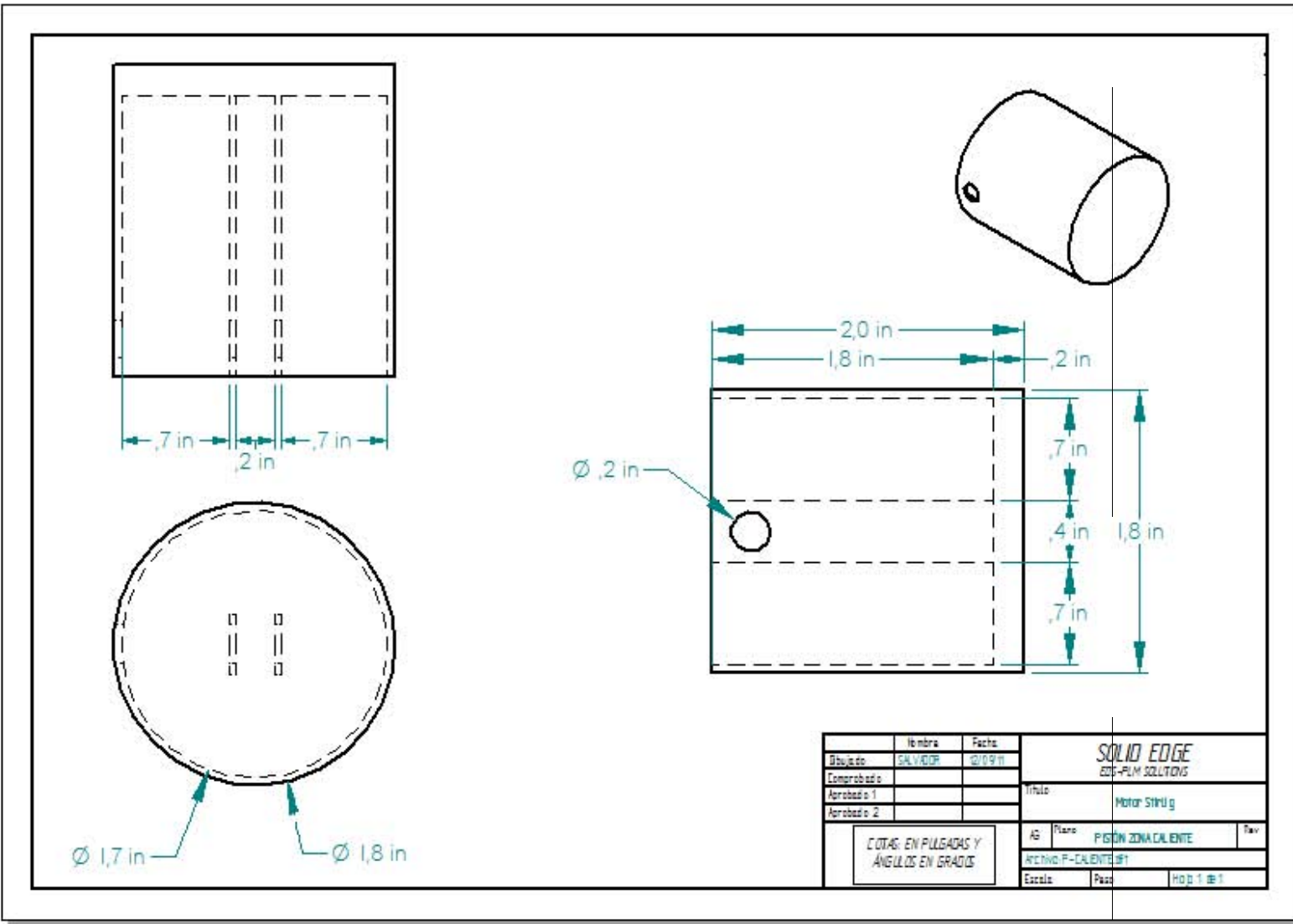




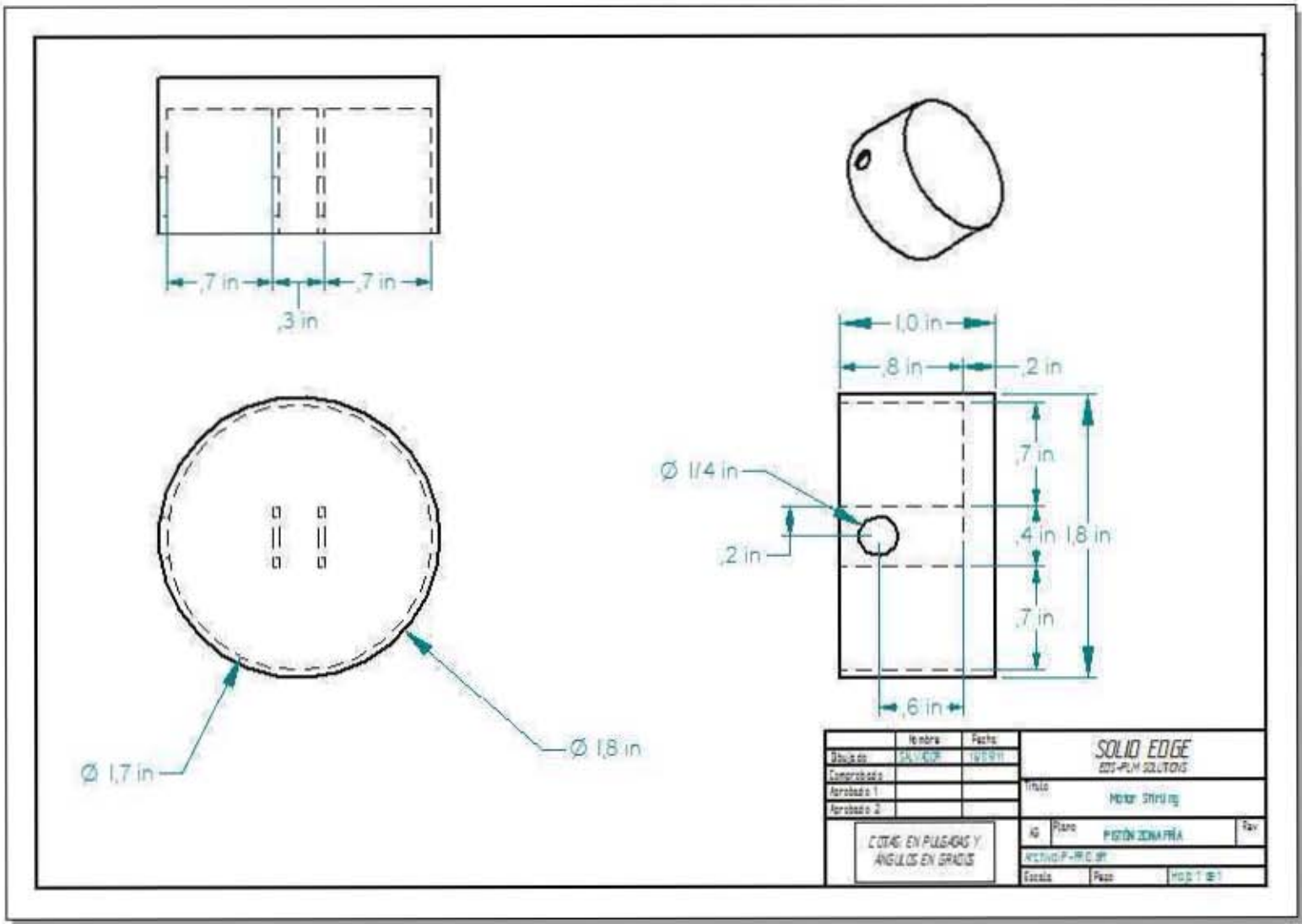








Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDGE-PLM SOLUTIONS	
Diseño	02/09/11		
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Motor Stirling	
Aprobado 2		AG	Piano
COTAS: EN PULGADAS Y ÁNGULOS EN GRADOS		PISÓN ZONA CALIENTE	
		ARCHIVO F-CALIENTE.BPT	
		Escala	País
		HOJA 1 DE 1	



Nombre	Fecha	SOLID EDGE	
Dibujador	14/03/21	EOL-PLM SOLUCI3N	
Comprobado		Título	
Aprobado 1		MOTOR STIRLING	
Aprobado 2		AG	
COTAS EN PULGADAS Y ANGULOS EN GRADOS		Plant	PIST3N ZONA FRÍA
		Revisi3n P-R-C-01	Rev
Caricla	Plant	HOY 1 31	

