

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR EXPERIMENTAL DE CICLO STIRLING PARA USO DE LABORATORIO

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos

Para obtener el título de Ingeniero en Producción Industrial

Profesor Guía: Ing. Diego Albuja

Autor: Santiago Fernando Muñoz Cadena

2008

AGRADECIMIENTO

Gracias a todos los amigos y personas que creyeron en mí y me brindaron guía y apoyo para el desarrollo de este trabajo e hicieron posible que este proyecto se lleve adelante.

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mi madre quien siempre me dio su apoyo y confianza para que esta etapa, iniciada hace tantos años, pueda alcanzar su objetivo.

Santiago

RESUMEN

Tema: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR EXPERIMENTAL DE CICLO STIRLING PARA USO DE LABORATORIO

Objetivos Generales

Construir un motor de ciclo Stirling como aporte al conocimiento y a la investigación en la universidad.

Se define como máquina Stirling aquel dispositivo que convierte calor en trabajo, a través de un ciclo regenerativo el cual realiza una expansión y compresión cíclica mediante el intercambio térmico a un gas en dos puntos: foco frío y foco caliente.

Conclusiones

El prototipo construido presenta una desventaja que es no tener una hermeticidad total, lo que afecta directamente a la potencia del motor y por lo tanto a su eficiencia.

Los resultados calculados son muy diferentes a los resultados prácticos, ya que cada material tiene sus propiedades térmicas y se comporta de forma distinta en el sistema.

Mediante el motor Stirling, se pudo demostrar que es posible convertir la energía térmica en energía mecánica.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I LA ENERGIA Y LA HUMANIDAD.....	12
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 Energía Eólica	13
1.3 Energía Fotovoltaica	13
1.4 El Gas Natural	14
1.5 El Carbón	14
1.6 Energía Geotermal	14
1.7 Los Biocombustibles.....	15
1.8 La Fusión Nuclear.....	15
1.9 El Hidrógeno.....	17
1.10 La Energía Hidroeléctrica	18
1.11 Planteamiento del Problema.....	21
1.12 Objetivos Generales	24
1.13 Objetivos Específicos.....	24
1.14 Alcance	25
CAPITULO II PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	26
2.1 ¿Qué es el ciclo Stirling?	26
2.2 Etapas de funcionamiento del motor Stirling.....	27
2.2.1 Etapa 1 - 2 Compresión	27

	2
2.2.2 Etapa 2 - 3 Absorción de calor	28
2.2.3 Etapa 3 - 4 Expansión	28
2.2.4 Etapa 4 – 1 Cesión de calor	28
2.5 Tipos de Motor Stirling	29
2.5.1 Motor tipo Alfa	29
2.5.2 Motor tipo Beta	30
2.5.3 Motor tipo Gamma.....	31
2.6 Aplicaciones del Motor Stirling	32
2.6.1 Uso del motor Stirling en el campo automotriz.....	33
2.6.2 Uso del motor Stirling en la generación eléctrica	34
2.6.3 Uso del motor Stirling en la Refrigeración	36
2.6.4 Uso del motor Stirling para bombeo de agua	36
2.7 Ventajas y Desventajas.	37
CAPITULO III DISEÑO DEL MOTOR STIRLING EXPERIMENTAL	39
3.1 Elementos del Motor	41
3.2 Cálculo termodinámico del Motor Stirling.....	44
3.2.1 Cálculo de Presiones	47
3.2.2 Proceso térmico 2 – 3.	49
3.2.3 Proceso térmico 3 – 4.	50
3.2.4 Proceso térmico 4 – 1	52
3.2.5 Proceso 1 – 2.	54

3.3 Análisis de Disponibilidad	55
3.3.1 Cambio de la Entropía.....	55
3.3.2 Calor Suministrado.....	57
3.3.3 Calor Rechazado.....	57
3.3.4 Calor Aprovechado.....	58
3.4 Trabajo Realizado.....	59
3.5 Eficiencia del Motor Stirling.....	61
3.6 Disipadores de calor	64
3.7 Perdidas Térmicas.....	65
3.7.1 Perdidas por Convección y Radiación.....	66
3.8 Diagrama de balance energético	75
3.9 Cálculo de la Presión media efectiva	76
3.10 Diseño del Eje.....	78
3.10.1 Momento Flector	81
3.10.2 Factor de seguridad	83
CAPITULO IV MONTAJE DEL MOTOR.....	86
4.1 Especificaciones de partes y piezas	86
4.1.1 Pedal desplazador.....	86
4.1.2 Pedal de Poder	87
4.1.3 Soporte del Eje.....	88
4.1.4 Eje.....	88

4.1.5 Soporte.....	89
4.1.6 Base del soporte	90
4.1.7 Tapa Superior	91
4.1.8 Cilindro	92
4.1.9 Desplazador	93
4.1.10 Acople del regenerador	94
4.1.11 Pistón	95
4.1.12 Cilindro de Poder.....	97
4.1.13 Biela	98
4.1.14 Disipador de Calor.....	99
4.2 Montaje del Motor	100
4.3 Sistema Electrónico	105
CAPITULO V ETAPA DE PRUEBAS	109
5.1 Protocolos de Uso	109
5.1.1 Calibración del motor	109
5.2 Prueba controlada del motor.....	111
5.3 Tabla para desarrollo de Prácticas	112
5.4 Mantenimiento	113
CAPITULO VI COSTOS.....	115
6.1 Analisis de costos	115
6.1.1 Producción	115

6.1.2 Materiales.....	116
6.1.3 Ingeniería y Mano de Obra.....	117
CAPITULO VII.....	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
7.1 Conclusiones	118
7.2 Recomendaciones	119
BIBLIOGRAFIA.....	120

ANEXOS

Anexo 1 Planos

<i>Nombre</i>	<i>Plano</i>
Montaje de Taller	2008.4.1
Cilindro	2008.4.1.01
Tapa superior	2008.4.1.02
Pedal del desplazador	2008.4.1.03
Pedal de poder	2008.4.1.04
Eje del pedal	2008.4.1.04.1
Acople del desplazador	2008.4.1.05
Acople del regenerador	2008.4.1.06
Base de soporte	2008.4.1.07.1
Soporte	2008.4.1.07.2
Cilindro de poder	2008.4.1.08.1
Cilindro de Ajuste	2008.4.1.08.2
Soporte Eje	2008.4.1.09
Volante de inercia	2008.4.1.10
Pistón	2008.4.1.11.1
Sello del pistón	2008.4.1.11.2
Eje principal	2008.4.1.12
Biela	2008.4.1.13.1
Brazo Pistón	2008.4.1.13.2
Brazo desplazador2	2008.4.1.13.2

Brazo del desplazador	2008.4.1.13.2
Disipador1	2008.4.1.14.1
Disipador 2	2008.4.1.14.2

Anexo 2 Planos Electrónicos

Placa Base	2008.5.1
Placa con Elementos	2008.5.2

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Figura</i>	<i>Nombre del Gráfico</i>	<i>Página</i>
figura 2.1	Esquema del Proceso Térmico	26
figura 2.2	Diagrama Presión-Volumen	27
figura 2.3	Esquema de motor tipo Alfa	29
figura 2.4	Esquema de motor tipo Beta	30
figura 2.5	Esquema de motor tipo Gamma	31
figura 2.6	Colector parabólico con motor Stirling	35
figura 3.1	Diagrama Temperatura-Entropía y Presión - Volumen	39
figura 3.2	Esquema del cilindro del motor	45
figura 3.3	Esquema del pistón del motor	46
figura 3.4	Esquema funcionamiento del motor en la etapa 2-3	49
figura 3.5	Esquema funcionamiento del motor en la etapa 3-4	50

figura 3.6	Esquema funcionamiento del motor en la etapa 4-1	52
figura 3.7	Esquema funcionamiento del motor en la etapa 1-2	54
figura 3.8	Trabajo en diagrama P-V	59
figura 3.9	Disipador de calor	64
figura 3.10	Esquema de pérdidas de calor por la tapa superior	66
figura 3.11	Esquema de pérdidas de calor por la pared del cilindro	70
figura 3.12	Acople del motor eléctrico y Stirling	72
figura 3.13	Medición del experimento	73
figura 3.14	Esquema del balance Energético	75
figura 3.15	Presión Media Efectiva	76
figura 3.16	Eje con acoples	78
figura 3.17	fuerzas ejercidas sobre el eje	78
figura 3.18	Momentos Sobre el eje	82
figura 4.1	Pedal desplazador	86
figura 4.2	Pedal de poder	87
figura 4.3	Soporte del Eje	88
figura 4.4	Eje	88
figura 4.5	Soporte	89
figura 4.6	Acople del Soporte	90
figura 4.7	Tapa Superior	91
figura 4.8	Cilindro	92
figura 4.9	Desplazador	93
figura 4.10	Acople del regenerador	94
figura 4.11	Pistón	95

figura 4.12	Cilindro de Poder	97
figura 4.13	Biela	98
figura 4.13	Disipador de Calor	99
figura 4.14	Montaje del eje	100
figura 4.15	Montaje de la base	102
figura 4.16	Acople del pedal de poder y pistón-biela	102
figura 4.17	Corte transversal del motor	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
Tabla 3.1	Temperaturas y volúmenes del ciclo	47
Tabla 3.2	Temperaturas, volúmenes y presión del punto 2	48
Tabla 3.3	Temperaturas, volúmenes y presión del punto 3	50
Tabla 3.4	Temperaturas, volúmenes y presión del punto 4	51
Tabla 3.5	Temperaturas, volúmenes y presión del punto 1	53
Tabla 3.6	Presiones, temperaturas y volúmenes del ciclo	54
Tabla 3.7	Distancias y momentos del eje	82
Tabla 3.8	Resultados prueba 1	111
Tabla 3.9	Resultados prueba 2	112
Tabla 3.10	Modelo de formato de valores para Resultados de prueba	113

NOMENCLATURA

Expresión	Significado
\varnothing cilindro	Diámetro del cilindro
\varnothing pistón	Diámetro del pistón
L	Carrera del pistón
h	Altura del cilindro
V	Volumen
P	Presión
T	Temperatura
R_o	Constante específica del gas
W	Trabajo
Q	Calor
P_m	Presión media efectiva
Q_{rg}	Calor del regenerador
Q_c	Calor aprovechado
Q_f	Calor perdido
V_D	Volumen de desplazamiento
m	Masa
T_{amb}	Temperatura ambiental
η	Eficiencia
Δs	Cambio de la Entropía
R.	Resistencia térmica
h	coeficiente de transferencia de calor

k	conductividad térmica del material
A	área
r	radio
Q_x	cantidad de energía disipada
F	Fuerza
M	Momento
τ	Torque
Z_d	Deformación
N	Factor de seguridad

CAPITULO I

LA ENERGIA Y LA HUMANIDAD

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo se encuentra en un periodo de crisis energética, ya que la producción mundial de petróleo ha disminuido considerablemente, mientras la demanda mundial no deja de aumentar.

El choque resultante de esta creciente demanda petrolera junto con la disminución de la producción, es inevitable, a causa de la importancia de la dependencia de nuestras economías respecto del petróleo. Como alternativas se están investigando multitud de opciones, desde las energías alternativas o renovables hasta las energías nucleares, aunque ninguna de ellas cuenta con una viabilidad.

El petróleo está presente en todas partes, no solo en la producción de energía, está en los plásticos, en fertilizantes, electrodomésticos, textiles, muebles, maquinaria, etc. Por lo tanto, el hombre ya no entiende la vida sin la presencia de la energía y como está viendo amenazada su fuente de provisión ya que la explotación petrolera está llegando a su fin, entonces se ha visto obligado a buscar nuevas fuentes de energía, así tenemos:

1.2 Energía Eólica

Actualmente es la única fuente que ofrece una buena competencia frente a los combustibles fósiles, debido a sus bajos costos de producción. Aunque tiene algunos impedimentos para su implementación, como la dificultad de almacenaje de la electricidad, y la dependencia de la localización (rutas de migración de aves, potencia del viento); no está del todo perdido, ya que aquellos países que cuentan con las condiciones necesarias para la edificación de granjas eólicas pueden hacer buen uso de este tipo de recurso, como por ejemplo en la Patagonia, Dinamarca y los Estados Unidos.

1.3 Energía Fotovoltaica

“Consiste en la producción de electricidad a partir de la diferencia de potencial obtenida por la incidencia de la luz sobre algún metal semiconductor (generalmente Silicio). A pesar de que hasta el momento no tiene buena eficiencia (alrededor del 28% y hasta 37% en algunos casos)”, ¹su rentabilidad subiría si es que se utilizara este mecanismo para obtener hidrógeno, que es más fácil de almacenar y distribuir; y, que además en, la combustión produce solamente agua y algunos óxidos de Nitrógeno en pocas proporciones, por lo que, prácticamente, no contamina. Esta forma podría ser en el futuro, la mejor manera de obtener energía eléctrica.

¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaico

1.4 El Gas Natural

Su uso va en aumento, constituye el 23%² del consumo energético, y tiene muchas ventajas, pero su explotación también contribuye al efecto invernadero y sigue una curva de campana más pronunciada que la del petróleo, de manera que, una vez que se alcance el punto más alto, unos años después del petróleo, su declive será mucho más pronunciado³. En Norteamérica la escasez de gas ya empieza a ser un problema acuciante.

1.5 El Carbón

“Es un combustible muy pesado, poco eficiente, con poca versatilidad y con un gran coste de extracción y de transporte. Aun así su consumo es del 25% del total de recursos energéticos”⁴. Es muy contaminante (tanto su minería como su combustión) y es el causante de la lluvia ácida, además de contribuir al efecto invernadero.

1.6 Energía Geotermal

Esta proviene del calor del centro de la Tierra. Cuando el agua se pone en contacto con las rocas calientes de la profundidad, absorbe la energía y ésta se

² www.shell.com/home/content/es-es/shell_for_businesses/gas_electricity/gasnatural_09281101.html

³ <http://zaragozaciudad.net/posindustrial/2006/071002-el-calentamiento-global.php>

⁴ http://www.cienciapopular.com/n/Ecologia/Crisis_Energetica/Crisis_Energetica.php

convierte en vapor el cual sirve para impulsar las turbinas de la central eléctrica. Las mismas que se construyen con una tecnología muy similar a la usada para la perforación de pozos de petróleo. El Ecuador, al estar ubicado en la cordillera de los Andes llamada también cinturón de fuego, cuenta con gran potencial de este recurso.

1.7 Los Biocombustibles

“No tienen las prestaciones que presentan los gasóleos obtenidos del petróleo y, para incrementar su producción significativamente, se tendrían que dedicar una gran cantidad de tierras fértiles a al cultivo energético como palma y caña de azúcar, lo que es complicado en un mundo en el que el hambre y la desertización son dos de sus problemas de más difícil solución. Además, nuevamente el petróleo aparece como el recurso que está detrás de su desarrollo, pues el proceso de siembra, tratamiento, fertilización, riego, cosecha, transporte y distribución requiere de energía que en la actualidad se obtiene del “oro negro”.⁵

1.8 La Fusión Nuclear

Se producen en el interior del sol y proporciona la energía que nos llega del astro, es la fuente de la que se dice, resolverá todos los problemas energéticos en el

⁵ Lenssen, N. (1993). El suministro de energía en los países en desarrollo. En Brown, L.R., *La situación del mundo 1993* (Págs. 171-200). Buenos Aires. Editorial Sudamericana.

futuro, pero las complejidades tecnológicas a superar son de tal magnitud que desde que se planteó inicialmente ya se advertía que no iba a estar disponible al menos antes de 50 años, y así se continúa diciendo en la actualidad, pese a que han pasado más de 30 desde entonces.

Se necesita alcanzar temperaturas superiores a cien millones de grados para que se produzca la reacción de fusión; materiales que resistan las altas temperaturas y la radiación; lograr que la energía liberada sea mayor que la necesaria para calentar y mantener aislado el combustible; y finalmente, desarrollar dispositivos que capturen la energía generada y la conviertan en electricidad, de tal manera que de todo el proceso se obtenga un balance energético suficientemente positivo.

“La fusión nuclear presenta numerosas dificultades para implantarse a gran escala y a corto plazo: el enorme coste (económico y energético) de la construcción y desmantelamiento de cada central nuclear; la ausencia de soluciones al tratamiento y almacenamiento de los peligrosos residuos, que emiten radiactividad durante miles de años; el riesgo de accidentes nucleares y de atentados terroristas; los conflictos entre los países por el temor al posible empleo de la energía nuclear para fines militares; el gran impacto ambiental que genera la minería del uranio. En todo caso, aunque todos estos problemas se pudieran superar, el uranio también posee un pico, que se alcanzará dentro

de unos 25 años, plazo que se acortaría si se incrementase el número de centrales nucleares”⁶.

1.9 El Hidrógeno

“No es una fuente de energía ni un recurso natural y debe obtenerse a partir de otras materias primas (agua, biomasa, combustibles fósiles), necesitando más energía para obtenerlo de la que después proporciona. Se plantea como combustible para el transporte porque no es contaminante y en principio se podría utilizar de forma líquida, como los derivados del petróleo, aunque para ello se tendrían que conseguir temperaturas por debajo de los -253° C y presiones altísimas, lo que supondría un gasto elevado de energía. Ocupa 8 veces más volumen por unidad de energía que las gasolinas o el diesel, y haría falta adaptar a él los vehículos actuales y los sistemas de transporte y distribución de combustible que están implantados hoy en día, siendo su manipulación extremadamente peligrosa debido a su elevada inestabilidad.”⁷

⁶ Rincón, J.M. y Romero, M. (2002). Vitrificación de los residuos radiactivos. Investigación y Ciencia, Abril, Págs. 75-79.2002.

⁷ Marschoff, C.M. (1992). Las fuentes de energía en el siglo XXI. Buenos Aires. Fondo de la Cultura Económica de Argentina.

1.10 La Energía Hidroeléctrica

Que sólo aporta el 2,7 %⁸ de la energía global, tiene pocas posibilidades de incrementarse significativamente. Las grandes presas siempre causan gran impacto sobre las áreas donde se construyen, y obligan a desplazarse a las poblaciones residentes en las mismas, además la regularidad hidrográfica cada vez es menor produciendo con mayor frecuencia largos periodos de sequía seguidos de periodos de lluvias torrenciales que no permiten su almacenamiento. También hay que añadir el hecho de que se pierde 66% de dicha energía en forma de calor en su transporte.

“Las energías renovables (solar, eólica, mareomotriz, geotérmica...) representan tan sólo el 0,5 % del total mundial, y su incipiente desarrollo ha sido posible gracias a la disponibilidad de petróleo, que es utilizado tanto en forma de materia prima como de energía para la fabricación de los costosos materiales necesarios, y para la construcción de las infraestructuras aparejadas. La energía que proporcionan es difícil de transportar y de almacenar y su cantidad varía en función de agentes externos, además de contar con rendimientos no muy elevados.”⁹

El mundo cada día busca reducir los impactos nocivos ocasionados por las emisiones de fabricas y hogares, por esta razón se han venido desarrollando más tipos de energías que sean amigables con el medioambiente como la

⁸ http://www.cienciapopular.com/n/Ecologia/Crisis_Energetica/Crisis_Energetica.php

⁹ http://www.crisisenergetica.org/ficheros/El_mundo_ante_el_cenit_del_petroleo.pdf

energía hidráulica, eólica, biomasa, geotermal, fotovoltaica, mareomotriz y oleo-motriz.

El Ecuador actualmente tiene una gran crisis energética a pesar de ser uno de los países con mayor potencial solar e hídrico del mundo, pero los intereses políticos y económicos no han permitido su buen aprovechamiento, peor aún es el abandono que tiene el área de la investigación y desarrollo intelectual, lo que hace indispensable el aporte de universidades y organismos interesados en el desarrollo y crecimiento en el campo de la investigación.

La investigación realizada en este trabajo, presenta una alternativa energética, como lo es el motor de ciclo Stirling, el cual, podría ser una opción viable a la investigación, producción y desarrollo de una nueva energía limpia.

El motor de ciclo Stirling fue inventado por el fraile escocés Sir Robert Stirling, , hacia 1816. Stirling consideraba demasiado complicado calentar agua en una caldera, producir vapor, expansionarlo en un motor, condensarlo y mediante una bomba introducir de nuevo el agua en la caldera. Otro impulso para desarrollar un nuevo sistema fueron los accidentes fatales causados frecuentemente por las máquinas a vapor, ya que aún no se desarrollaban materiales como el acero y las calderas explotaban con facilidad.

El motor Stirling tuvo un inicio difícil ya que en aquella época tenía grandes limitaciones debido a los materiales existentes.

El ciclo Stirling es una tecnología existente desde hace muchos años, pero abandonada por el apareamiento del motor de combustión interna; en la actualidad es importante desempolvar esta tecnología como un tipo de energía sustentable con el fin de mejorarla para su aprovechamiento en la industria, al ser una alternativa ecológica y económicamente viable.

“El motor Stirling es una máquina que opera en un ciclo termodinámico regenerativo cerrado, con una expansión y compresión cíclica del gas (aire) de trabajo a diferentes niveles de temperatura, el flujo es controlado debido a cambios de volumen y hay una conversión neta de calor a trabajo y viceversa.”¹⁰

Hacia 1930 la empresa Philips empieza a investigar su real potencial, sugiriendo una superioridad a la máquina de vapor, ya que realizaba los mismos procesos de calentamiento y enfriamiento de un gas, pero todo dentro del motor y el gas era aire en vez de vapor de agua, por lo que el motor no necesitaba caldera.

Este motor fue común en su época, sobre todo para pequeñas maquinas de uso domestico tales como ventiladores, bombas de agua etc., su potencia específica no era muy elevada, pero su sencillez y silencio eran magníficos.

¹⁰ WALKER, Stirling Engines, 2da. Edición, Oxford, Clarendon Press 1980 pag. 1

Entonces Philips decide regresar al diseño original de 1916 de un solo cilindro y el trabajo continuó hasta 1945.

“En 1946 algunos documentos fueron publicados por el equipo de investigación de la empresa Philips. Los cuales contenían gran cantidad de información como el incremento de la potencia por Kg, en un factor de 50% además la reducción de su tamaño físico por unidad de potencia en un factor de 125% y una mejora en la eficiencia en un factor de 15%.

Llegado los años de 1950, la empresa General Motors toma la posta y continua con el trabajo realizado por Philips llegando a resultados similares por lo que decide orientar sus investigaciones hacia la refrigeración y criogenia con lo que logró un gran éxito comercial.

En 1971, General Motors inicia un programa de investigación para el desarrollo del motor Stirling enfocado en vehículos, obteniendo cada vez mejores resultados de diseño y mayor potencia.”¹¹

1.11 Planteamiento del Problema

El rápido crecimiento demográfico en un planeta de recursos limitados, ha creado un incremento del consumo de energía, esto viene agravado, principalmente en los países en vías de desarrollo, por las múltiples

¹¹ MOTOR STIRLING TIPO BETA TESIS Politécnica Nacional. Moreno Antonio, Ortiz Julio

deficiencias en los modelos de producción de energía que los mismos poseen, así también el uso de tecnologías obsoletas y poco eficientes, por lo que resultan más costosas y a la vez poco ecológicas; además estos modelos muestran una fuerte dependencia hacia el petróleo, por lo que son más sensibles frente a los cambios bruscos del precio de este hidrocarburo.

Los países del Tercer Mundo no invierten lo que deberían en la eficiencia y el ahorro, para contrarrestar el aumento de la demanda construyen más plantas (generalmente térmicas). Tampoco se dedican al apoyo sostenido del desarrollo de energías no convencionales o al cuidado del medio ambiente, como se puede ver en países desarrollados como Estados Unidos (Ley de Aire Limpio), o los de la Comunidad Europea (impuesto al carbono).

Al ser Ecuador un país en vías de desarrollo con un altísimo potencial energético, se deben encaminar hacia un desarrollo sustentable que no atente con la biodiversidad ni el medio ambiente y causando el menor impacto posible. Es la investigación de nuevas fuentes energéticas la que podrá lograr cambios en las industrias tanto económicas como productivas, y reduciendo el impacto ambiental que causan.

Hoy se tiene la certeza de que el aumento de la temperatura a nivel mundial es el resultado de las constantes emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes, que se comportan, ante la radiación, como el vidrio de un invernadero, dejando pasar el calor hacia el interior de la atmósfera pero no

hacia el exterior de la misma. Este proceso, conocido como efecto invernadero, siempre ha existido en el planeta, pero a causa del abrupto incremento de los gases mencionados, se está alterando su equilibrio natural, lo que en consecuencia producirá un deshielo de los polos y el ascenso del nivel del mar y problemas climáticos por doquier, lo que conducirá a catástrofes de consecuencias insospechables.

Para contrarrestar este proceso, es necesario tomar conciencia de la gravedad del mismo y aventurarse a sistematizar proyectos que lleven al reemplazo de los combustibles fósiles, por otros cuyas consecuencias ambientales negativas sean mínimas tales como el motor de ciclo Stirling.

Frente a todo lo expuesto, es necesario recalcar que en futuro, el abastecimiento energético no será abastecido por un único tipo de energía, sino que necesitará de varios tipos, dependiendo de las distintas características naturales de las regiones del planeta, para poder satisfacer la creciente demanda de energía, principalmente eléctrica.

La búsqueda de nuevas alternativas energéticas a pequeña y gran escala nos lleva al desarrollo de tecnologías como el motor de ciclo Stirling el que presenta prometedoras soluciones para la generación eléctrica, ventilación y refrigeración. Además el ciclo Stirling es una máquina de combustión externa que lo hace una alternativa energética no contaminante ya que puede aprovechar el calor desperdiciado por las calderas y hornos de muchas

empresas para transformarlo en energía mecánica, es decir, puede adaptarse a cualquier fuente de energía (combustión convencional o mixta, por ejemplo, con biomasa y gas, energía solar...), sin que ello afecte al funcionamiento interno del motor; en caso de utilizar la energía solar, la contaminación sería nula.

Otra de las ventajas del motor Stirling es que resulta extremadamente silencioso, pues no dispone de válvulas ni de fases de explosión en su ciclo, de este modo, se evitan los ruidos y las vibraciones.

1.12 Objetivos Generales

- Construir un motor de ciclo Stirling que de un aporte al conocimiento y a la investigación en la universidad, fomentando soluciones a la problemática de la situación energética-ambiental que se vive en la actualidad.

1.13 Objetivos Específicos

- Conocer el ciclo Stirling como alternativa energética.
- Realizar el diseño para la construcción de un motor Stirling experimental.

- Construir un motor de Stirling experimental, que permita demostrar el principio para aprovechar la energía térmica y convertirla en energía mecánica.
- Exponer de forma didáctica el funcionamiento del ciclo Stirling a través de la construcción de un motor prototipo.
- Describir las posibles aplicaciones del motor Stirling con fines productivos y ecológicos.
- Especificar el protocolo de pruebas recomendado para el motor Stirling experimental diseñado y construido.
- Determinar las variables de control del motor diseñado
- Desarrollar pruebas y ensayos que se puedan realizar con el motor Stirling.

1.14 Alcance

El diseño y construcción del motor Stirling realizado en esta tesis pretende dar una herramienta de aprendizaje que permita conocer y entender de forma sencilla el funcionamiento de este motor. Esto se lograra mediante la realización de una sencilla practica, en la que se podrá ver todos elementos del motor y su principio de funcionamiento.

CAPITULO II

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 ¿Qué es el ciclo Stirling?

Se define como ciclo Stirling al proceso regenerativo que aprovecha la capacidad de expansión y contracción de un gas, el cual mediante procesos termodinámicos se convierte en trabajo (ver fig 2.1).

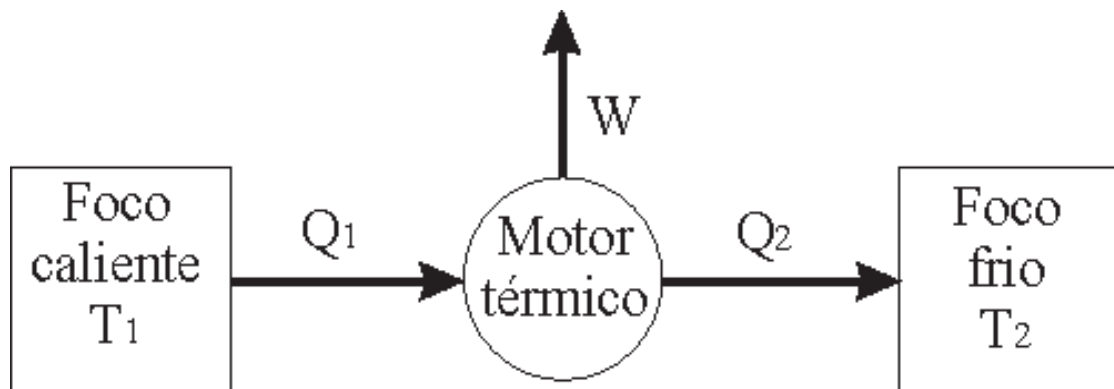


figura 2.1 Esquema del Proceso Térmico

Se define como máquina Stirling aquel dispositivo que convierte calor en trabajo, a través de un ciclo regenerativo el cual realiza una expansión y compresión cíclica mediante el intercambio térmico a un gas en dos puntos: foco frío y foco caliente.

2.2 Etapas de funcionamiento del motor Stirling

El ciclo Stirling al igual que el ciclo de Carnot está compuesto por cuatro tiempos o procesos termodinámicos y de transferencia de calor:

A continuación se presentan las etapas que realiza el ciclo Stirling basados en el diagrama presión-volumen. (ver fig 2.2).

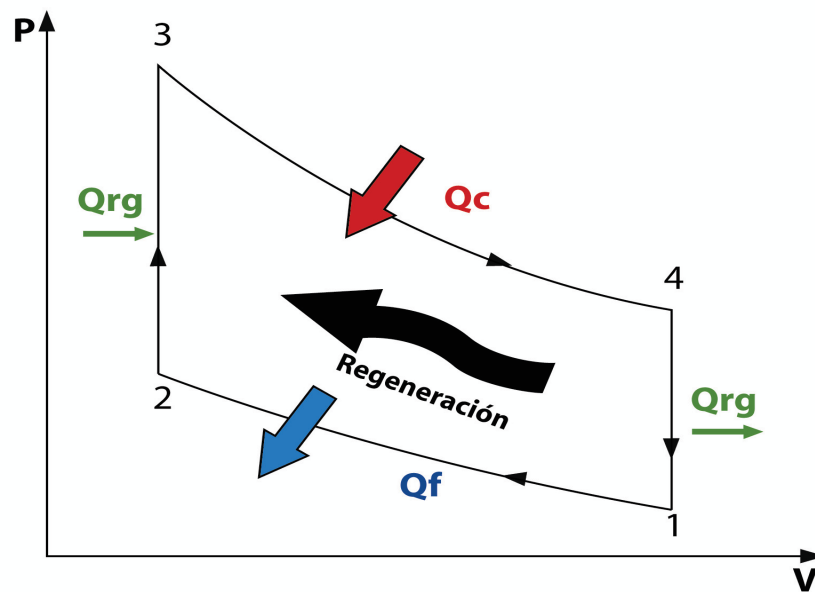


figura 2.2 Diagrama Presión-Volumen

2.2.1 Etapa 1 - 2 Compresión

Compresión isotérmica, en esta etapa el pistón baja, disminuyendo el volumen y manteniendo la misma temperatura, en este proceso el gas de trabajo transfiere una cantidad calor hacia el exterior Q_f , con la ayuda del foco frío

(ver fig 2.2).

2.2.2 Etapa 2 - 3 Absorción de calor

Esta etapa tiene lugar cuando el pistón se encuentra abajo y el desplazador en proceso descendente, la fuente de calor está en contacto directo con el fluido de trabajo y le transfiere calor, generando un aumento de presión a volumen constante. (ver fig 2.2).

2.2.3 Etapa 3 - 4 Expansión

Etapa de Expansión isotérmica. Aquí el fluido de trabajo se encuentra a máxima temperatura, siendo Q_c el calor aprovechado (ver fig 2.2). El pistón comienza su carrera ascendente, aumentando así el volumen del sistema, este proceso es isotérmico, es decir que ocurre a la misma temperatura. El desplazador se encuentra en la posición superior, desplazando al fluido hacia la zona caliente y aislando al foco frío.

2.2.4 Etapa 4 - 1 Cesión de calor

Etapa a volumen constante. En esta etapa el gas de trabajo cede calor al regenerador que esta en su carrera de bajada y desplazando el fluido a la zona fría, disminuyendo su temperatura y regresando a su etapa inicial.

2.5 Tipos de Motor Stirling

2.5.1 Motor tipo Alfa

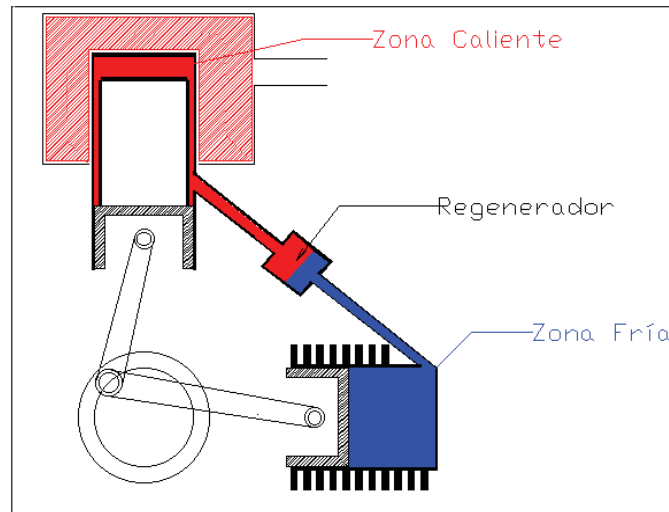


figura 2.3 Esquema de motor tipo Alfa

Este tipo de motor no utiliza desplazador como en la patente original de Stirling, pero desde el punto de vista termodinámico el funcionamiento es similar.

Consta de dos cilindros independientes conectados por un tubo en el que se sitúa el regenerador que almacena y cede el calor, en cada uno de los cilindros hay un pistón que se mueve 90 grados desfasado respecto al otro.

Uno de los cilindros se calienta mediante un mechero de gas o alcohol y el otro se enfría mediante aletas o agua (ver fig 2.7).

El desfase entre los dos pistones hace que el aire, pase de un cilindro a otro calentándose, enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.¹²

2.5.2 Motor tipo Beta

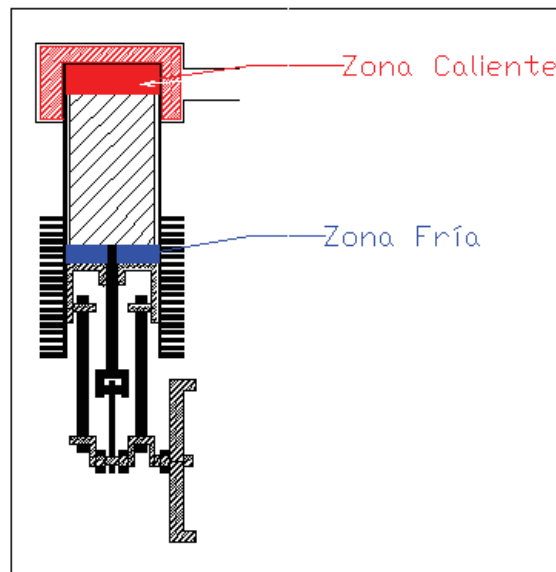


figura 2.4 Esquema de motor tipo Beta

El motor original de Stirling era de este tipo consta de un cilindro, con una zona caliente (mediante un mechero de gas, alcohol etc.), una zona fría (refrigerada por aletas, agua etc.).

En el interior del cilindro esta el desplazador cuya misión es pasar el aire de la zona fría a la caliente y viceversa (ver fig 2.8).

Los motores pequeños no suelen llevar regenerador, únicamente una holgura de algunas décimas de milímetro entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del aire.¹²

¹² <http://revista.robotiker.com/revista/articulo.do?method=detalle&id=40>

Los motores grandes suelen llevar un regenerador externo por el que debe pasar el aire en su camino de la zona fría a la caliente y viceversa. Concéntrico con el desplazador está situado el pistón de potencia.

Mediante un cigüeñal especial el movimiento del pistón y el desplazador están desfasados 90 grados, lo que permite que el motor funcione.

Desde el punto de vista termodinámico es el motor más eficaz, pero su construcción es complicada ya que el pistón debe de tener dos bielas y permitir el paso del vástago que mueve el desplazador.

2.5.3 Motor tipo Gamma

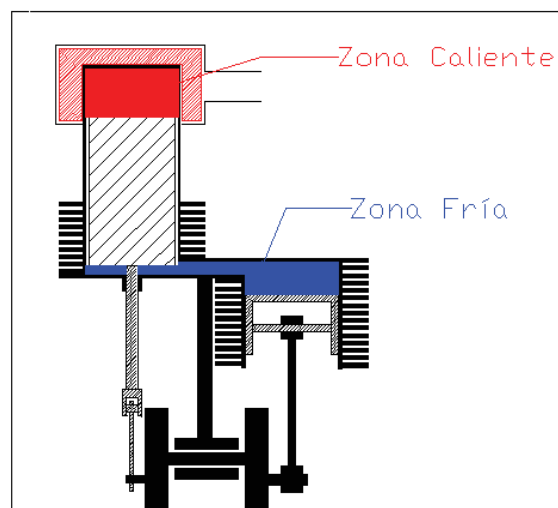


figura 2.5 Esquema de motor tipo Gamma

Este tipo está derivado del beta, pero es más sencillo de construir.

Consta de dos cilindros separados en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en otro el pistón de potencia (los sistemas para enfriar y calentar son idénticos a los del tipo beta).

El pistón de potencia es mucho más sencillo de construir ya que es similar al de un motor de motocicleta. Aquí el pistón y el desplazador también deben moverse desfasados 90 grados, lo cual se consigue mediante el cigüeñal adecuado (ver fig 2.8).

Desde el punto de vista termodinámico es menos eficaz que el tipo beta , puesto que la expansión de trabajo se realiza en su totalidad a menor temperatura.¹³

2.6 Aplicaciones del Motor Stirling

Se ha reconocido que el potencial de las maquinas con ciclo Stirling es muy alto por eso, luego de estar olvidado por mucho tiempo, actualmente grandes empresas han puesto su mirada en él y poco a poco le están abriendo un espacio en la industria.

¹³ <http://personales.able.es/jgros/gamma.htm>

2.6.1 Uso del motor Stirling en el campo automotriz

Una de las mayores dificultades para utilizar motores Stirling en vehículos no híbridos es que no se ha logrado construir uno de estos motores logre partir instantáneamente, dadas las bondades del motor Stirling, se está desarrollando mucha investigación en el mundo para analizar la conveniencia de utilizarlo como fuente motriz en vehículos híbridos.

A pesar de estas limitaciones, Ford, GM, 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 salir andando (con una potencia relativamente baja) 20 segundos después de que se le de partida. Esta investigación perdió interés debido a que los motores de combustión interna suplieron las necesidades de aquel entonces a precios muy bajos por el costo de los combustibles.

El automóvil AMC Spirit del año 1979 el cual estaba equipado con un motor Stirling experimental de planta llamado el "P-40". Este auto era capaz de quemar bencina, petróleo o un tipo de gas.

El motor Stirling P-40 prometía una baja polución, una mejoría del 30% en rendimiento (Km/lt), y un igual desempeño que el motor estándar de combustión interna.

El gigante estadounidense GM (General Motors Company), está actualmente construyendo y desarrollando motores Stirling como parte de un contrato con el Departamento de Energía de Estados Unidos para desarrollar un sistema de propulsión híbrido para sus vehículos en el futuro. El equipo de la GM desarrolló en 1998 un prototipo de automóvil llamado Gen2 Stirling el motor Stirling desarrollado por GM usa hidrógeno como fluido de trabajo.¹⁴

2.6.2 Uso del motor Stirling en la generación eléctrica

En los últimos tiempos el motor Stirling está siendo objeto de estudio para la producción de energía, se han enfocado varios modelos pero el que mas promesas trae es la fusión de un espejo parabólico con un motor Stirling para aprovechar la energía solar.

En octubre de 2006 se ha firmado un contrato para construir la mayor planta solar del mundo en el desierto Mojave, 1.821 hectáreas, con discos parabólicos de 11 m de diámetro, que usan el motor Stirling.

Después de 20 años de desarrollo, al fin la tecnología termo-solar pisa fuerte en el terreno comercial.

“Se trata de dos proyectos con capacidad conjunta de 800 MW, basados en espejo parabólico-motor Stirling, desarrollados por Stirling Energy Systems (SES), una empresa de Phoenix, Arizona (ver fig 2.11).

¹⁴ http://paisa_macao.tripod.com/paginas2/inf.varia7.htm

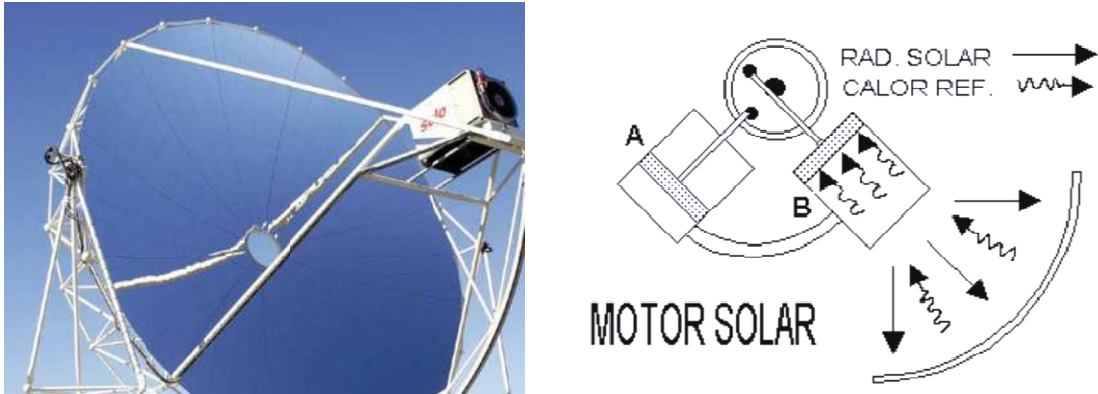


figura 2.6 Colector parabólico con motor stirling¹⁵

El Stirling de SES tiene 4 cilindros, con su pistón. Sin válvulas. Como fluido de trabajo emplea hidrógeno, debido a su bajo peso molecular, baja viscosidad, alta conductividad térmica y su calor específico. También se puede emplear aire, cuando el suministro de hidrógeno no está asegurado, pero termodinámicamente es menos eficiente.

La energía producida por los 20.000 espejos parabólicos de la planta será capaz de generar 800 MW.

La planta juega con la ventaja de que el sistema híbrido, espejo-Stirling, o disco-Stirling, (20.000 espejos parabólicos) rinde más que los espejos cilindro-parabólicos, que emplean la energía solar para calentar agua y mover la turbina de vapor, y mayor eficiencia también que las células fotovoltaicas.

SES inició su investigación el año 1984, y ha logrado la marca mundial de rendimiento en convertir la energía solar en electricidad con calidad de red, con un factor de conversión, según SES, superior al 29%.

Según el cálculo de SES, para una planta solar de 1 GW, el sistema genera la energía a un coste competitivo con la generación convencional fotovoltaica.”¹⁵

2.6.3 Uso del motor Stirling en la Refrigeración

La refrigeración con un máquina Stirling es posible mediante una configuración inversa del ciclo normal. Una de las posibles aplicaciones podría ser en la refrigeración de centrales de Carbón y Nucleares. De las turbinas de vapor de estas centrales sale vapor con una considerable energía térmica (para evitar daños en los alabes de las turbinas no se puede condensar gotas de agua en las mismas), que tiene que ser condensado. La energía que se libera en esta condensación podría ser aprovechada por un motor Stirling para generar electricidad reduciendo las necesidades de refrigeración.

2.6.4 Uso del motor Stirling para bombeo de agua

Al convertir la energía térmica en mecánica, un motor Stirling puede ser usado para la bombeo de agua aprovechando el calor solar u otra fuente de calor alternativa. Esta sería una opción adecuada para bombeo en zonas aisladas ya que al no consumir electricidad puede ubicarse donde sea necesaria.

¹⁵ <http://www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.html>

2.7 Ventajas y Desventajas.

Se enumeraran algunas de las ventajas y desventajas de los motores Stirling frente a sus competidores en el campo de la movilización, generación de energía, y refrigeración.

Sus principales ventajas son:

- Posee una baja cantidad de elementos móviles, sobre todo en comparación con los motores de combustión interna, lo que permite pérdidas muy bajas de rendimiento por fricción.
- El hecho de que el ciclo sea cerrado hace que potencialmente se puedan obtener niveles muy bajos de emisiones.
- Dado que es un motor de combustión externa, este proceso de combustión se puede controlar muy bien, con lo que se reducen las emisiones.
- Como recibe calor del exterior, este se pueden conseguir de varias fuentes, como por ejemplo energía nuclear, energía solar y combustibles fósiles, entre otras.
- El bajo nivel de ruido y la ausencia de vibraciones con que opera.

- En el área de la refrigeración, puede aprovechar el calor que se pierde por calderas y hornos, para utilizarlo en la generación de energía eléctrica o refrigeración, reduciendo los costos destinados a este fin.

Sus principales desventajas son:

- Baja densidad de potencia debido a la combustión externa, lo que condiciona su tamaño.
- Dificultad en lograr un sello permanente durante toda la vida útil, lo que eleva su costo.
- Falta de experiencia en la construcción de este tipo de motores.
- Al ser el fluido de trabajo gaseoso, acarrea dificultades operativas. Los fluidos realmente viables debido a sus buenas propiedades termodinámicas son el helio y el hidrógeno.
- Largo tiempo de encendido y apagado del motor.
- Se requieren grandes superficies de intercambios de calor, lo que hace aumentar desmesuradamente su tamaño en comparación con los motores de combustión interna.

CAPITULO III

DISEÑO DEL MOTOR STIRLING EXPERIMENTAL

Previo al diseño, se hará un análisis de los procesos termodinámicos que ocurren en el ciclo.

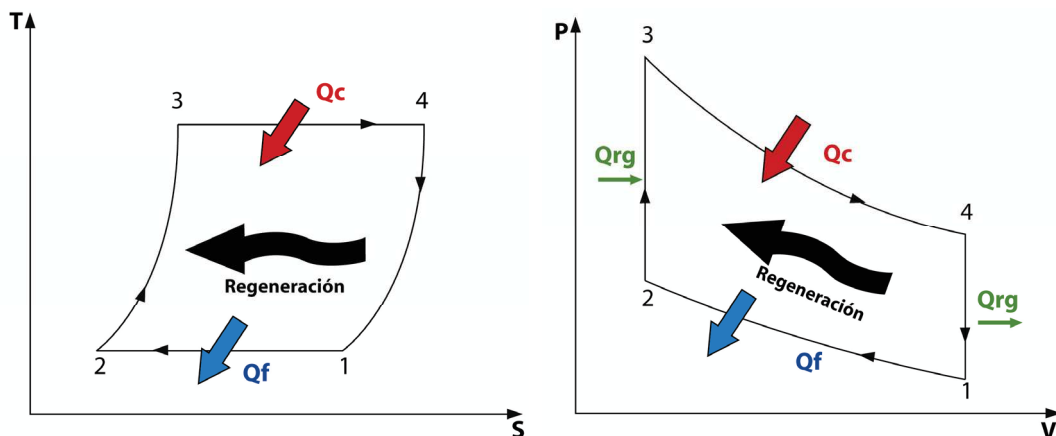


figura 3.1 Diagrama Temperatura – Entropía y Presión - Volumen

Se inicia el análisis identificando los puntos en el diagrama P-V (ver figura 3.1) .

El cilindro contiene la masa del fluido de trabajo, que se encuentra a temperatura T_1 . La tapa inferior del cilindro está en contacto con la fuente de calor, por lo tanto, es el único lugar por el cual el calor puede entrar al sistema, el mismo que se encuentra a una temperatura constante T_2 . El calor fluye del cuerpo caliente hacia el gas de trabajo contenido en el cilindro, por lo que, posteriormente, experimentará un proceso isotérmico en el segmento 3-4, durante el cual el émbolo se moverá desde su extremo superior hasta su extremo inferior.

A continuación, el desplazador o regenerador se sitúa en su posición inferior, ubicándose en contacto con la tapa inferior que está expuesta a la fuente de calor de este modo, se desplaza el fluido hacia la zona fría evitando que exista transmisión de calor.

Debido al trabajo que se está haciendo a expensas de la energía interna, el émbolo se mueve desde su posición inferior hasta la superior en el segmento 3-4 (ver figura 3.1 pag.34), y posteriormente sucede el cambio isentrópico en el segmento 4-1. En este la temperatura baja desde T_2 hasta T_1 . Cuando el émbolo llega al final de la carrera en la posición superior, el desplazador (regenerador) se traslada hacia arriba alejándose de la tapa inferior, hacia la zona fría, y desplazando el fluido a la zona caliente, que permanece a una temperatura constante T_2 y transfiriéndola al fluido.

La isoterma en el segmento 1-2 sucede mientras el émbolo se mueve desde el extremo superior hacia el inferior; el desplazador se coloca nuevamente sobre la tapa superior, y la compresión isentrópica retorna al fluido, llevando al sistema a su estado inicial.

En la práctica, el calor fluirá para una diferencia de temperaturas ΔT y, por tanto, el movimiento del pistón y la intensidad o velocidad con que realizaría el trabajo será resultado del diferencial térmico. La diferencia de temperatura impide la reversibilidad interna. El rozamiento mecánico del pistón y de las

partes móviles, el rozamiento interno debido a la turbulencia dentro del fluido y el calor transmitido por las paredes del cilindro también impide la reversibilidad en cualquier máquina real¹⁶.

3.1 Elementos del Motor

El motor Stirling es una máquina de ciclo cerrado, esto quiere decir, que el fluido de trabajo no aumenta ni disminuye, por lo tanto el mecanismo debe ser hermético, funciona con una fuente de calor externa. Se caracteriza fundamentalmente por tener una zona fría y una zona caliente, y el fluido de trabajo, que en este caso es aire, se trasvasa desde la zona fría a la caliente (y viceversa), mediante un desplazador, aprovechando las propiedades de expansión y contracción de gases para generar trabajo.

En el cilindro del motor está contenida la masa de trabajo (aire), que al calentarla aumenta su presión, produciendo una fuerza que se aprovecha mediante una membrana o pistón que la transmite al exterior; de la misma manera, al enfriarse el fluido, su presión disminuye y se produce una succión, que se transmite al pistón. Esta fuerza generada por la expansión y contracción del fluido de trabajo, transforma la energía térmica en energía mecánica.

¹⁶ TERMODINAMICA Faires. / Virgil Morgan Faires 5^a edición pag. 132

Para que el motor aproveche esta energía térmica, el mecanismo del motor debe tener los siguientes elementos:

- Un desplazador, que mueva la masa de aire o fluido de trabajo; de tal manera que pase de la zona fría a la caliente y viceversa, con el fin de calentar o enfriar el fluido cíclicamente.
- Un pistón o membrana, que transmita estas diferencias de presiones al exterior y sincronice el movimiento del desplazador.

El sincronismo se logra mediante una configuración de bielas y manivelas, las que deben estar desfasadas aproximadamente 90° , y acopladas a un volante de inercia, que guarde la energía para ser usada en los puntos muertos, permitiendo un ciclo continuó.

Se debe recordar que:

- El desplazador únicamente sirve para mover el fluido del lado frío al caliente y viceversa, por lo tanto no entrega ningún trabajo útil al exterior.
- El pistón es el elemento que entrega trabajo útil, y también acciona (indirectamente) al desplazador para realizar el ciclo.

- Además es necesario la volante que ayudará a almacenar energía cinética y utilizarla en los puntos muertos.
- Deben existir dos zonas; caliente y fría que deben ser separadas mediante el desplazador, el cual no debe ser en lo posible conductor térmico.
- El cilindro donde estará el fluido de trabajo, debe evitar que se igualen las temperaturas en las zonas caliente y fría, por esto de preferencia debe ser aislante térmico; esta es una de las principales características para aprovechar el principio fundamental de funcionamiento que es el diferencial térmico.

Los motores construidos hasta la actualidad se encuentran en una etapa experimental, y por esta razón, una maquina de ciclo Stirling, es una tecnología sujeta a varios cambios, experimentaciones y modificaciones.

No existen conclusiones definitivas en cuanto al diseño y dimensionamiento estandarizado para la construcción del motor, por esto, como ayuda para el diseño y construcción del motor definitivo para esta tesis, se utilizo un motor experimental, construido previamente. Con este motor se pudo experimentar, calibrar y someter a varias pruebas de funcionamiento, diseño y variación de temperaturas.

Los resultados obtenidos de este modelo previo, ayudó al dimensionamiento el modelo definitivo.

3.2 Cálculo termodinámico del Motor Stirling.

En los próximos puntos se planteará el cálculo del motor Stirling. Se aplicarán los siguientes conceptos e hipótesis:

- El fluido de trabajo en el interior del motor se comporta como gas ideal.
- Los volúmenes muertos son cero.
- Se trabajara en condiciones atmosféricas.

Se iniciara el cálculo identificando los valores conocidos para cada punto de los diagramas presión-volumen y temperatura-entropía. (ver figura 3.1 pag 34)

Por motivos de cálculo, se asignará, como temperatura máxima 70°C y como temperatura mínima, 20°C que nos da un diferencial de 50°C . Se debe recordar que el funcionamiento del motor se basa en el diferencial de temperatura y mientras mayor sea esta diferencia, mejora la eficiencia del ciclo. Para lograr este diferencial se usó una resistencia eléctrica, la que está en contacto con la tapa inferior y disipadores de calor en la tapa superior que constituye la zona fría. En condiciones reales de operación de un motor Stirling, la fuente de calor puede ser de varios tipos como solar o geotermal.

A continuación se calculara el volumen máximo y mínimo.

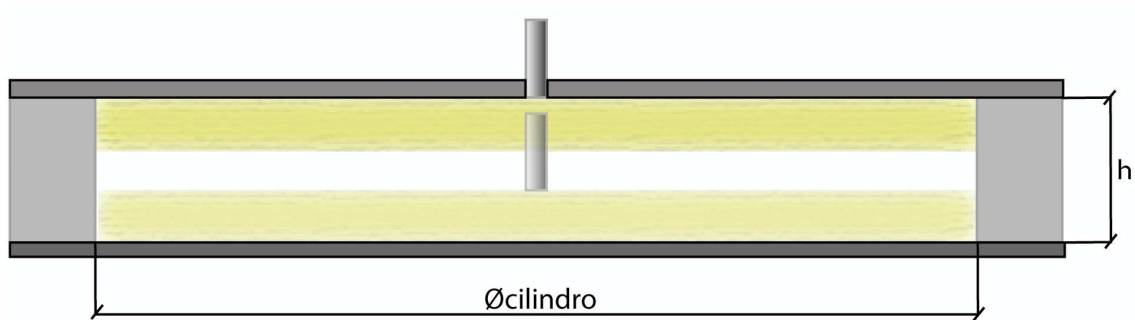


figura 3.2 Esquema del cilindro del motor

Se considera la mitad de la altura $h/2$ tomando en cuenta el volumen del desplazador; $r = \text{Øcilindro}/2 = 0,09$ [m] y $h: 0,034$ [m] remplazando:

El volumen del cilindro es:

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \cdot r^2 \cdot h/2$$

EC 3.2.1

$$V_{\text{cilindro}} = 4,326 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

De tal manera al que: $V_{\text{cilindro}} = V_{\text{min}}$.

A continuación de calculara el volumen del pistón, para conocer el volumen máximo.

Sabiendo que el pistón de trabajo tiene 1,4 cm de diámetro y 1 cm de carrera.

El nuevo volumen máximo ocurrirá al extremo superior de la carrera del pistón.

Donde:

$$V_{\text{cilindro}} = 4,326 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$r_{\text{piston}} = \varnothing \text{Piston} / 2 = 0,007 \text{ [m]}$$

$$L = 0,01 \text{ [m]}$$

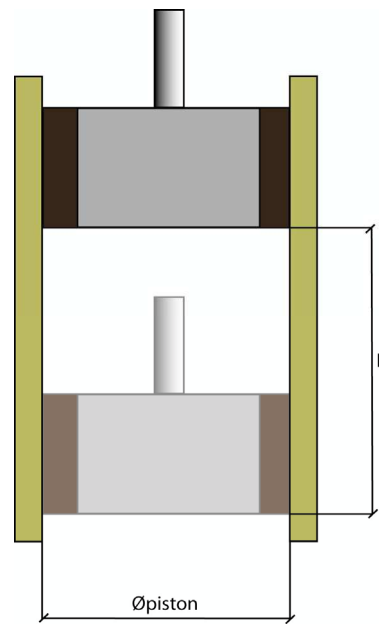


figura 3.3 Esquema del pistón del motor

Por lo tanto, el volumen máximo (V_{max}) de fluido es:

$$V_{\text{Max}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{piston}}$$

EC 3.2.2

$$V_{\text{pistón}} = \pi \cdot r_{\text{piston}}^2 \cdot L$$

EC 3.2.3

$$V_{\text{pistón}} = 1,5394 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Remplazando la EC 3.2.2 se tiene:

$$V_{\text{Max}} = 434,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Mediante las gráficas presión-volumen y temperatura-entropía (ver figura 3.1 pag 34) correspondientes al ciclo de Carnot se puede decir que:

Los Volúmenes $V_1=V_4$ y $V_2=V_3$

Las Temperaturas $T_1=T_2$ $T_3=T_4$

A partir de los volúmenes calculados anteriormente se puede generar la siguiente tabla con los valores conocidos:

Tabla 3.1 temperaturas y volúmenes del ciclo

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Volumen [m ³]	$434,14 \times 10^{-6}$	$432,6 \times 10^{-6}$	$432,6 \times 10^{-6}$	$434,14 \times 10^{-6}$
Temperatura [°K]	293	293	343	343

3.2.1 Cálculo de Presiones.

A continuación se calcularán las presiones en cada punto del ciclo.

Partiendo de la ecuación:

$$\frac{P_1 * V_1}{R * T_1} = \frac{P_2 * V_2}{R * T_2} \quad 17 \quad \text{EC 3.2.4}$$

Se iniciará el cálculo de presiones, ubicando al sistema, en un punto de partida conocido.

¹⁷ Termodinámica Faires / Virgil Moring Faires pag. 80

El punto inicial escogido cumple con las siguientes características:

- Tener el volumen mínimo, por lo tanto el pistón debe estar en su posición inferior.
- Tener la temperatura mínima de trabajo; al operar en condiciones normales, se estima como temperatura mínima la ambiental, con un promedio de 20°C.
- La presión inicial del ciclo será la presión atmosférica.

Tomando en cuenta las condiciones iniciales mencionadas anteriormente, se iniciará el cálculo en el punto 2, al que se asigna las características planteadas anteriormente y por lo tanto sus valores son conocidos.

Datos para las condiciones iniciales de trabajo en el punto 2.

Punto 2:

Dado que se conocen los valores iniciales en este punto, se puede decir que:

Tabla 3.2 temperaturas, volúmenes y presión del punto 2

Volumen ₂ [m ³]	432,6*10 ⁻⁶
Temperatura ₂ [°K]	293
Presión ₂ [Pa]	101325

3.2.2 Proceso térmico 2 – 3.

En este proceso, el gas de trabajo recibe calor de la fuente caliente externa, este proceso ocurre a volumen constante $V_2 = V_3$, por lo tanto, no existe trabajo útil, pero incrementa la energía interna del gas de trabajo aumentando la presión. (ver fig 3.4).

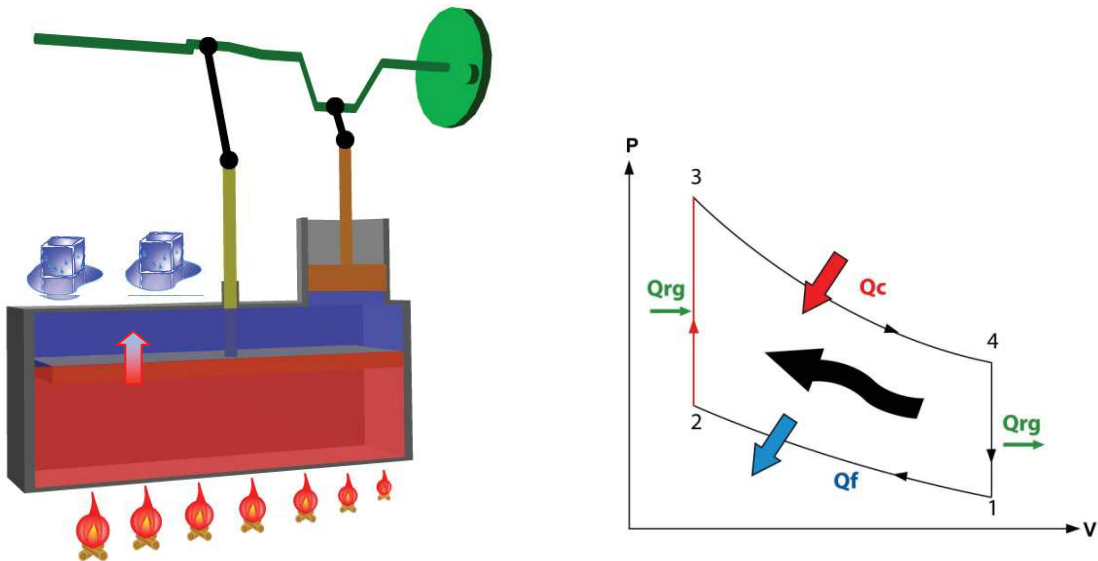


figura 3.4 Esquema de funcionamiento del motor en la etapa 2-3

Para el cálculo de la presión en el punto 3, primero se determinaran sus características para el planteo de la ecuación, las que serían: $V_2 = V_3$ y $T_3 = T_4$

Aplicando el EC 3.2.4 y $V_2 = V_3$ podemos simplificar:

$$\frac{P_2 * V_2}{R_o * T_2} = \frac{P_3 * V_3}{R_o * T_3}$$

El valor de "Ro" es la constante universal de los gases.

Por lo tanto P_3 sería:

$$P_3 = \frac{P_2 * T_3}{T_2}$$

Donde:

P_2 : 101325 [Pa]

T_2 : 293 [°K]

T_3 : 343 [°K]

$$P_3 = 1,186 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Entonces podemos llenar los valores de la tabla:

Tabla 3.3 temperaturas, volúmenes y presión del punto 3

Volumen ₃	[m ³]	$432,6 \times 10^{-6}$
Temperatura ₃	[°K]	343
Presión ₃	[Pa]	$1,186 \times 10^5$

3.2.3 Proceso térmico 3 - 4.

En este proceso se produce un aumento de volumen o expansión isotérmica del fluido, disminuyendo la presión y generando un trabajo útil. (ver fig 3.5).

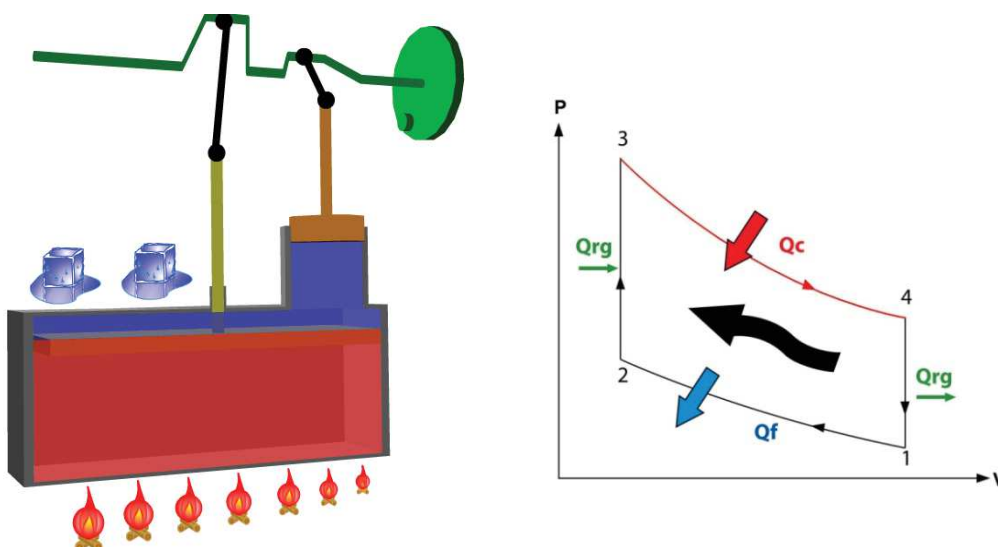


figura 3.5 Esquema de funcionamiento del motor en la etapa 3-4

Las características de este punto para el planteo de la ecuación, serian:

$V_1 = V_4$ y $T_3 = T_4$. Por lo tanto, la presión en el punto 4 se calcula como:

Aplicando el EC 3.3.4 y $T_3 = T_4$ tenemos:

$$\frac{P_3 * V_3}{R_o * T_3} = \frac{P_4 * V_4}{R_o * T_4}$$

El valor de "Ro" es la constante universal de los gases.

Por lo tanto P_4 seria:

$$P_4 = \frac{P_3 * V_3}{V_4}$$

EC 3.2.6

Donde:

$$P_3 : 1,186 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$V_3: 432,6 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_4: 434,14 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$P_4 = 1,182 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Entonces los valores de la tabla serán:

Tabla 3.4 temperaturas, volúmenes y presión del punto 4

Volumen ₄	[m ³]	434,14x10 ⁻⁶
Temperatura ₄	[°K]	343
Presión ₄	[Pa]	1,182 x 10 ⁵

3.2.4 Proceso térmico 4 - 1

Este es un proceso que ocurre sin variación de volumen, donde el fluido de trabajo entrega calor al regenerador, disminuyendo su temperatura del máximo valor al mínimo, y reduciendo su energía interna, y presión del sistema sin realizar trabajo. (ver fig 3.6).

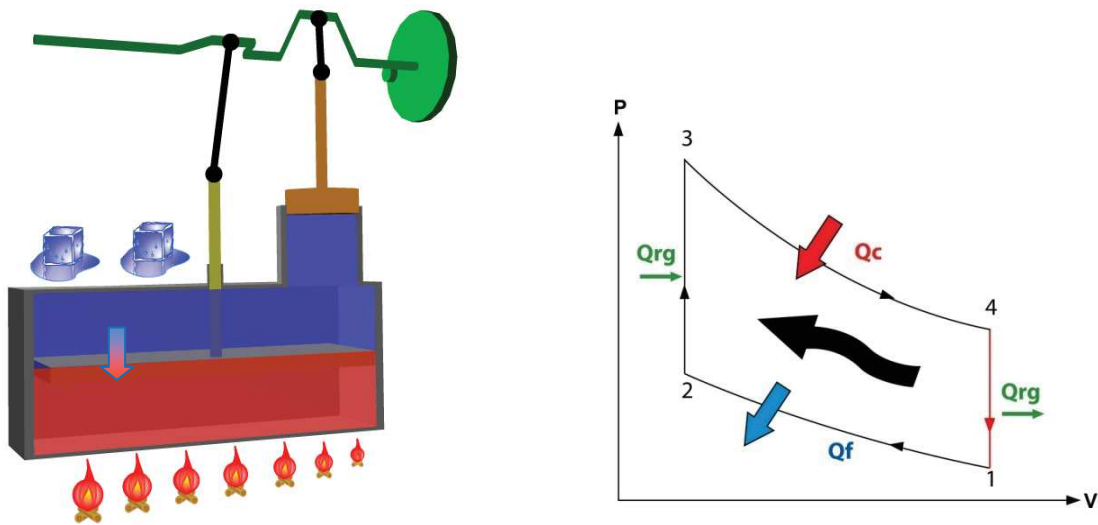


figura 3.6 Esquema de funcionamiento del motor en la etapa 4-1

Para el cálculo en el punto 1, las características, serian: $V_1 = V_4$ y $T_1 = T_2$.

Este proceso ocurre sin variación de volumen, por lo tanto se puede decir que:

Aplicando el EC 3.3.4 y $V_1 = V_4$ tenemos:

$$\frac{P_4 * V_4}{R_{\sigma} * T_4} = \frac{P_1 * V_1}{R_{\sigma} * T_1}$$

Entonces P_1 sería igual a:

$$P_1 = \frac{P_4 * T_1}{T_4}$$

EC 3.2.7

Donde:

$$P_4 : 1,182 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$T_1 : 293 \text{ [°K]}$$

$$T_4 : 343 \text{ [°K]}$$

$$P_1 = 1,009 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Entonces:

Tabla 3.5 temperaturas, volúmenes y presión del punto 1

Volumen ₁	[m ³]	434,14x10 ⁻⁶
Temperatura ₁	[°K]	293
Presión ₁	[Pa]	1,009 x 10 ⁵

Como se puede apreciar en esta etapa del ciclo, la presión en el cilindro es menor a la atmosférica, por lo tanto existe una pequeña fuerza de succión para la carrera de bajada del pistón. Esto ocurre ya que el punto de arranque del motor fue a mínimo volumen y presión atmosférica.

3.2.5 Proceso 1 - 2.

En este proceso, regenerador se encuentra en el extremo inferior, por lo tanto el fluido está en contacto con el foco frío, esto disminuye al máximo su temperatura y genera una succión y ocurriendo una compresión isoterma, esto se traduce trabajo útil y el sistema regresa a su posición inicial. (ver fig 3.7).

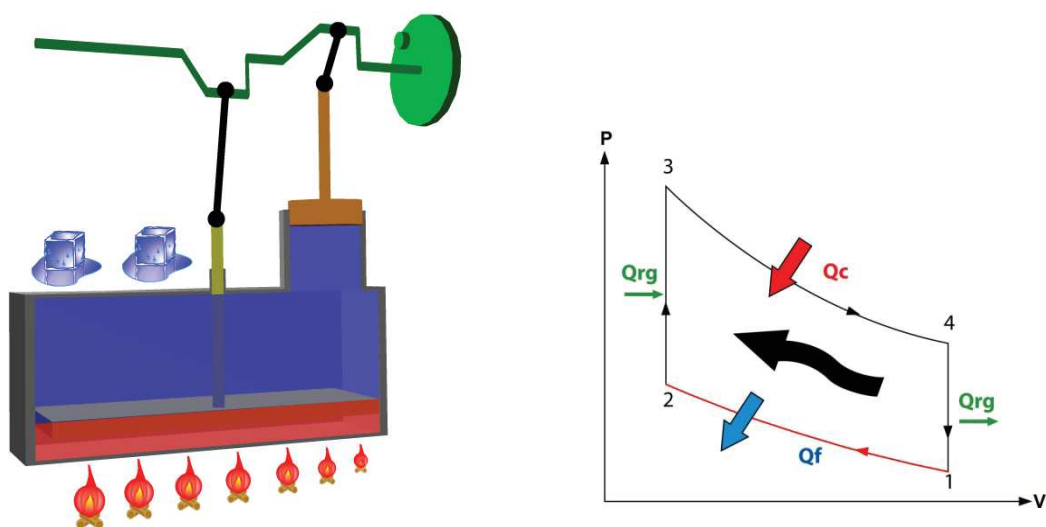


figura 3.7 Esquema de funcionamiento del motor en la etapa 1-2

Con los valores de presión calculados, es posible completar la tabla:

Tabla 3.6 Presiones, temperaturas y volúmenes del ciclo

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Volumen [m ³]	434,14 x 10 ⁻⁶	432,6 x 10 ⁻⁶	432,6 x 10 ⁻⁶	434,14 x 10 ⁻⁶
Temperatura [°K]	293	293	343	343
Presión [Pa]	1,009 x 10 ⁵	1,01325 x 10 ⁵	1,186 x 10 ⁵	1,182 x 10 ⁵

3.3 Análisis de Disponibilidad

La disponibilidad se define como el trabajo máximo útil que puede aprovechar un sistema no fluente.

Esto quiere decir que no se puede aprovechar la totalidad de la energía calórica entregada por la fuente externa para la producción de energía mecánica.

Para definir la disponibilidad de un sistema es necesario calcular el cambio de la entropía y hacer la diferencia entre la energía entregada al sistema y la perdida.

3.3.1 Cambio de la Entropía

Mediante el cálculo de la entropía se podrá determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.

$$\Delta s = m * R * \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right) \quad 18$$

EC 3.3.1

Previo al cálculo de la entropía es necesario estimar la masa del fluido de trabajo que en este caso se lo realizara con aire.

¹⁸ Termodinámica Faires / Virgil Moring Faires pag. 61

Masa de fluido

Ahora se procede a calcular la masa del fluido de trabajo. Usaremos una temperatura media de $20^{\circ}\text{C} = 293^{\circ}\text{K}$. Para ello aplicamos la ecuación de estado de gases ideales a presión atmosférica $1\text{atm} = 101325\text{ Pa}$ entonces:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

EC 3.3.2

Donde despejamos la masa del fluido de trabajo (m) de la formula EC3.3.2 y tenemos:

$$m = \frac{P_{\text{atm}} \cdot V_{\text{cilindro}}}{R \cdot T_{\text{amb}}}$$

EC 3.3.3

Donde:

$$P_{\text{atm}} : 1,01325 \cdot 10^5 [\text{Pa}]$$

$$V_{\text{cilindro}} : 4,326 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3]$$

$$R_o : \text{Constante de la ecuación de estado del aire seco} = 287 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{K}} \right]$$

$$T_{\text{amb}} : 293 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

$$m = 5,212 \cdot 10^{-4} [\text{Kg}]$$

Ya obtenido el valor de la masa de trabajo, se procede a remplazar la ecuación 3.3.1 para encontrar la variación de la entropía del sistema.

Donde:

$$V_3 : 432,6 \times 10^{-6} [\text{m}^3]$$

$$V_4 : 434,14 \times 10^{-6} [\text{m}^3]$$

$$m : 5,212 \times 10^{-4} [\text{Kg}]$$

$$\Delta s = 5,315 \times 10^{-4} \text{ J/}^{\circ}\text{K}$$

3.3.2 Calor Suministrado

Se procede a calcular el calor entregado desde la fuente externa hacia el motor en la etapa 3-4.

$$Q_{3-4} = m * R_o * T_3 * \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)$$

19

EC 3.3.4

Donde:

$$V_3 : 432,6 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_4 : 434,14 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m : 5,212 \times 10^{-4} \text{ [Kg]}$$

$$T_3 : 343 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$R_o : R_o : \text{Constante de la ecuación de estado del aire seco} = 287 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}} \right]$$

$$Q_{3-4} = 0,1823 \text{ J}$$

3.3.3 Calor Rechazado

No todo el calor entregado al sistema es aprovechada para producir energía mecánica, hay una cantidad que calor que es rechazada por el sistema por lo tanto la cantidad de energía entregada será menor a la obtenida.

$$Q_{1-2} = m * R_o * T_1 * \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

EC 3.3.5

¹⁹ Termodinámica Faires / Virgil Moring Faires pag. 137

Donde:

$$V_1 : 434,14 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_2: 432,6 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m : 5,212 \times 10^{-4} \text{ [Kg]}$$

$$T_1 : 293 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$R_0: R_0: \text{Constante de la ecuación de estado del aire seco} = 287 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}} \right]$$

$$Q_{1-2} = 0,155 \text{ J}$$

3.3.4 Calor Aprovechado

El calor que aprovecha el sistema se calcula obteniendo la diferencia entre el calor suministrado al sistema y el rechazado por el mismo.

$$Q_{\text{Disp}} = Q_{3-4} - Q_{1-2}$$

EC 3.3.6

Donde:

$$Q_{3-4} : 0.1823 \text{ [J]}$$

$$Q_{1-2}: 0.1557 \text{ [J]}$$

$$Q_{\text{Disp}} = 0,0265 \text{ J}$$

Esta energía disponible es la resultante para un diferencial de temperaturas de 50°C, la energía disponible es directamente proporcional al diferencial de temperaturas ya que mientras mayor sea el área contenida entre los puntos 1,2,3,4 del diagrama T-S (ver pag 36) la energía disponible aumenta.

3.4 Trabajo Realizado

El trabajo realizado por el motor Stirling, es la suma algebraica de los procesos individuales que ocurren en el sistema, conociendo que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma, se puede señalar que toda la energía que entra es la misma que sale. $W_{\text{entra}} + Q_{\text{entra}} = W_{\text{sale}} + Q_{\text{sale}}$ por lo tanto se puede decir que $\Sigma W = W_{\text{entra}} - W_{\text{sale}}$ o $\Sigma Q = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sale}}$. Donde las Q y las W se evalúan para todos los procesos del ciclo.

En este caso, el trabajo realizado esta dado el desplazamiento del pistón, es decir por la variación del volumen.

El diagrama Presión-Volumen muestra claramente las variaciones de volumen, y los procesos en los que estas suceden los cuales son 1-2 y 3-4 (ver fig 3.6).

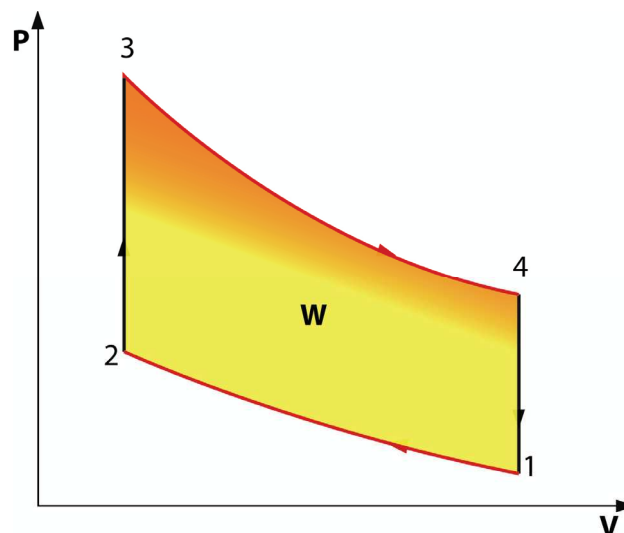


figura 3.8 Trabajo en diagrama P-V

La ecuación EC3.4.1 nos servirá para encontrar el trabajo para un proceso isotérmico²⁰

$$W = P_1 * V_1 * \ln \frac{V_2}{V_1}$$

EC 3.4.1

Remplazando la ecuación EC3.4.1 para la variación del volumen tenemos:

$$W_{3-4} = P_3 * V_3 * \ln \frac{V_4}{V_3}$$

EC 3.4.2

Donde (Ver tabla 3.6):

$$P_3 : 1,18616 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$V_3 : 432,6 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_4 : 434,14 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$W_{3-4} = 0,1823 \text{ [J]}$$

Y para el trabajo en el proceso 1-2 tenemos:

$$W_{1-2} = P_1 * V_1 * \ln \frac{V_1}{V_2}$$

EC 3.4.3

Donde (Ver tabla 3.6):

$$P_1 : 1,0096 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$V_1 : 434,14 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_2 : 432,6 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$W_{1-2} = 0,1557 \text{ [J]}$$

²⁰ Termodinámica Faires / Virgil Moring Faires pag. 134

El trabajo total realizado por el ciclo es:

$$W_{\text{Total}} = W_{1-2} + W_{3-4}$$

EC 3.4.4

$$W_{\text{Total}} = 0,338 \text{ [J]}$$

3.5 Eficiencia del Motor Stirling

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

El rendimiento de un motor térmico es la relación existente entre el trabajo producido y el calor absorbido.

$$\eta = \frac{W_{\text{total}}}{Q_1}$$

EC 3.5.1

El trabajo producido será:

$$W_{\text{total}} = Q_1 - |Q_2|$$

EC 3.5.2

El calor absorbido es Q_1 . El rendimiento térmico del ciclo será:

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

EC 3.5.3

El proceso 1-2 se produce a temperatura constante por lo que Q_1 será:

$$Q_1 = W_{12} = \int_1^2 P dV$$

EC 3.5.4

Como trabajamos con una gas ideal se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad ^{21} \quad \text{EC 3.5.5}$$

Sustituyendo EC 3.5.5 en la integral de EC 3.5.4 obtenemos:

$$Q_1 = \int \frac{m \cdot R \cdot T}{V} dV \quad \text{EC 3.5.6}$$

$$Q_1 = m \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \text{EC 3.3.7}$$

De igual manera llegamos a la conclusión de que:

$$Q_2 = m \cdot R \cdot T_{min} \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \text{EC 3.5.8}$$

El rendimiento será:

$$\eta = \frac{m \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} - m \cdot R \cdot T_{min} \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}}{m \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln \frac{V_4}{V_3}} \quad \text{EC 3.5.9}$$

Como se puede ver en la figura 3.8 pag 53, en el diagrama P-V se puede simplificar la ecuación EC 3.5.9 y se tiene que

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{Q_{salida}}{Q_{entrada}} \quad \text{EC 3.5.10}$$

²¹ Termodinámica Faires / Virgil Moring Faires pag. 80

Que es igual a la eficiencia de Carnot²².

Donde:

$$T_{\max}: 343 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$T_{\min}: 293 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$\eta = 0,145$$

$$\text{Eficiencia} = 14,5 \%$$

El ciclo Stirling teórico es totalmente reversible como lo es el ciclo de Carnot, por lo tanto su eficiencia térmica se calcula tomando en cuenta los límites de temperatura.

El rendimiento es susceptible de incrementar si el gradiente de temperatura aumenta, si la presión media aumenta o si las revoluciones aumentan. en este caso se trabajo para un ΔT de 50°C por motivos de experimentación.

También puede mejorar si las propiedades termodinámicas del fluido mejoran. El mismo cálculo lo podemos realizar para diferencias de temperatura menores, en vista de nuestro objetivo de diseño.

²² TERMODINAMICA Tomo II. Yunus A. Cengel / Michael A. Boles. Editorial Mc Graw Hill pag 471

3.6 Disipadores de calor

Con los disipadores de calor se lograra un mejor funcionamiento del motor porque permiten un rápido desalojo del calor en la zona fría y por lo tanto un mayor diferencial térmico entre las dos zonas. Aunque se puede prescindir de su uso en este caso.

El uso de los disipadores depende directamente de la potencia de las niquelinas o la fuente de calor que se le administrara al sistema, lo importante para el funcionamiento de este motor como se menciona anteriormente es tener una diferencia térmica de 30°C aproximadamente mientras sea mayor el diferencial, mejora su eficiencia.

Al ser un modelo experimental, cabe resaltar que se sobre dimensiono a los disipadores de calor para trabajar a distintas condiciones al existir tres disipadores se puede alternar su uso y variar el área de contacto con el aire cambiando así las condiciones del funcionamiento.

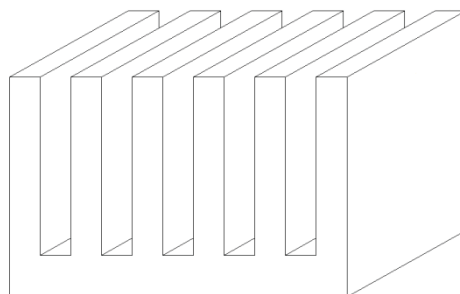


figura 3.9 Disipador de calor

3.7 Pérdidas Térmicas

En su funcionamiento real el motor tiene una serie de irreversibilidades, que provocan pérdidas energéticas y hacen que su rendimiento no alcance el máximo que teóricamente puede obtener.

Nuestro motor Stirling utiliza el calor suministrado por una resistencia eléctrica para funcionar (fuente de calor externa). Al tratarse de un motor con fines didácticos, el cilindro es de cristal con el fin de observar lo que ocurre en el interior del motor. Por este motivo gran parte del calor que suministra la resistencia es transmitido a través del cilindro, calentando los diferentes elementos que componen el motor y se encuentran próximos a dicha zona. El calor es transmitido por convección y radiación.

El procedimiento para el cálculo de pérdidas se lo realiza de forma práctica con la utilización de dinamómetros sujetos al eje mediante una banda, eso nos indica la fuerza del eje y posteriormente se realiza una comparación de la eficiencia calculada y la real. En el motor construido resulta muy complejo el cálculo de pérdidas debido a su tamaño. Por este motivo, se enumeraran las pérdidas que puede tener.

3.7.1 Pérdidas por Convección y Radiación

La convección es estrictamente un medio de mover energía de un lugar a otro. Ocurre debido a que un fluido en movimiento recoge energía de un cuerpo caliente y la entrega a un cuerpo más frío: Por ejemplo el aire que rodea la motor tiene menor temperatura, y por esta razón el motor entrega calor al ambiente.

Las pérdidas por radiación son muy pequeñas y no afectan significativamente al rendimiento del sistema; no así las pérdidas por convección, las que pueden variar según las condiciones externas de trabajo como la temperatura ambiental y humedad.

El calor que se disipa al medio ambiente fluye a través del cilindro, y de las tapas superior e inferior.

- *Pérdidas por la Tapa*

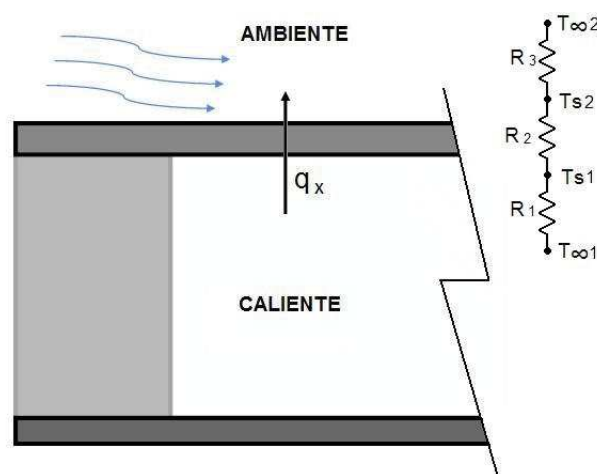


figura 3.10 Esquema de pérdidas de calor por la tapa superior

Como se muestra en la figura 3.11 el calor pasa a través de la tapa superior y se disipa al medio ambiente, para calcular la cantidad de calor que se pierde, primero se debe deducir la resistencia térmica de cada material que le lo realiza mediante un circuito térmico equivalente para calcular sus pérdidas.

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{A * h_1} * \frac{1}{A * k} * \frac{1}{A * h_2} \quad \text{EC 3.7.1} \quad ^{23}$$

La resistencia total se calcula mediante la ecuación 3.7.1

Las consideraciones analizadas para obtener el coeficiente de transferencia de calor h_1 , se las hizo en base al escenario del proceso, que en este caso se lo realizara bajo condiciones de convección libre por el cual se estimo un valor de $4 \text{ [W/}^\circ\text{K m}^2\text{]}^{24}$ el cual se encuentra dentro de un rango indicado en tablas referentes.

Para el cálculo de coeficiente de transferencia de calor h_2 se utilizo la siguiente fórmula:

$$h_2 = 5,7 + 3,8 v_{\text{viento}} \quad \text{EC 3.7.2} \quad ^{25}$$

Donde:

v_{viento} : 0,1 [m/s] velocidad del viento en el laboratorio

$$h_2 = 6,8$$

²³ FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR – Franc Incropera / David De Witt cuarta edición pag 75

²⁴ FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR – Franc Incropera / David De Witt cuarta edición tabla 1.1

²⁵ SISTEMA DE BIODEGRADACIÓN ACELERADA PARA LA REUTILIZACIÓN DE DESECHOS VEGETALES, CICTE-ESPE - Rodríguez Ramón 2006 pag 88 ec 5.53

Calculo de resistencias (ver fig. 3.10):

$$R_1: \text{Convección} = \frac{1}{A \cdot h_1}$$

$$R_2: \text{Conducción} = \frac{1}{A \cdot k}$$

$$R_3: \text{Convección} = \frac{1}{A \cdot h_2}$$

El valor de k es la conductividad térmica del material, en este caso es aluminio por lo que se tomo el valor de 238 [W/m°K]²⁶

Remplazando la ecuación 3.7.1 se tiene:

Donde:

$$h_1: 4 \text{ [W/m}^2 \text{ °K]}$$

$$h_2: 6,8 \text{ [W/m}^2 \text{ °K]}$$

A: es el área en contacto con el exterior = 0,0625 [m²] (ver anexo 2008.4.1.02)

$$R_{\text{total}} = 12,54$$

²⁶ FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR – Franc Incropera / David De Witt cuarta edición / tabla A1 pag 828

Posteriormente se procede el cálculo de Q_x que corresponde a la cantidad de energía disipada por la tapa.

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} \quad \text{EC 3.7.3}$$

$$q_x = 7,78 \text{ [W]}$$

- *Perdidas por el Cilindro*

El cilindro está construido de vidrio por lo cual su transferencia de calor es menor que la de las tapas.

Para simplificar el cálculo se considero a la pieza cilindro (ver anexo 2008.1.1.01) como una pieza cilíndrica, siendo necesario el cálculo de su radio externo equivalente a la forma de la pieza:

Radio externo " r_2 "

$$\text{Area} = 0,25 \times 0,25 = 0,0625 \text{ m}^2$$

$$\text{Area cilindro} = \pi r_2^2 = 0,0625 \text{ m}^2$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{A_{\text{cilindro}}}{\pi}}$$

$$r_2 = 0,141 \text{ [m]}$$

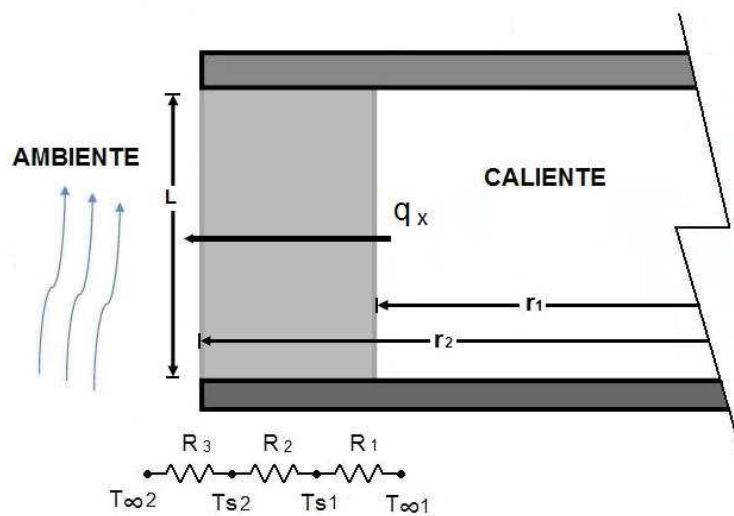


figura 3.11 Esquema de pérdidas de calor por la pared del cilindro

Seguidamente se procede a calcular las resistencias, como se muestra en la figura 3.11.

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_1 2 \pi r_1 L} * \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 k \pi L} * \frac{1}{h_2 2 \pi r_2 L}$$

EC 3.7.4

Donde:

h_1 : 4 [W/m² °K]

h_2 : 6,8 [W/m² °K]

A: es el área en contacto con el exterior = 0,0625 [m²] (ver anexo 2008.4.1.02)

El valor de k es el correspondiente a la conductividad del vidrio: k = 0,058 [W/m°K]²⁷

$$R_{\text{total}} = 24,048$$

²⁷ FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR – Franc Incropera / David De Witt cuarta edición / tabla A3 pag 834

A continuación se calcula Q_x que correspondiente a la cantidad de energía disipada por el cilindro reemplazando en la ecuación EC 3.7.3.

$$q_x = 0,96 [W]$$

La tapa inferior es la que alimenta d calor al sistema, por lo tanto no se calcula su perdida.

La pérdida total por convección es el resultante de la perdida ocurrida en el cilindro, no se considera a la convección ocurrida en la tapa superior ya que esta ayuda a mantener el diferencial térmico entere las dos zonas, mejorando la eficiencia del motor.

- *Perdidas por Fricción*

Las pérdidas por fricción ocurren cuando existe fricción o rozamiento entre dos superficies móviles. “Para tener en cuenta la perdidas ocurridas por rozamiento, los ingenieros usan generalmente números de rendimiento obtenidos gracias a la experiencia”²⁸. El frotamiento entre dos piezas, una con otra aumenta su temperatura, es decir que el trabajo se convierte en energía interna de las piezas y esta se elimina en forma de calor.

²⁸ Termodinámica Faires / Virgil Moring Faires pag. 71

El motor Construido tiene muy pocas partes móviles, por esta razón la energía que se pierde por fricción es mínima, y adicionalmente se la puede reducir utilizando un lubricante liviano.

Para poder calcular la potencia que consumen los rodamientos del motor se realizó el siguiente experimento.

Se midió la potencia que consume un motor eléctrico funcionando sin ningún acople. Posteriormente se midió la corriente que consume el motor eléctrico mediante un multímetro y el ruido generado con un osciloscopio.

La medición de ruido se la realizó debido a que las lecturas del multímetro suelen dar resultados erróneos por la presencia de ruido. Se determinó que la interferencia o ruido del motor podía ser despreciable sin afectar los resultados del multímetro.

A continuación el motor eléctrico fue conectado mediante un eje de caucho al eje del motor Stirling experimental. Se reguló una fuente para trabajar con el mismo voltaje en ambos casos (1,5 V). ver figura 3.13



figura 3.12 Acople del motor eléctrico y Stirling

Por efectos de experimentación, al motor Stirling se le retiro la tapa inferior de manera que el único trabajo que había que vencer para que se moviese es el que consumen los rodamientos y el rozamiento que se consume entre los pistones y el cilindro del motor. De esta manera, se pudo hallar el trabajo que consumen los rodamientos y el rozamiento del pistón del motor.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

El motor eléctrico girando sin ningún acople con un voltaje de 1,5V consume 19,2 mA. A continuación se conecto al motor Stirling mediante un eje de el cual se uso ya que absorbe las vibraciones y da un acople más suave entre los 2 elementos. El consumo del sistema se los dos motores fue 78,4 mA. cabe resaltar que en ambos casos se deben esperar unos segundos hasta que los motores rompa la inercia y establezca su funcionamiento. Ver figura 3.14



figura 3.13 Medición del experimento

La diferencia entre ambos valores es de 59.2 mA que equivale a 0,0592 A y traduciendo este valor a la potencia consumida por fricción, mediante la ecuación 3.5.7, tenemos:

$$\text{Pot}_{\text{fri}} = V \cdot I$$

EC 3.7.5

Donde:

V : 1,5 [V]

I: 0.089 [A]

$$\text{Pot}_{\text{fri}} = 0,08 \text{ W}$$

3.8 Diagrama de balance energético

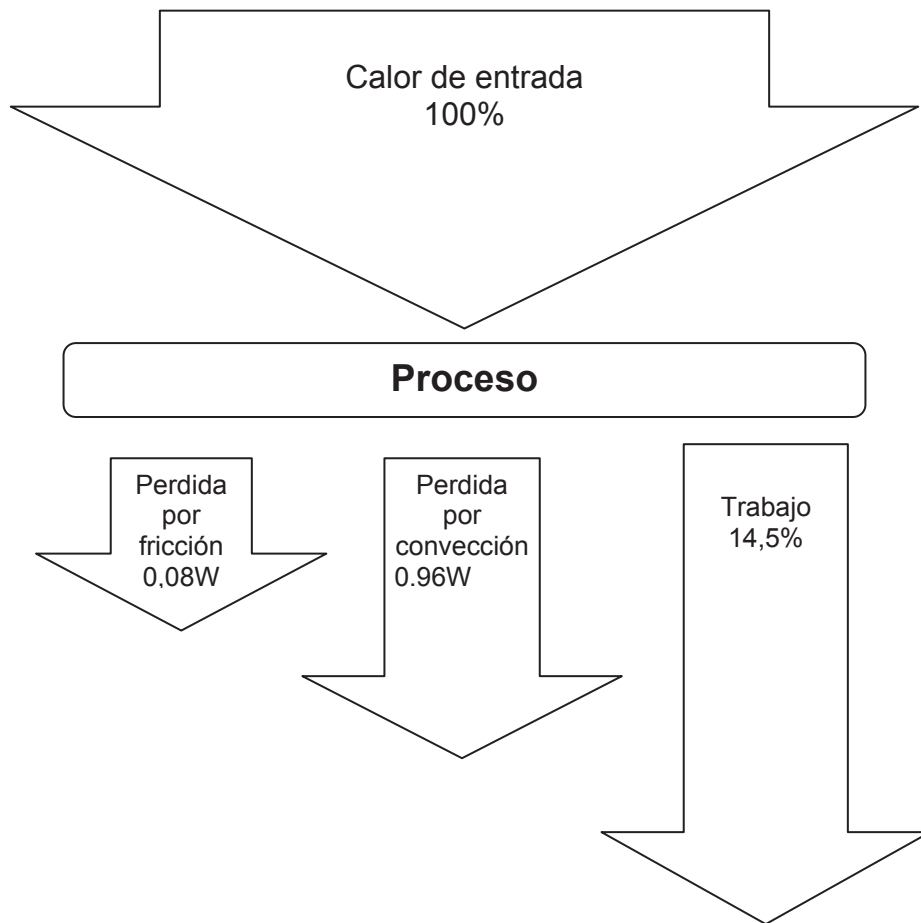


figura 3.14 Esquema del balance Energético

La figura 3.11 nos muestra en un esquema sobre cómo se divide la energía de entrada al sistema para un diferencial térmico de 50°C y partiendo de temperatura ambiente 20°C . Es igual la energía que entra a la que sale, pero de esta energía de entrada, solo una parte se convierte en trabajo útil ya que el resto de energía se pierde en el proceso.

3.9 Cálculo de la Presión media efectiva

La presión media efectiva tiene principalmente un uso práctico, ya que muestra la relación entre la presión media y alta con el fin de seleccionar el material más adecuado para soportar estas presiones de trabajo. El motor Stirling construido al trabajar con presiones atmosféricas y temperaturas relativamente bajas esta sobredimensionado y las presiones de trabajo no incidirán para una posible falla. Mientras mayor es la presión media efectiva, mayores son las fuerzas que inciden en el sistema.

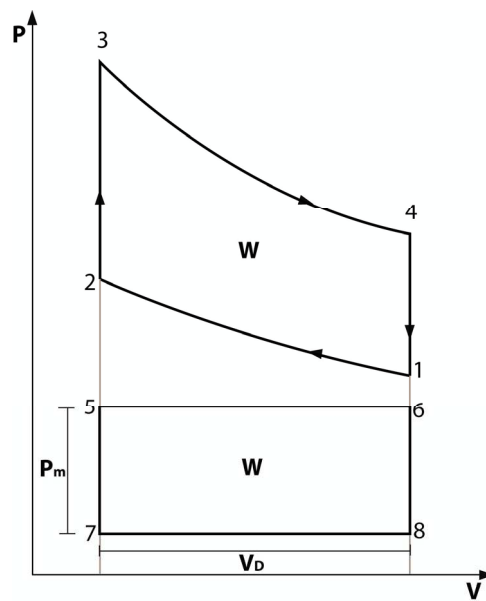


figura 3.15 Presión Media Efectiva

A continuación se muestra el cálculo de la presión media efectiva para el motor construido.

El trabajo realizado por el ciclo se lo representa mediante el área contenida en 1-2-3-4 (ver fig 3.9), esta área se la puede transformar a una forma rectangular 5-6-7-8 = 1-2-3-4. Donde la longitud del rectángulo es un volumen V_D llamado volumen de desplazamiento, que es el volumen de barrido de la carrera del pistón, que es igual a:

$$V_D = V_{\max} - V_{\min}$$

EC 3.9.1

La altura del rectángulo es la presión llamada Presión media efectiva " P_m ". La P_m es la presión promedio que actuando sobre la carrera, producirá sobre el pistón, el trabajo neto de un solo ciclo (ver fig 3.9).

Es posible encontrar la Presión media efectiva mediante la fórmula:

$$P_m = \frac{Q_{\text{Disp}}}{V_D}$$

29

EC 3.9.2

Ya calculado el calor disponible, se puede aplicar la formula EC 3.9.2 para encontrar la presión media efectiva.

Donde:

Q_{disp} : 0.0265 [J]

V_D : $1,54 \times 10^{-6}$ [m³]

$$P_m = 1,725 \times 10^4 \text{ [Pa]}$$

3.10 Diseño del Eje

El eje es la pieza al que se encuentran acoplados todos los elementos móviles, por lo tanto estará sometido a la mayor cantidad de esfuerzos.

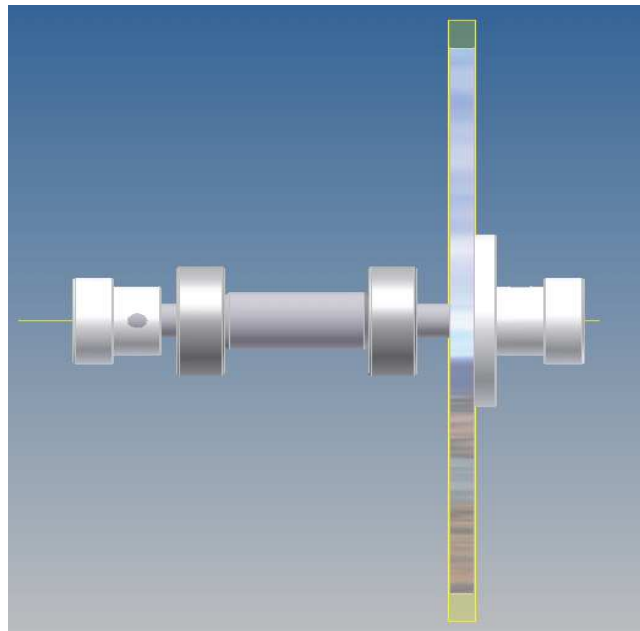


figura 3.16 Eje con acoples

DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE

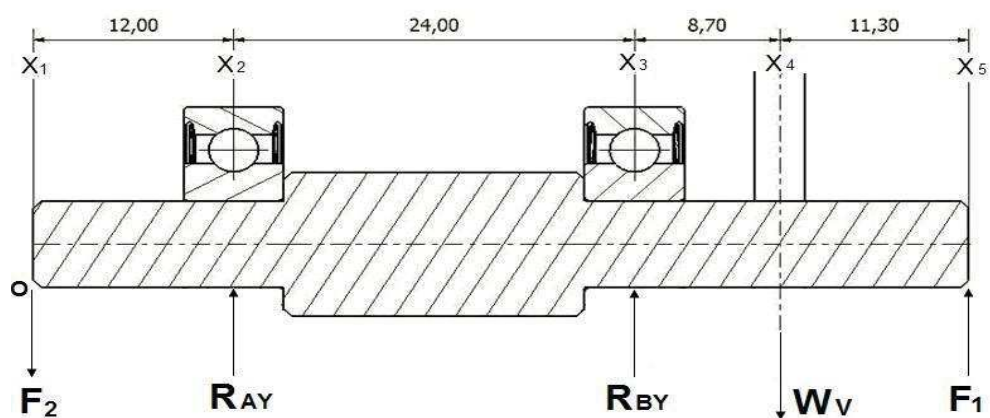


figura 3.17 fuerzas ejercidas sobre el eje

Como se puede ver en la figura 3.17 el eje está sometido a esfuerzos cortantes, a continuación se describe las fuerzas aplicadas al eje:

F1: Fuerza ejercida por el pistón

F2: Peso del Desplazador = 0,3 [N]

Wv: Peso del volante de inercia = 0,59 [N]

R_{AY}: Sujeción con el rodamiento A

R_{BY}: Sujeción con el rodamiento B

La fuerza ejercida por el pistón se calculara mediante la presión media efectiva, se asume que existe una presión ejercida al pistón de cuasi equilibrio, por lo tanto tenemos:

$$F_1 = P_m * A_{\text{piston}}$$

EC 3.10.1

Donde:

$$A_{\text{piston}}: \pi r_{\text{piston}}^2 = 1,539 \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$P_m: 1,7258 \times 10^4 \text{ [Pa]}$$

$$F_1 = 2,657 \text{ [N]}$$

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$0 = -F_2 + R_{AY} + R_{BY} - W_V + F_1$$

EC 3.10.2

A continuación se realizara la sumatoria de momentos (M)

$$\Sigma M_A = 0$$

$$0 = -F_2(0,012) - R_{BY}(0,012) + W_V(0,0207) - F_1(0,032)$$

Despejando R_{BY} se tiene:

$$R_{BY} = \frac{-F_2(0,012) + W_V(0,0207) - F_1(0,032)}{0.012}$$

EC 3.10.3

Donde:

$$F_1 = 2,657 \text{ [N]}$$

$$F_2 = 0,03 \text{ [N]}$$

$$W = 0,059 \text{ [N]}$$

$$R_{BY} = -6,367 \text{ [N]}$$

El valor de R_{AY} se lo despeja de la ecuación 3.10.2

$$R_{AY} = F_2 - R_{BY} + W_V - F_1$$

EC 3.10.4

$$R_{AY} = 4,6 \text{ [N]}$$

3.10.1 Momento Flector

A continuación se realiza el análisis del momento flector por tramos, iniciando en el punto "o" como se muestra en el grafico 3.17

$$0 \leq X_1 \leq 0,012$$

$$M = F_2 * X_1$$

$$\rightarrow X_1 = 0$$

$$M_1 = 0 \text{ Nm}$$

$$\rightarrow X_1 = 0,012\text{m}$$

$$M_2 = 0,0036 \text{ Nm}$$

$$0,012 \leq X_2 \leq 0,024$$

$$M = F_2 (X_2) - R_{AY} (X_2 - 0,012)$$

$$\rightarrow X_2 = 0,012\text{m}$$

$$M_3 = 0,036 \text{ Nm}$$

$$\rightarrow X_2 = 0,024\text{m}$$

$$M_4 = -0,048 \text{ Nm}$$

$$0,024 \leq X_3 \leq 0,0327$$

$$M = F_2 (X_3) - R_{AY} (X_3 - 0,012)$$

$$\rightarrow X_3 = 0,024\text{m}$$

$$M_5 = -0,048 \text{ Nm}$$

$$\rightarrow X_3 = 0,0327\text{m}$$

$$M_6 = -0,03 \text{ Nm}$$

$$0,0327 \leq X_4 \leq 0,044$$

$$M = F_2 (X_4) - R_{AY} (X_4 - 0,012) - R_{BY} (X_4 - 0,024) + W_V (X_4 - 0,0327)$$

$$\rightarrow X_4 = 0,0327\text{m}$$

$$M_7 = -0,05 \text{ Nm}$$

$$\rightarrow X_4 = 0,0327\text{m}$$

$$M_8 = 0 \text{ Nm}$$

Ya encontrados los momentos para cada tramo se puede realizar la siguiente tabla que indica el momento para cada valor de "X"

Tabla 3.7 Distancias y momentos del eje

Tramo	X Distancia [m]	Y Momento [Nm]
0	0	0
1	0,012	0,036
2	0,024	-0,048
3	0,0327	-0,03
4	0,044	0

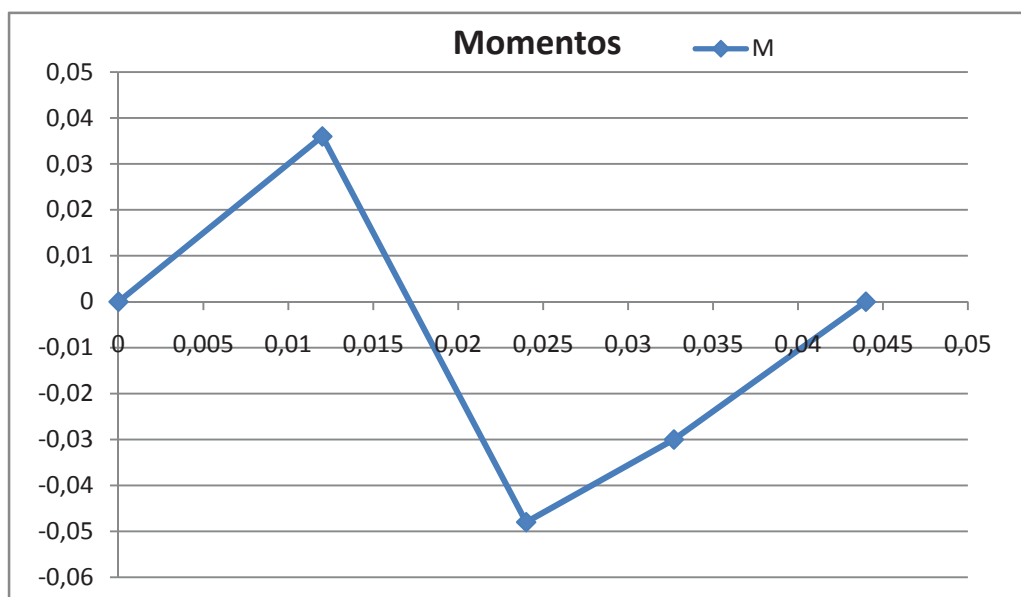


figura 3.18 Momentos Sobre el eje

3.10.2 Factor de seguridad

A continuación se analizara el factor de seguridad del motor, mediante el análisis del eje que estará sujeto a la mayor cantidad d esfuerzos.

Torque :

$$\tau = F - D$$

EC 3.10.5

Donde:

F: Es la fuerza aplicada al eje, por lo tanto es la fuerza $F_1 = 2,657$ [N]

D: Es la distancia del pedal acoplado al eje que es igual a $0,005$ [m]

Entonces se obtiene:

$$\tau = 0,0133 \text{ [Nm]}$$

Posteriormente se calculara el eje mediante la teoría de resistencia estatica³⁰:

$$\delta = \frac{M_{\text{Max}} * 32}{\pi * d_{\text{Eje}}^3}$$

²⁵

EC 3.10.6

Donde:

M_{max} : Es el momento máximo igual a $-0,048$ [Nm] ver tabla 3.7

d_{Eje} : Es el diámetro del eje igual a 6 [mm] ver anexo 2008.4.1.12

$$\delta = -2.263.537 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

³⁰ DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, / Shingley Joseph y Mitchel Larry / Cuarta edición / pag 243, 244

$$\zeta_{xy} = \frac{\tau * 16}{\pi * d_{Eje}^3}$$

EC 3.10.7

$$\zeta_{xy} = 313594,2 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Aplicando la teoría de deformación tenemos:

$$Z_d = \sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\zeta_{xy}}{2}\right)^2} = \frac{S_y}{\sqrt{3} * N}$$

31

EC 3.10.8

$$Z_d = 1.142.578,32$$

Por lo tanto se puede decir que:

$$Z_d = 1.142.578,32 = \frac{S_y}{\sqrt{3} * N}$$

EC 3.10.9

De donde se despeja el factor de seguridad "N" y se obtiene:

$$N = \frac{S_y}{\sqrt{3} * Z_d}$$

EC 3.10.10

La resistencia a la fluencia del material es S_y del eje que en este caso es Aluminio³² con el código A91100 y su valor $S_y = 3,447379 \times 10^7$ [Pa]

$$N = 17,42 \%$$

El factor de seguridad resultante es relativamente alto, pero al ser un motor experimental sería el adecuado. Adicionalmente cabe mencionar que el eje tienen que acoplarse al los diámetros estandarizados de rodamientos existentes en el mercado y en la facilidad para su maquinado, por estas razones se adopto un diámetro del eje de 6mm.

³² DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, / Shingley Joseph y Mitchel Larry / Cuarta edición / pag 871 tabla A19

CAPITULO IV

MONTAJE DEL MOTOR

4.1 Especificaciones de partes y piezas

A continuación se muestra algunos detalles de cada pieza, determinando la importancia y las partes críticas de la misma.

4.1.1 Pedal desplazador

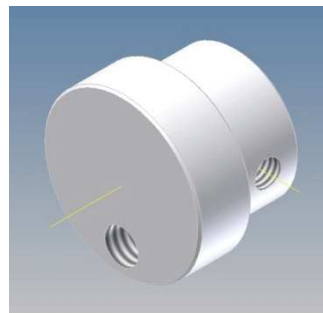


figura 4.1 - Pedal desplazador

Esta pieza se realizó en teflón, este material nos brinda varias ventajas tanto de fabricación como de peso ya que al ser liviano no aumenta considerablemente la inercia del eje. El maquinado de esta pieza se realizó en torno, aunque no es una pieza crítica, se debe asegurar un buen ajuste con el eje para evitar un juego.

El agujero de la parte superior, donde se acopla el pedal, tiene que ser lo más perpendicular posible a la cara superior, la dificultad que presenta esta pieza es

realizar la rosca ya que al ser tan pequeña se la debe hacer manualmente y esto puede desviar al pedal, de esto dependerá que el sistema no se traben. (Anexo 2008.4.1.03)

4.1.2 Pedal de Poder

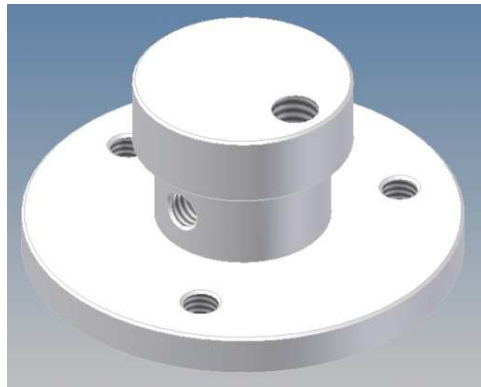


figura 4.2 - Pedal de poder

Al igual que el pedal desplazador esta pieza se realizó en teflón y su mecanizado en un torno. No presenta dificultades en su maquinado, pero hay que centrar bien los tres agujeros de ajuste del volante de inercia para que no haya juego ni desviaciones.

Se puede decir que esta es una pieza crítica ya que aquí se acoplara el pistón, por lo tanto es importante garantizar un buen trabajo. (Anexo 2008.4.1.04)

4.1.3 Soporte del Eje

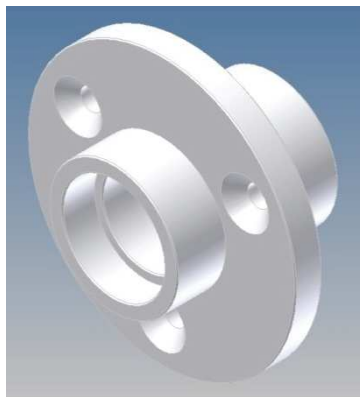


figura 4.3 - Soporte del Eje

Este soporte del eje es el albergara al eje principal y a los rodamientos.

Esta pieza no es tan pequeña por lo tanto su maquinado no presenta mayores complicaciones, en este caso esta pieza se realizo con teflón y los ajustes se los hizo basados en los rodamientos ya adquiridos previamente. (Anexo 2008.4.1.09)

4.1.4 Eje

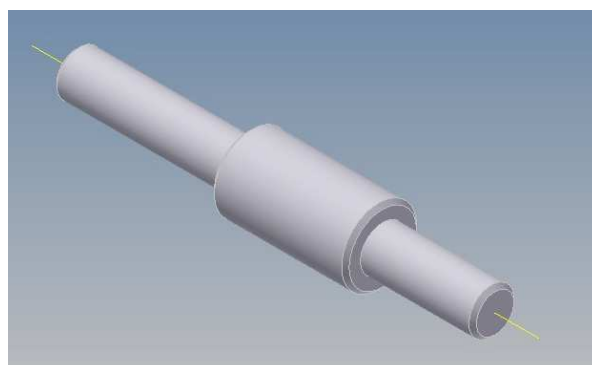


figura 4.4 - Eje

El eje es una pieza clave, hay que procurar que sea liviano y resistente, por lo que se utilizo un pequeño eje de aluminio. Maquinar esta pieza requiere de cuidado en especial por su tamaño.

Se construyó con un tipo de ajuste deslizante respecto al agujero del rodamiento para disminuir al mínimo las pérdidas por rozamiento, tanto del eje como del rodamiento.

En el eje se ubican el pedal de poder y el pedal desplazador, los cuales tienen que estar centrados y ajustados para evitar juego en las piezas móviles.
(Anexo 2008.4.1.12)

4.1.5 Soporte

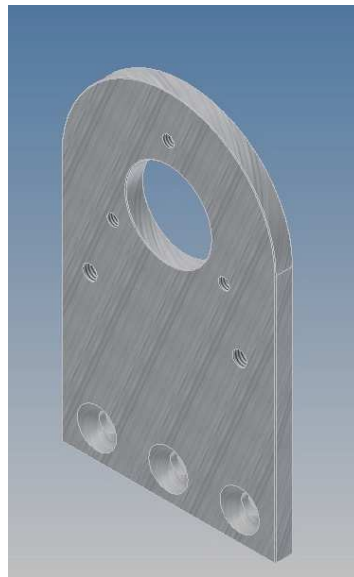


figura 4.5 Soporte

El soporte será el encargado de acoplar todas las partes móviles del motor, aunque no estará sometida a grandes esfuerzos, tendrá que tener firmeza y estabilidad, esta se montará con la ayuda de un acople sobre la tapa superior del cilindro.

Esta pieza es una de las más grandes del motor y se la realizo en aluminio, para esta pieza se utilizo una plancha de aluminio de 5mm de espesor lo que graniza firmeza y además facilita su maquinado en la fresadora.

Los agujeros se realizaron con un taladro de banco, esto es importante porque las dimensiones de los agujero deben ser cuidadosamente elaboradas y bien ubicadas lo que permitirá que el sistema se acople bien y esto es un punto clave para el adecuado funcionamiento del motor. (Anexo 2008.4.1.07.2)

4.1.6 Base del soporte

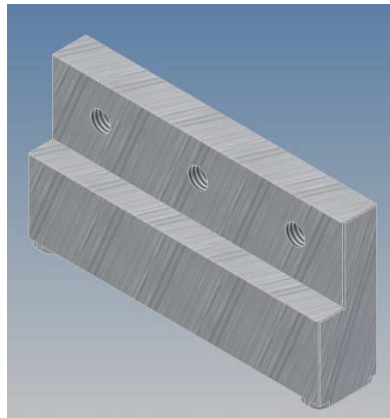


figura 4.6 Base del Soporte

La base del soporte es un acople que dará firmeza al soporte con la tapa superior del cilindro. Para esta pieza se utilizo aluminio y se la realizo en una maquina fresadora.

Esta pieza cuenta con dos apoyos en la parte inferior que no sirven como guías para centrar la pieza en la tapa superior. Estas guías se las tiene que

terminar a mano con la ayuda de una lima pequeña para que calcen exactamente en la cavidad de la tapa dispuestas para esta pieza. (Anexo 2008.4.1.07.1)

4.1.7 Tapa Superior

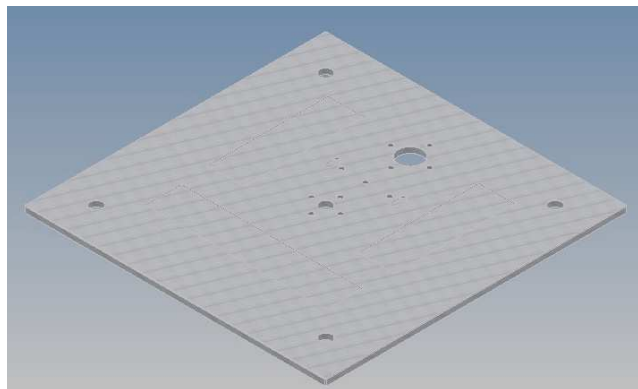


figura 4.7 Tapa Superior

La tapa superior es una pieza crítica ya que esta alberga la mayor parte de componentes los que deben cuadrar perfectamente.

Esta pieza se realizó con una plancha de aluminio de 5mm y la mayor parte de su maquinado se lo realizó en una fresadora.

Los agujeros tienen que estar muy bien centrados, especialmente el agujero del acople del desplazador ya que una pequeña desviación en este hace que el desplazador no cuadre bien y roce con las paredes del cilindro, adicionalmente, los tornillos de ajuste deben estar acorde con los del cilindro para que no existan fugas de presión.

Las cavidades de acoples de los disipadores de calor y de la base del soporte se las realizaron con una fresadora, este maquinado se realiza con una fresa de 2mm de diámetro para darle un mejor acabado ya que el mayor el contacto con los disipadores de calor mejora su mejor rendimiento. (Anexo 2008.4.1.02)

4.1.8 Cilindro

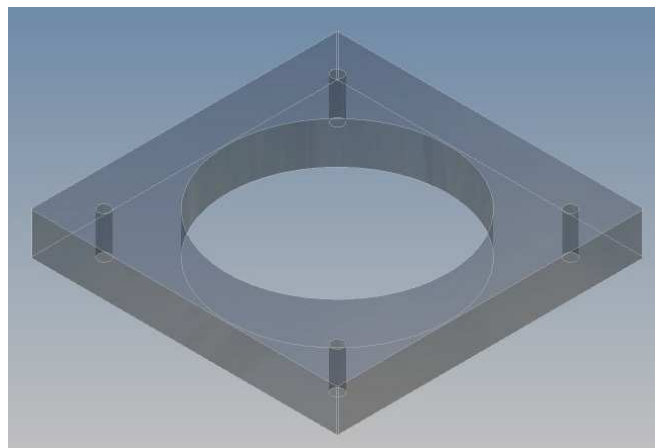


figura 4.8 Cilindro

El cilindro es una de las piezas más delicadas del motor porque en este se realiza todo el proceso térmico el que además debe ser hermético.

Esta pieza se realizo en vidrio (ver figura 4.7) , se utilizo este material porque al ser cerámico su coeficiente de transferencia de calor es bajo permitiendo así un aislamiento de la zona caliente y la zona fría, lo que es de suma importancia para el funcionamiento del motor.

No se considero necesario realizar un temple de esta pieza ya que las temperaturas de trabajo no excederán los 180°C y no será sometida a cambios bruscos de temperatura.

El maquinado del cilindro se lo realizo en un centro mecanizado CNC para vidrio y este proceso se hizo en dos etapas ya que el equipo no puede trabajar con un vidrio del espesor necesario, por lo tanto se maquinaron dos planchas de espesores distintos una de 15mm y la otra de 19mm, posteriormente se las unió mediante un pegamento y se pulió sus lados. (Anexo 2008.4.1.01)

4.1.9 Desplazador

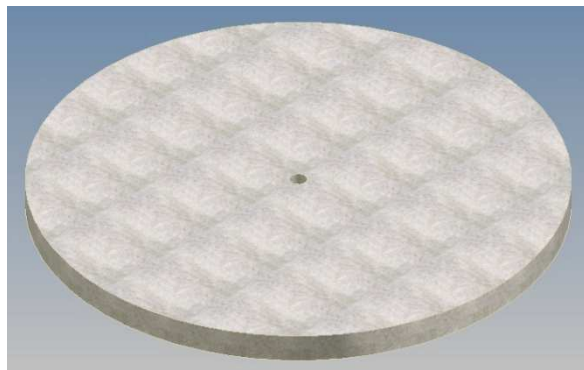


figura 4.9 Desplazador

El desplazador llamado también regenerador es el que servirá para aislar la zona caliente y fría del motor. Esta pieza debe tener las siguientes características:

- Ser muy liviano, ya que es una pieza móvil y es la que mayores pérdidas da al motor.
- Debe ser construido con un material que soportar temperaturas hasta 150°C, ya que va a estar en contacto directo con la zona caliente.
- Debe ser porosa, para permitir el flujo del gas de trabajo y moverlo de la zona caliente a la fría y viceversa.

- Debe ser aislante térmico, ya que la parte superior va a estar en contacto con la zona fría y la parte inferior con la zona caliente.

Estas características son esenciales para el funcionamiento del motor por lo cual se planteo varias alternativas como balsa, espuma flex, cartón y esponja, finalmente se utilizo una esponja de 20mm de espesor, que dio buenos resultados y por ser voluminosa es un buen desplazador del fluido. Para su elaboración solo fue necesaria una tijera y no presento dificultades.

4.1.10 Acople del regenerador

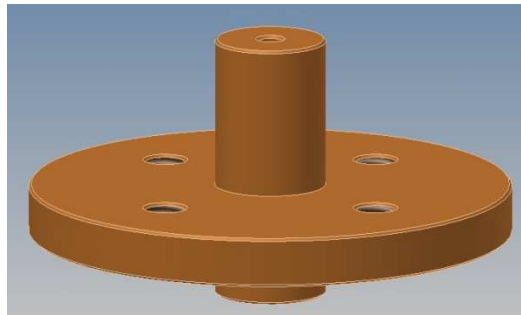


figura 4.10 Acople del regenerador

El acople del regenerador es el encargado de realizar un sello el brazo que mueve al desplazador, siendo necesario un ajuste deslizante con el brazo móvil.

El mecanizado se lo realizo en un torno con un pequeño eje de bronce, no presenta dificultades pero el agujero del centro tiene que tener la pared lo más liza posible para un mejor deslizamiento. (Anexo 2008.4.1.06)

4.1.11 Pistón

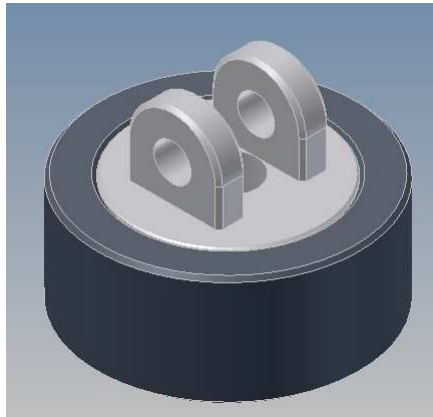


figura 4.11 Pistón

El pistón es la pieza más crítica del motor debido a que debe funcionar como un sello y a la vez no ofrecer resistencia. El pistón en el cilindro, debe caer por peso propio sin problema y si se tapa con un dedo por el otro extremo del cilindro, el pistón debe mantenerse por la presión o tardar varios segundos en bajar.

La fabricación del pistón es un trabajo muy delicado. Inicialmente se lo fabricó en aluminio pero, no funcionó debido a que el cilindro es de bronce y los materiales se auto remordían ya a que su punto de dilatación es distinto, y la fuerza de resistencia era mayor que la fuerza generada por lo tanto el motor no funcionó. Gracias a la experiencia que se adquirió en la primera prueba se busco nuevas alternativas para la fabricación del pistón y se propuso la opción de recubrió al pistón con grafito para hacer un mejor sello y se modifico el cilindro que se describe posteriormente para que la resistencia por fricción disminuya, y aumente la hermeticidad.

Es necesario realizar varias pruebas de ajuste con el pistón y esencialmente con el sello de grafito hasta lograr el ajuste exacto tal que como se propone anteriormente debe caer por peso propio sin problema y si se tapa con un dedo por el otro extremo del cilindro, el pistón debe mantenerse por la presión o tardar varios segundos en bajar. Adicionalmente se debe evitar el uso de grasas o aceites para mejorar el sello hermético, ya que al ser tan pequeña la fuerza del motor, podría ser mayor la energía que se pierde por viscosidad que la que se gana por la hermeticidad que se logra con el aceite.

El pistón se lo fabrico en torno con un eje muy pequeño y posteriormente se realizo el sello de grafito el que se pegó con silicón al aluminio.

Los últimos acabados del pistón, son los de acople a la biela, esto se lo debe realizar manualmente con una pequeña sierra y lima, como se muestra en la figura 4.11 los acoples a la biela únicamente son 2 pestañas con un agujero en la mitad. (Anexo 2008.4.1.11.1 y 2008.4.1.11.2)

4.1.12 Cilindro de Poder

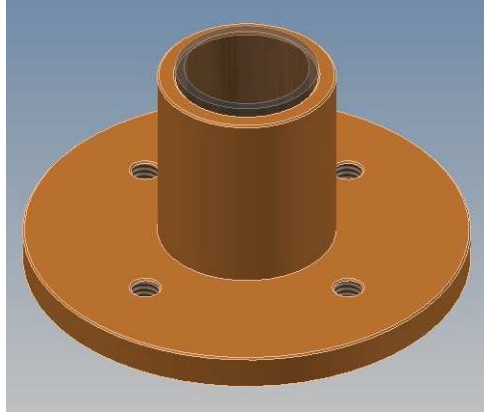


figura 4.12 Cilindro de Poder

El cilindro de poder es una pieza clave en el funcionamiento del motor. Como se describe anteriormente, esta pieza paso por una etapa de pruebas ya que se debe lograr un perfecto acople y funcionalidad con el pistón.

Como primer diseño, el cilindro únicamente era de bronce, pero cuando se realizo el primer montaje y pruebas se concluyo que la rugosidad interna del cilindro sumado a la rugosidad del aluminio y adicionalmente un grado de dilatación distinto de ambos materiales hizo imposible el funcionamiento del motor.

El peso fue una de las razones fundamentales por las cuales no se utilizó bronce para la fabricación del pistón, a pesar ser un material muy noble para su maquinado y contar con características como su auto-lubricación.

Posteriormente como solución a esto se modifico el cilindro, adicionándole una camisa de vidrio la que permitió una mínima rugosidad en las paredes y un acople bastante bueno con el pistón de grafito. La fabricación de la camisa se logro mediante un tubo de ensayo de 14mm de diámetro interior, el que se lo corto con la ayuda de un pequeño disco de corte abrasivo y se lo acoplo al cilindro de bronce mediante resina plástica.

Con lo anteriormente expuesto se logro un excelente funcionamiento del acople pistón cilindro que es la parte más crítica del motor, aunque el sello no es perfecto, las fugas de presión son mínimas. (Anexo 2008.4.1.08.1)

4.1.13 Biela

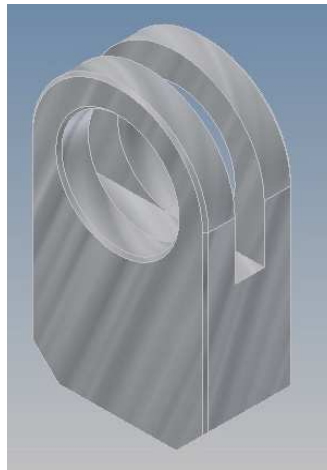


figura 4.13 Biela

La biela es el acople para unir el desplazador y el pistón al cigüeñal y específicamente a los pedales. Esta pieza no es crítica pero es laboreosa or su reducido tamaño, se la realizo con un pequeño pedazo de aluminio el cual se lo dio forma con limas y una pequeña sierra. Hay que tomar en cuenta que el

éxito de esta pieza es lograr la menor resistencia mecánica con el pedal.
(Anexo 2008.4.1.13.1)

4.1.14 Disipador de Calor

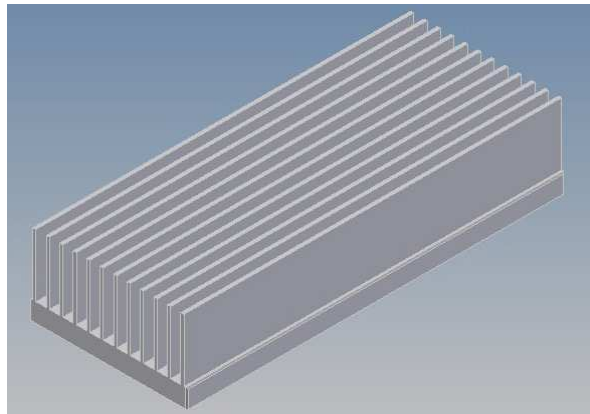


figura 4.13 Disipador de Calor

Esta pieza fue la que más problemas presento debido a que inicialmente el aluminio utilizado tenía una gran cantidad de plomo lo que dificultó su maquinado. Fue necesario un cambio de material, se trabajó con dura aluminio que presenta mejores características para su maquinado.

El disipador de calor fue maquinado en una fresadora, el modelo que se realizó fue en dos etapas. La primera fue la fabricación de la base del disipador, en la cual se dejo canales de 1mm de ancho por 3mm de profundidad para posteriormente acoplar planchas de aluminio de 1mm de espesor para la longitud de cada canal. Este proceso facilitó la tarea y disminuyó los costos de materiales y maquinado. (Anexo 2008.4.1.14.1 y 2008.4.1.14.2)

4.2 Montaje del Motor

El montaje del motor requiere de muchos detalles que es importante tomar en cuenta, parte de la alineación del cilindro y las tapas superior e inferior. Antes de iniciar el montaje hay que verificar la correcta ubicación de las tapas.

El primer paso del ensamblaje inicia con el montaje de los rodamientos y el eje.

Los rodamientos son las únicas piezas normalizadas pero necesitan un proceso que nos ayudará a mejorar su desempeño y reducir la resistencia.

Al ser uno de los principales problemas las pérdidas de energía en la partes móviles y principalmente los en rodamientos, se ensamblan las partes móviles de manera que ofrezcan la mínima resistencia, esto se logra mediante un proceso en el cual se acoplo los rodamientos a un taladro y se lo hizo funcionar por aproximadamente 15 minutos con una continua lubricación, esto se realizo con un aceite penetrante y muy liviano (WD-40) logrando remplazar la grasa del rodamiento que viene de fábrica, para que las piezas se acoplen mejor. Con esto se logro disminuir en gran medida la resistencia del rodamiento. ver fig

4.14

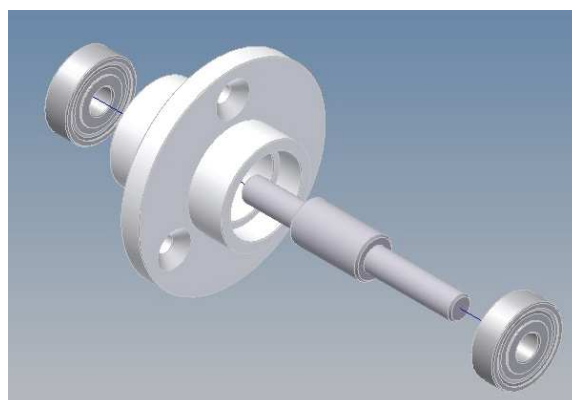


figura 4.14 Montaje del eje

Posteriormente las partes ya ensambladas se las acopla en el soporte, y se la ubica en la base del soporte. Es importante al finalizar estos pasos ver que el mecanismo del eje no tenga juego.

El ensamble del desplazador se debe realizar, tomando en cuenta las dimensiones del cilindro y ubicándolo en su base con la ayuda de un alambre para fijarlo.

Consecutivamente se debe ensamblar el pistón y el cilindro de poder. Para el ensamble del pistón es necesaria una gota de silicón en las paredes internas del sello de grafito es un trabajo delicado y hay que evitar manchar las paredes exteriores del grafito con silicón. Para el ensamble del cilindro de poder con la camisa de vidrio, de la misma forma esparcimos muy bien el silicón por la cara interior del cilindro, es importante que sea uniforme la aplicación del silicón para no dejar ningún orificio por donde pueda escapar la presión. Estas piezas deben secarse por dos horas aproximadamente.

Para los brazos se usa varilla de aluminio de suelda como las dimensiones que se muestra en el anexo 2008.4.1.13.2

Los tornillos de ajuste para los elementos que se ubican en la placa superior se deben sellar con silicona como medida para garantizar su hermeticidad.

El motor debe quedar ensamblado como se muestra a continuación en la figura 4.15 para continuar con la parte más delicadas como el pistón y el volante de inercia.

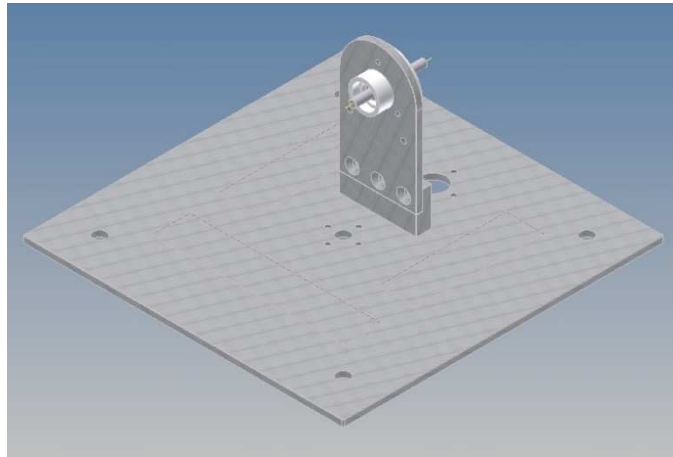


figura 4.15 Montaje de la base

A continuación se acopla el volante de inercia al pedal y subsecuentemente el pistón se debe pre ensamblar con el brazo y la biela para que se acoplen a este pedal. hay que tener en cuenta la dirección del movimiento que hará el brazo para montarlo correctamente. (ver fig 4.16)

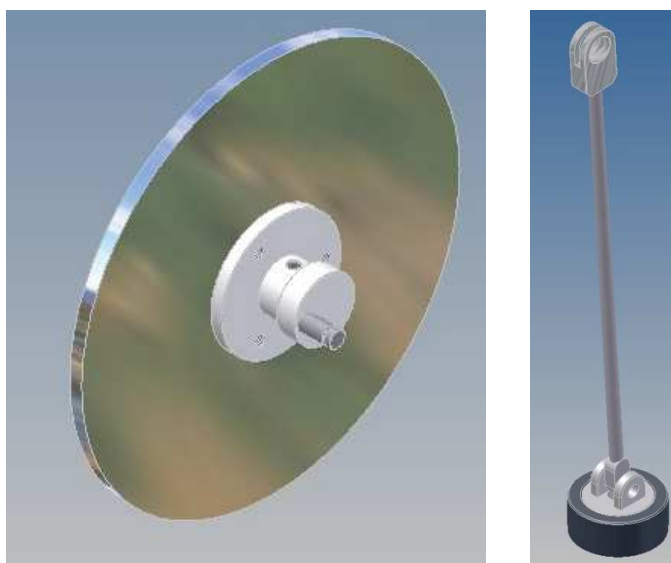


figura 4.16 Acople del pedal de poder y pistón-biela

Ya listos los acoples anteriores, se continúa ubicando el cilindro de poder y el acople del desplazador, Para éstos acoplé se usará silicón entre la tapa superior y el elemento, evitando así posibles fugas.

Posteriormente se ubica el pedal de poder y el pedal del desplazador, al pedal de poder se acopla la biela pero se debe tener cuidado con la alineación para que no se remuerda el motor.

Se procede al montaje del cilindro ubicando entre la tapa superior un empaque cubierto de silicón por ambos lados y lo cuadramos con sus tornillos sin poner la tapa inferior. Los empaques de amianto nos ayudarán como aislante térmico entre el vidrio y la tapa superior e inferior.

Para la ubicación del desplazador primero se colocaran la biela y el brazo, una vez montas estas piezas se pone el desplazador por la parte inferior del motor, hay que notar que debe existir una pequeña separación de, aproximadamente, 2mm entre las paredes del cilindro y el desplazador para evitar pérdidas por rozamiento. Ubicado ya el desplazador se procede a montar la tapa inferior de la misma forma que se hizo con la superior, así trataremos de que el motor este lo más hermético posible. (ver figura 4.17)

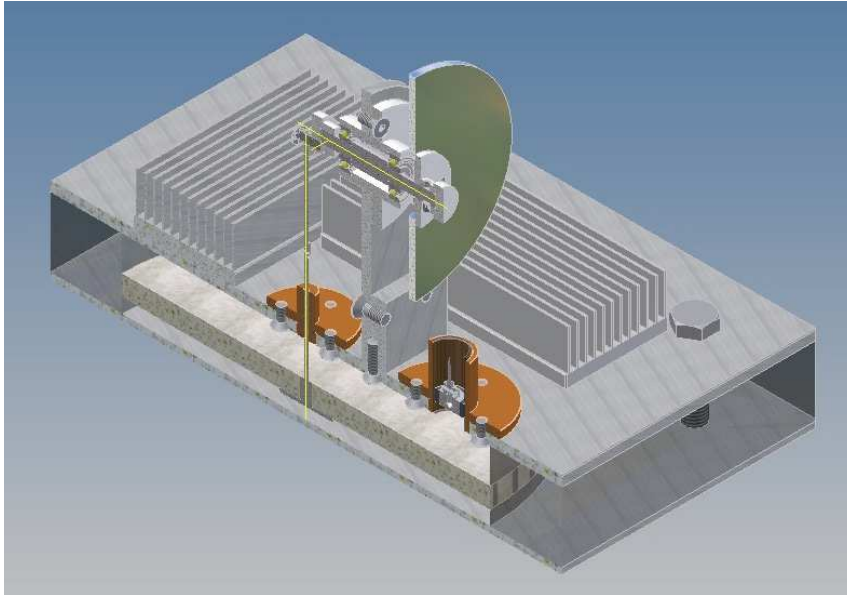


figura 4.17 Corte transversal del motor

Por último se instalaron los disipadores de calor, estos se acoplan a presión, es recomendable usar una resina térmica para aumentar la superficie de contacto y mejorar su eficiencia.

Finalmente se ajustaran los tornillos prisioneros de los pedales, ubicándolos con un desfase de 90 grados.

4.3 Sistema Electrónico

El sistema electrónico integra en un solo circuito impreso dos elementos de medición y uno de control en lazo cerrado, un termómetro multicanal, un tacómetro y un termostato electrónico con la intención de monitorear las principales variables del motor. Toda la información es presentada en una pantalla LCD alfanumérica de 2x16 caracteres. El sistema es controlado por un micro controlador 16F877a de 40 pines fabricado por Microchip , que opera a una frecuencia de 20Mhz. La interface con el operador, tiene lugar por medio de tres teclas, las cuales se utilizan básicamente para establecer la temperatura en la resistencia calefactora.

Termómetro multicanal.

El termómetro multicanal permite el seguimiento de las temperaturas: máxima y mínima. El principio de detección consiste en un circuito integrado (LM35) que ofrece una variación de 10mv por cada grado centígrado. La señal de salida de este circuito integrado es amplificada y luego aplicada al conversor AD del microcontrolador. El conversor AD, es el elemento destinado a traducir una señal análoga, como la que ofrece el sensor, en una señal digital como la que requiere el microcontrolador. En este caso la señal digital es de de 8 bits.

Una vez que el microcontrolador dispone de la señal del sensor expresada en formato digital, puede procesarla, para mostrar en pantalla el valor de temperatura correspondiente.

El microcontrolador atiende varias tareas en orden consecutivo, cada tarea es, en este caso, una lectura de temperatura en una zona específica del motor; es por ello que recibe el nombre de "Termómetro multicanal".

Tacómetro.

Se reconoce como tacómetro a todo instrumento capaz de medir la velocidad de giro de una pieza x. Esta velocidad suele expresarse en RPM. En este caso el tacómetro se construyó aprovechando las partes internas de un ratón (Mouse) convencional (roll on).

Los pulsos de luz recibidos por el receptor infrarrojo son convertidos por este en una señal digital que ingresa al microcontrolador para que este analice con que frecuencia se producen, una vez que el microcontrolador sabe a qué frecuencia se están produciendo estos pulsos puede conocer la velocidad de giro.

El uso del tacómetro nos permitirá ver con claridad como varia el funcionamiento del motor a diferentes temperaturas, como se explica anteriormente.

Termostato electrónico.

Un termostato es un elemento utilizado para el control de la temperatura, generalmente basado en la dilatación de un gas o en la torsión de una lamina bimetalica por efecto de la temperatura. La función de un termostato es mantener la temperatura en un valor determinado. En este caso se implemento dentro del microcontrolador un termostato electrónico de tipo On/OFF, es decir, a diferencia de los termostatos convencionales este carece de partes mecánicas, por lo que no existe desgaste, el volumen es reducido y la precisión superior. Este termostato funciona de la siguiente manera:

El microcontrolador lee por medio del termómetro multicanal la temperatura suministrada por la resistencia calefactora al motor. Si la temperatura es inferior a la temperatura deseada, entonces suministra corriente a la resistencia calefactora utilizando un transistor TRIAC como interruptor. Si la temperatura es igual o superior se desactiva la resistencia calefactora. La selección de la temperatura deseada tiene lugar por medio de tres teclas que le indican al microcontrolador cual es el valor. Las funciones de estas teclas son las siguientes: Aumentar Temperatura, Disminuir Temperatura y congelar lectura actual.

Microcontrolador

El microcontrolador es el cerebro detrás de todo lo antes descrito, es el elemento que procesa, calcula y toma decisiones basándose en el programa que se introdujo en el con antelación, es decir, necesita ser programado. Existen muchos tipos de microcontroladores los cuales pueden ser clasificados

basándonos en diferentes parámetros como velocidad de procesamiento, espacio de memoria, cantidad de pines, módulos especiales, etc. Se eligió el pic 16f877a por ser uno de los más comunes en el mercado, con un precio razonable y con las características técnicas que más se ajustan a este proyecto.

Para que todo lo anterior pueda funcionar se requiere además de una fuente de alimentación que suministre la energía eléctrica necesaria, que no se menciona como un modulo especial por lo estándar de su estructura. La fuente de alimentación consiste en un puente de rectificación, filtros y un regulador fijo de tres pines tipo LM7805. La misión de esta sección es garantizar 5v estabilizados para el funcionamiento del microcontrolador y los sensores.

El mecanismo de control, únicamente nos permite realizar una prueba controlada del sistema, pero como se menciona anteriormente, las fuentes de calor pueden ser diversas, y el motor debe ser diseñado dependiendo de la cantidad de energía térmica de que se disponga.

CAPITULO V

ETAPA DE PRUEBAS

A continuación, ya con el motor terminado, se calibrará y pondrá en funcionamiento, cabe resaltar que una vez calibrado el motor, el único parámetro que podremos variar es la temperatura de entrada (T_{max}).

5.1 Protocolos de Uso

A continuación se presentan algunos de los pasos y consideraciones que se deben tomar para un buen manejo y funcionamiento del motor.

5.1.1 Calibración del motor

Como parámetros de calibración se tiene previos al uso del equipo, se puede variar el peso del volante de inercia y como ayuda para mantener la presión se recomienda el uso de un aceite liviano en el pistón y brazo del desplazador.

El peso del volante de inercia puede variar según los resultados que se quiera obtener, pero su peso tiene que ser mayor al peso del desplazador el cual es de esponja gris de aproximadamente 0,03 Kg, la pruebas se realizaron con 4 discos.

Antes de de poner en funcionamiento, es recomendable tener en cuenta las normas de seguridad para el laboratorio de termodinámica, tales como el uso

de guantes y mandil para trabajo con altas temperaturas y evitar posibles accidentes.

- La lubricación eventual de los rodamientos y bielas son de gran ayuda para reducir la fricción, pero esto se debe hacer con un aceite muy liviano. En las pruebas realizadas se usó un aceite penetrante y sumamente liviano (DW-40).
- Piezas como los brazos y bielas son clave para el funcionamiento del motor, pero son frágiles y se pueden deformar. Una mínima deformación en el brazo del desplazador aumenta el rozamiento y las pérdidas, considerablemente, y en algunos casos esto puede ser una de las razones para que el motor deje de funcionar.
- Si se va a trabajar con el sistema electrónico, se recomienda tener las medidas de precaución para el manejo de la resistencia eléctrica y verificar el buen estado del fusible.
- No se debe por ningún motivo enfriar el motor con agua, ya que un cambio brusco en la temperatura en el cilindro y sello del pistón, pueden fisurar el equipo dejando escapar la presión.
- Si se requiere bajar la temperatura, se recomienda usar una franela húmeda en la tapa superior del motor o a su vez aumentar la ventilación.

- No lubricar el pistón con una grasa muy pesada, ya que solo se logra aumentar la resistencia al movimiento.

Los puntos mencionados anteriormente pueden facilitar y mejorar las condiciones de uso del motor además facilitar las labores del operador.

5.2 Prueba controlada del motor

Una vez ensamblado el motor fue sometido a una prueba de funcionamiento en la cual solo se varió la temperatura de la resistencia eléctrica y se midió las revoluciones para tres temperaturas distintas.

Las pruebas se realizaron con los Tres disipadores de calor.

Tabla 3.8 Resultados prueba 1

	T. Resistencia [°C]	T,Zona caliente [°C]	T. Zona fría [°C]	Velocidad [rpm]
1 ^{ra} medición	70	68	26	75
2 ^{da} medición	90	89	37	81
3 ^{ra} medición	110	107	59	97

A continuación, las pruebas se hicieron sin los disipadores de calor y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.9 Resultados prueba 2

	T. Resistencia [°C]	T,Zona caliente [°C]	T. Zona fría [°C]	Velocidad [rpm]
1 ^{ra} medición	70	69	19	82
2 ^{da} medición	90	87	24	94
3 ^{ra} medición	110	105	38	107

Se puede observar en estas pruebas, que la velocidad varía para la misma temperatura de entrada cuando se colocan los disipadores de calor. Esto se debe a que el diferencial de temperatura está directamente relacionado con la eficiencia del motor, y al ser mayor esta diferencia de temperaturas mejora el rendimiento del sistema.

5.3 Tabla para desarrollo de Prácticas

El motor Stirling trabaja con un diferencial de temperatura y la práctica se debe desarrollar aplicando este principio. Para la práctica se deben tomar registro de las temperaturas en: la fuente, la zona caliente, la zona fría, y las revoluciones; Se recomienda tomar estos datos después de un minuto de realizado un cambio en la temperatura esto es para que se estabilice el sistema y de valores menos erráticos.

Tabla 3.10 Modelo de formato de valores para Resultados de prueba

	T. Resistencia [°C]	T.Zona caliente [°C]	T. Zona fría [°C]	Velocidad [rpm]
1 ^{ra} medición				
2 ^{da} medición				
3 ^{ra} medición				

Con los resultados obtenidos en el experimento se puede apreciar la variación en el rendimiento el cual está directamente relacionado con el diferencial térmico aplicando ciclo de Carnot.

5.4 Mantenimiento

El diseño del motor totalmente desmontable permite acceder y verificar el estado de todas sus piezas. Sin embargo se recomienda realizar los siguientes pasos para el buen funcionamiento.

1. Desplazado.- Esta pieza es la más delicada ya que está hecha de esponja, se puede dañar cuando se somete al motor a excesivas temperaturas y por el continuo uso del motor.

Reemplazar el desplazador es la tarea más laboriosa del motor, debido a que es necesario desmontar la tapa inferior, la que está sellada con silicona y retirar cuidadosamente el pedal y el desplazador, evitando que se deforme el brazo. El desplazador puede ser reemplazado con esponja

de 2cm de espesor, y un diámetro de 17,5 cm y posteriormente montado en su respectiva base, la que se acopla al brazo únicamente por presión.

2. Empaques y sellos de silicón.- Los empaque son de amianto y montados con silicón de altas temperaturas la única razón de cambio de estas piezas es cuando se remueve cualquiera de sus tapas por motivos de cambio del desplazador.
3. Lubricación.- Como todo motor es necesario periódicamente lubricar sus partes móviles con excepción del pistón ya que está constituido de grafito.
4. Rodamientos.- Si la falta de uso del motor es muy prolongada es necesario desmontar los rodamientos y acoplarlos a un taladro dejándolos trabajar unos 5min, esto es necesario para minimizar el esfuerzo por rozamiento que puede aumentar por la acumulación de polvo u oxido.

Aunque el mantenimiento de este motor es mínimo, previo a su funcionamiento, se recomienda realizar una inspección visual para evitar posibles problemas de funcionamiento.

CAPITULO VI

COSTOS

A continuación se presenta un desglose de los costos del proyecto.

6.1 Análisis de costos

6.1.1 Producción

PIEZA	EQUIPO (inc operario)	HORAS	COSTO _(HORA)	SUBTOTAL
Cilindro	Centro mecanizado CNC	7	\$ 27,00	\$ 189,00
Tapa Superior	Fresadora Taladro de banco	5	\$ 8,00	\$ 40,00
Tapa Inferior	Fresadora	2	\$ 8,00	\$ 16,00
Soporte	Fresadora Taladro de banco	2,5	\$ 8,00	\$ 20,00
Base del Soporte	Fresadora	1,5	\$ 8,00	\$ 12,00
Acople del regenerador	Fresadora	2,5	\$ 8,00	\$ 20,00
Cilindro de poder	Torno	1	\$ 8,00	\$ 8,00
Cilindro de ajuste	Esmeril	0,5	\$ 0,50	\$ 0,25
Soporte del eje	Torno	0,4	\$ 8,00	\$ 3,20
Eje	Torno	0,7	\$ 8,00	\$ 5,60
Pedal del desplazador	Torno	0,5	\$ 8,00	\$ 4,00
Peal de poder	Torno	0,5	\$ 8,00	\$ 4,00
Pistón	Torno	1,5	\$ 8,00	\$ 12,00
Sello del pistón	Torno	0,5	\$ 8,00	\$ 4,00
Disipador de calor pequeño	Fresadora	4	\$ 8,00	\$ 32,00
Disipador de calor grande	Fresadora	4	\$ 8,00	\$ 32,00
Acople del desplazador	Torno	1	\$ 8,00	\$ 8,00
Volante de inercia	Fresadora	1	\$ 8,00	\$ 8,00

A. Subtotal Equipo	\$ 418,05
---------------------------	------------------

6.1.2 Materiales

MATERIALES	UNID	CANTIDAD	PRECIO C/U	SUBTOTAL
<u>Elementos Motor</u>				
Perno HEX M10 inox	u	4	\$ 1,35	\$ 5,40
Rosca M10 inox HEX	u	4	\$ 0,30	\$ 1,20
Arandela plana	u	8	\$ 0,15	\$ 1,20
Perno alen c. plana M4 inox	u	14	\$ 0,16	\$ 2,24
Perno alen c. plana M3inox	u	3	\$ 0,13	\$ 0,39
Vidrio 19mm de espesor	m ²	0,1	\$ 86,00	\$ 8,60
Vidrio 15mm de espesor	m ²	0,1	\$ 72,00	\$ 7,20
Plancha Aluminio 1mm	cm ²	250	\$ 0,02	\$ 5,00
Plancha Aluminio 5mm	cm ²	810	\$ 0,04	\$ 32,40
Plancha Aluminio 3mm	cm ²	400	\$ 0,03	\$ 12,00
Eje d bronce Ø50mm	m	0,09	\$ 446,43	\$ 40,18
Tocho de dura-aluminio	Kg	0,5	\$ 50,00	\$ 25,00
Eje de nylon 50mm	m	0,5	\$ 5,00	\$ 2,50
Rodamiento 626ZZ SKF	u	2	\$ 3,99	\$ 7,98
Silicón gris 400 grados	u	1	\$ 2,00	\$ 2,00
<u>Elementos Sistema Electrónico</u>				
Pantalla de cristal 2x16 con luz	u	1	\$ 13,00	\$ 13,00
Cristal 20 MHZ	u	1	\$ 1,20	\$ 1,20
PIC 16F877	u	1	\$ 10,50	\$ 10,50
resistencias	u	20	\$ 0,02	\$ 0,40
Sensor LM35	u	3	\$ 3,50	\$ 10,50
Conector 6 pin	u	1	\$ 0,50	\$ 0,50
Conector 10 pin	u	1	\$ 0,95	\$ 0,95
Cable apantallado 2 vías	m	2	\$ 2,00	\$ 4,00
cable de 50 hilos	u	0,3	\$ 1,90	\$ 0,57
Baquelita 10x20 fibra de vidrio	u	2	\$ 1,50	\$ 3,00
Bornera 8pines en juego	u	2	\$ 1,00	\$ 2,00
Bornera 3 pines grande	u	0,6	\$ 3,00	\$ 1,80
Bornera 2 pines grande	u	0,82	\$ 2,00	\$ 1,64
Chip MOC3011	u	1	\$ 1,00	\$ 1,00
Chip 74LS46 Ánodo	u	1	\$ 1,00	\$ 1,00
Hoja de transferencia Azul	u	2	\$ 2,85	\$ 5,70
filtro 0,1mf 50V	u	2	\$ 0,06	\$ 0,12
filtro 1000 mf 25V	u	2	\$ 0,20	\$ 0,40
filtro 1000 mf 25V 25RPL	u	2	\$ 0,08	\$ 0,16
filtro 47 mf 16V	u	5	\$ 0,18	\$ 0,90

B. Subtotal Materiales	\$ 212,63
-------------------------------	------------------

6.1.3 Ingeniería y Mano de Obra

MANO DE OBRA	DETALLE	HORAS	COSTO _(HORA)	SUBTOTAL
Montaje del motor		6	\$ 5,00	\$ 30,00
Montaje del sistema electrónico		15	\$ 5,00	\$ 75,00

Subtotal Mano de Obra	\$ 105,00
------------------------------	------------------

INGENIERIA	DETALLE	COSTO	SUBTOTAL
Programación del sistema electrónico		\$ 90,00	\$ 90,00
Diseños		\$ 150,00	\$ 150,00
Dibujos de planos		\$ 200,00	\$ 200,00
Ingeniería		\$ 100,00	\$ 100,00
Supervisión		\$ 50,00	\$ 50,00

Subtotal Ingeniería	\$ 590,00
----------------------------	------------------

COSTO DIRECTO	\$ 1.325,68
IMPREVISTOS 10%	\$ 132,57
IVA 12%	\$ 159,08
TOTAL	\$ 1.617,33

Este proyecto no pretende sustituir los productos existentes en el mercado por concepto de ahorro económico, debido a que fue diseñado para exponer una fuente de energía alternativa que en un futuro podría ser utilizada en la industria desde mi punto de vista como futuro ingeniero.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- El diseño y construcción de un motor Stirling, es un trabajo largo, complejo y costoso, el cual no puede ser abarcado en un solo tema de tesis o por una sola persona. Debe ser un trabajo en equipo dedicado exclusivamente a la investigación, no solo de temas termodinámicos y de transferencia de calor, sino también de diseño, materiales y de energías renovables.
- El prototipo construido presenta una desventaja que es no tener una hermeticidad total, lo que afecta directamente a la potencia del motor y por lo tanto a su eficiencia.
- El motor Stirling es una tecnología en desarrollo, por lo tanto está sujeta a varios cambios, y no se pueden establecer conclusiones definitivas de diseño.
- Los resultados calculados son muy diferentes a los resultados prácticos, ya que cada material tiene sus propiedades térmicas y se comporta de forma distinta en el sistema.

- Mediante el motor Stirling, se pudo demostrar que es posible convertir la energía térmica en energía mecánica.

7.2 Recomendaciones

- La fuente de calor para el motor Stirling, se puede obtener de varias formas, pero es importante no exceder la temperatura del aire interno de trabajo a más de 150°C ya que el regenerador está construido con esponja, la que se puede quemar por exceso de calor.
- Es importante colocar empaques de amianto con silicón, para el ensamble del cilindro y sus tapas .
- El maquinado del pistón y del sello de grafito necesita supervisión y cuidado, ya que hay que encontrar el ajuste preciso para que la pieza deslice suavemente y no deje escapar aire, ya que es la más crítica del sistema.
- El objetivo primordial de esta tesis es Impulsar a la inversión para investigaciones en centros de educación superior, que son formadores de la futura sociedad la que no debe adoptar un rol pasivo en el que sólo nos limitemos a observar lo que está ocurriendo a nuestro alrededor sin ningún compromiso.

BIBLIOGRAFIA

- http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaiico
- http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling
- Lenssen, N. (1993). El suministro de energía en los países en desarrollo. En Brown, L.R., *La situación del mundo 1993*. Buenos Aires. Editorial Sudamericana.
- Rincón, J.M. y Romero, M. (2002). Vitrificación de los residuos radiactivos. *Investigación y Ciencia*, Abril 2002.
- Marschoff, C.M. (1992). Las fuentes de energía en el siglo XXI. Buenos Aires. Fondo de la Cultura Económica de Argentina.
- WALKER, Stirling Engines, 2da. Edición, Oxford, Clarendon Press 1980
- MOTOR STIRLING TIPO BETA TESIS Politécnica Nacional. Moreno Antonio, Ortiz Julio
- WWW.paisa_maca0.tripod.com/paginas2/inf.varia7.htm
- www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.html
- TERMODINAMICA Faires. / Virgil Morgan Faires 5^{ta} edición
- http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Carnot
- FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR – Franc Incropera / David De Witt cuarta edición.
- TERMODINAMICA Tomo II. Yunus A. Cengel / Michael A. Boles. Editorial Mc Graw Hill.

- SISTEMA DE BIODEGRADACIÓN ACELERADA PARA LA REUTILIZACIÓN DE DESECHOS VEGETALES, CICTE-ESPE - Rodríguez Ramón 2006
- DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA,/ Shingley Joseph y Mitchel Larry