



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA
ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO**

José Arturo Rodríguez Alemán

Asesorado por el Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA
ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSÉ ARTURO RODRÍGUEZ ALEMÁN

ASESORADO POR EL ING. MILTON ALEXANDER FUENTES OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Coronado Noj
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 22 de julio de 2013.


José Arturo Rodríguez Alemán



Guatemala, 10 de abril de 2015

Ing. Julio César Campos Paiz
Director Escuela Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Campos Paiz

Como Catedrático asesor y revisor del trabajo de Graduación titulado **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO**, presentado por el estudiante universitario **José Arturo Rodríguez Alemán**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

Cabe mencionar que este proceso ha sido tardado debido al tiempo que se ha invertido en la investigación y maquinado del mismo, no concluyo con pruebas totalmente positivas en el desempeño y ejecución del prototipo del motor, también concierne mencionar que el estudiante donará la bibliografía y el prototipo del motor para futuras investigaciones.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Milton Alexander Fuentes Orozco
INGENIERO MECANICO
COLEGIADO No. 8189

Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
Catedrático Asesor de Trabajos de Graduación.
Escuela de Ingeniería Mecánica



USAC
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.237.2015

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO** del estudiante **José Arturo Rodríguez Alemán** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador del Área Térmica
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, junio de 2015



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.264.2015

exit

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO** del Estudiante **José Arturo Rodríguez Alemán**, Carné No. **2007-14279** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



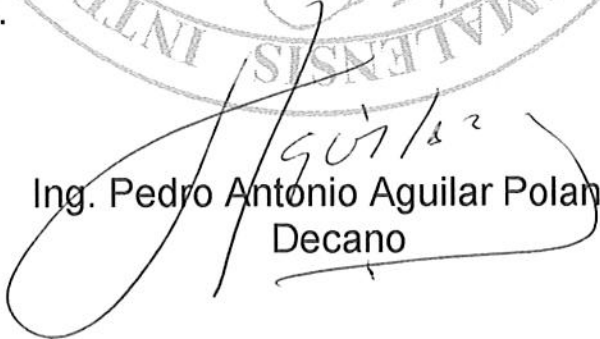
Guatemala, septiembre de 2015

/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA ACOPLADO A UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CÓNCAVO**, presentado por el estudiante universitario: **José Arturo Rodríguez Alemán**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, septiembre de 2015



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser una importante influencia y guía en mi vida.
Mis padres	Gabriel Rodríguez y Elsa Alemán, por su apoyo incondicional durante toda mi vida.
Mis hermanas	Gaby y María Rodríguez, por el cariño y la atención.
Mi hermano	Eddi Rodríguez, por lo que te conozco y lo mucho que te aprecio.
Mis sobrinos	Sofía Rosa y Guillermo Rodríguez, en sus sonrisas pequeñas veo la gran alegría de la vida.
Mis amigos	A todas las personas que he conocido en este caminar de vida universitaria, gracias a todos.
Mi consejera y guía	Hadewych Davila Henning, por tus palabras, consejos y paciencia.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por abrirme las puertas del conocimiento en esta vida.

Facultad de Ingeniería

Por ser la cuna de mi curiosidad y el inicio de mi vida profesional.

Mis catedráticos

Todos y cada uno de ustedes los que llegaban a darnos clases.

Tecniaceros

Por el apoyo con el material en especial a Jeniffer Mariela Aldana Marin.

Aceros Suecos

Por ayudarme también a conseguir parte del material utilizado en este proceso, en especial a Mervín Aceituno.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de los componentes de un motor Stirling	2
1.1.1. Zona caliente	3
1.1.2. Zona fría	5
1.1.3. Regenerador.....	6
1.1.4. Pistón.....	9
1.1.5. Desplazador.....	10
1.1.6. Mecanismo de conversión de movimiento	11
1.1.7. Volante	11
1.2. Tipos de configuración constructiva de los motores Stirling	12
1.2.1. Motores tipo alfa	12
1.2.2. Motores tipo beta	16
1.2.3. Motores tipo gamma	19
1.3. Estudio del ciclo termodinámico del motor Stirling.....	21
1.3.1. Procesos del ciclo.....	25
1.3.2. Ciclo completo	26
1.3.3. Eficiencia	28
1.3.4. Ciclo real del motor Stirling.....	30
1.4. Principales parámetros del diseño de un motor Stirling	31

1.4.1.	Influencia de los parámetros sobre la potencia indicada	33
1.4.2.	Ejemplo del cálculo	35
1.4.3.	Eficiencia mecánica de un motor Stirling.....	40
1.4.4.	Carrera y diámetro de los pistones.....	41
1.5.	Energía termosolar	42
1.5.1.	Tecnologías.....	45
1.5.2.	Tecnología cilindro parabólica.....	45
1.5.3.	Tecnología disco Stirling	49
1.5.4.	Tecnología de torre	51
1.5.5.	La radiación solar	54
2.	CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING	59
2.1.	Secuencia de cálculo.....	60
2.1.1.	Parámetros de análisis.....	60
2.2.	Análisis termodinámico de Schmidt.....	61
2.3.	Hipótesis de la teoría de Schmidt	62
2.4.	Análisis isotérmico ideal	65
2.4.1.	Proceso isotérmico.....	66
2.4.2.	Trabajo isotérmico.....	66
2.5.	Análisis térmico de un motor Stirling	68
2.6.	Eficiencia térmica del motor Stirling.....	73
2.7.	Parámetros que afectan el funcionamiento de un motor Stirling	78
3.	ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MECANISMO	81
3.1.	Diseño del mecanismo biela manivela para la transformación del movimiento.....	82

3.2.	Ecuaciones de movimiento	83
3.2.1.	Índice del ángulo de inclinación del cigüeñal	84
3.2.2.	Ángulo del desplazamiento de la biela	85
3.2.3.	Desplazamiento en función del ángulo cigüeñal.....	85
3.2.4.	Velocidad del pistón.....	85
3.2.5.	Velocidad media del pistón	86
3.2.6.	Velocidad angular	86
3.2.7.	Aceleración.....	86
3.2.8.	Fuerza	87
3.2.9.	Torque	88
3.3.	Análisis termodinámico aplicado al prototipo	88
3.4.	Consideraciones para el cálculo	89
3.5.	Ecuaciones generales a utilizar	89
3.6.	Cálculo	90
3.7.	Análisis térmico aplicado al prototipo	95
3.8.	Análisis térmico en el foco caliente	96
3.8.1.	Cálculo del calor Q1	97
3.8.2.	Cálculo del calor Q2	98
3.9.	Análisis térmico en el foco frío	99
3.10.	Cálculo térmico para el motor Stirling	102
3.10.1.	Cálculo de los calores que entran y salen en el motor	103
3.10.2.	Cálculo de h_e y h_c	104
4.	DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR.....	107
4.1.	Dimensionamiento del mecanismo biela manivela	108
4.2.	Dimensionamiento del desplazador	108
4.3.	Dimensionamiento del pistón de potencia	109
4.4.	Dimensionamiento del cilindro del foco caliente	110

4.5.	Vástago del desplazador	110
4.6.	Conectores	111
4.7.	Pines	112
4.8.	Ejes	112
4.9.	Construcción de las partes del motor	113
4.10.	Diseño inicial del motor Stirling con mecanismo biela manivela	113
CONCLUSIONES.....		117
RECOMENDACIONES		119
BIBLIOGRAFÍA.....		121
ANEXOS.....		123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema básico motor Stirling tipo alfa	2
2.	Motor Stirling tipo beta, mecanismo rómbico	3
3.	Zona caliente.....	4
4.	Zona fría.....	6
5.	Regeneradores anulares internos o estáticos	7
6.	Despiece del generador con rueda de arrastre	7
7.	Pistón con biela.....	9
8.	Mecanismo biela manivela	11
9.	Volante	12
10.	Motor Stirling tipo alfa.....	13
11.	Esquema de un motor Stirling tipo beta	17
12.	Esquema motor tipo gama	19
13.	Zonas de un motor Stirling	21
14.	Ciclo Stirling ideal.....	22
15.	Fase 1	22
16.	Fase 2	23
17.	Fase 3	24
18.	Fase 4	24
19.	Ciclo de Stirling teórico diagrama P-v, procesos de ciclo.....	27
20.	Esquema de una máquina térmica.....	28
21.	Ciclo real vs. ciclo ideal.....	30
22.	Diagrama Presión-Volumen (P-v)	39
23.	Central térmica solar de concentración	43

24.	Diferentes formas de concentración solar.....	44
25.	Sistema cilindro parabólico con seguimiento solar	46
26.	Esquema de planta termosolar de cilindros parabólicos.....	47
27.	Vista de los concentradores parabólicos	48
28.	Esquema del concentrador de disco parabólico cóncavo	49
29.	Sistema disco Stirling compuesto por segmentos.....	50
30.	Esquema torre de concentración	52
31.	Vista aérea de una central termosolar de torre de concentración.....	53
32.	Mapa solar de Guatemala.....	57
33.	Diagrama generalizado del mecanismo de una máquina Stirling	63
34.	Proceso isotérmico	68
35.	Representación esquemática del motor Stirling tipo alfa	69
36.	Representación de análisis del motor Stirling	72
37.	Ciclo ideal Stirling	73
38.	Compresión isotérmica (proceso 1-2).....	74
39.	Suministro de calor a volumen constante (proceso 2-3).....	75
40.	Expansión isotérmica (proceso 3-4).....	75
41.	Extracción de calor a volumen constante (proceso 4-1)	76
42.	Diagrama P-V y S-T del ciclo Stirling (línea continua) y Carnot (línea discontinua).....	78
43.	Esquema mecanismo biela manivela.....	83
44.	Gráfica de velocidad <i>versus</i> desplazamiento.....	87
45.	Esquema general de un motor Stirling.....	89
46.	Esquema general de energía en una celda	90
47.	Esquema general para el cálculo termodinámico aplicado al prototipo.....	91
48.	Esquema de cálculo para las celdas K, R y H	93
49.	Esquema de cálculo para las celdas C y E.....	94

50.	Esquema de cálculo para la transferencia de calor en la zona caliente.....	96
51.	Circuito térmico equivalente para hallar Q1	97
52.	Circuito térmico equivalente para hallar Q2	98
53.	Esquema de cálculo para la refrigeración por aletas	99
54.	Circuito térmico equivalente para hallar el calor rechazado	101
55.	Esquema de cálculo el análisis térmico aplicado al prototipo.....	103
56.	Desplazador	109
57.	Pistón de potencia.....	109
58.	Cilindro del foco caliente A.....	110
59.	Cilindro del foco caliente B.....	111
60.	Conector de aluminio al final del vástago.....	111
61.	Eje de aluminio.....	112
62.	Fotos del ensamble del motor Stirling con mecanismo biela manivela.....	115
63.	Ensamble final motor Stirling.....	115
64.	Motor acoplado al disco parabólico.....	116

TABLAS

I.	Capacidades caloríficas volumétricas	8
II.	Nomenclatura temperatura y calor	29
III.	Símbolos usados en la teoría de Schmidt	32
IV.	Promedios mensuales y anuales de radiación solar (Cal/cm ² /min).....	56
V.	El sistema de ecuaciones obtenidas del análisis	72
VI.	Tabla de parámetro de análisis para movimiento alternativo	84
VII.	Medidas de los componentes principales.....	114

GLOSARIO

Calor	Es una forma de energía. El calor en sí no es una energía, sino el proceso por el cual se modifica o se transfiere energía de un medio a otro. La energía siempre se transfiere de un cuerpo caliente hacia uno más frío.
Capacidad calorífica	La capacidad calorífica de una sustancia se refiere a la cantidad de fljo de calor necesario para elevar la temperatura en un grado Celsius. Mientras mayor sea la masa de la sutancia, se requiere más calor para producir el calentamiento. Normalmente la capacidad calorífica se expresa por mol o por gramo de sustancia. Cuando se expresa por gramo de sustancia se le denomina calor específico y si se expresa por mol, se llama capacidad calorífica molar.
Energía interna	Cada vez que se calienta un objeto, la energía recibida se acumula en el material del que está compuesto. Cualquiera sea el sistema en estudio, se trata de un medio formado por átomos, iones o moléculas. A la suma de las energías individuales (cinéticas y potenciales) de todas las partículas, sean estas moléculas, átomos o iones, se le denomina energía interna.

A la energía interna contribuyen diversas formas de energía, que se pueden resumir en energía de traslación, rotación, vibración, electrónica, interacciones moleculares y energía nuclear. Cuando se calienta agua, por el efecto de un aumento de la temperatura, las moléculas se trasladan de un punto a otro, rotan y vibran con mayor intensidad. Por otro lado con el aumento de la temperatura disminuyen las interacciones moleculares. Mientras mayor sea la masa de lo que se está calentando, se debe suministrar más energía. Por lo tanto, la energía interna depende de la temperatura y de la masa del material. La energía interna es una función de estado.

En el caso de la máquina de vapor

El calor no es una energía que se acumula en el vapor, simplemente corresponde al proceso de transferencia de energía térmica entre dos cuerpos.

Entalpía (H)

La mayor parte de los procesos donde hay transferencias de calor ocurren en sistemas abiertos en contacto con la atmósfera, la cual mantiene su presión constante. Así sucede en las plantas, los animales y en el laboratorio. El flujo de calor a presión constante, se le denomina cambio o variación de entalpía y se designa por ΔH . Dado que la mayor parte de las reacciones químicas se efectúan a presión constante, es

normal llamar a la entalpía como calor del proceso.

**Ley de la
Conservación de
la Energía**

La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma de manera que la energía permanece constante en el Universo.

Trabajo

El trabajo en sí no es una energía, sino la forma por la cual se modifica o se transfiere energía de un medio a otro. Sin embargo, la energía y el trabajo se miden en la misma unidad.

Transferencia

La variación de energía interna puede aumentar o disminuir según sea el tipo de transferencia que se realice. Cada vez que un sistema absorbe energía (aumento de la variación de energía interna), significa que desde el exterior (entorno) se transfirió calor en la forma de flujo térmico o se hizo un trabajo sobre el sistema. Específicamente a los procesos de flujo térmico en que el sistema absorbe calor se le denomina procesos endotérmicos. Aquellos en que se libera calor, se les llama procesos exotérmicos.

Unidades de energía

La unidad más conocida es la caloría (Cal). Corresponde a la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 °C. Esta es una cantidad muy pequeña de energía, por lo que es común utilizar la Kilocaloría

(Kcal).

La unidad Joule es preferida en las ciencias porque se puede derivar directamente de unidades que se emplean para expresar la energía cinética y potencial.

RESUMEN

El alza que ha tenido la vida en los últimos años, en mucho se debe a la dependencia del petróleo, esto produce alarma y hace que replanteen todas las alternativas que existen para mitigar este mal, el motor Stirling se postula dentro de estas alternativas, siendo un motor versátil ya que puede funcionar muy bien con energías de fuentes alternas como tradicionales.

En el mercado emergente de las energías alternativas, se ha empleado el motor Stirling en el campo de la energía termosolar y prueba de esto es el proyecto EuroDish-Stirling que para el 2015, pretende alcanzar un aporte de 420 mega watts (MW) de potencia eléctrica para el territorio de la Unión Europea.

El desarrollo de esta tecnología en Guatemala está bastante rezagada y parte de lo que este trabajo pretende alcanzar es contribuir y aportar al campo de la energía termosolar y mostrar sus beneficios, lo cual justifica la construcción de un motor Stirling tipo beta acoplado a un concentrador solar, el fin de este trabajo es exponer que la concentración solar se puede convertir en energía mecánica.

El motor tipo beta es el más eficiente de los tres diseños básicos de motores Stirling, es por eso la decisión de construir uno, dentro de sus ventajas se puede mencionar que su eficiencia es mayor al 40 % este motor estará acoplado a un espejo parabólico cóncavo de 36" de diámetro.

OBJETIVOS

General

Diseñar y construir un motor Stirling tipo beta acoplado a un concentrador solar parabólico cóncavo.

Específicos

1. Generar energía mecánica con el uso del motor Stirling mediante concentración solar.
2. Convertir la radiación solar en energía de alta temperatura como fuente calor externa del motor Stirling.
3. Contribuir como proyecto innovador en el campo de la energía termosolar en Guatemala y ser referencia para futuros estudios y desarrollos tecnológicos aplicados al campo de la termodinámica.

INTRODUCCIÓN

Cada vez se hace más necesaria la investigación sobre el aprovechamiento de las fuentes de energía alternativa, renovable y limpia, debido al incremento en el consumo de la potencia eléctrica y las consecuencias negativas que el petróleo como materia prima de la industria tiene sobre el medio ambiente, la economía y las políticas de los países. Las tendencias de la generación eléctrica están orientadas a la eficiencia y al bajo costo de la misma, es por eso que se toma la energía termosolar como una de las más viables, ya que esta se puede obtener con un alto rendimiento de eficiencia y con un impacto ambiental mucho menor que cualquier otra, (generalmente refiriéndose a un impacto visual).

La conversión de la Concentración de Energía Solar (CES), en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica se logra a través del dispositivo llamado motor Stirling o motor de aire caliente, que recibe la concentración de la energía solar en la cabeza del pistón calentando el aire o fluido de trabajo en su interior llevándolo a una presión elevada que se transmiten en el mecanismo pistón-biela-manivela.

El estudio de la energía solar en Guatemala es un tema rezagado, ya que se cuenta únicamente con un mapa del promedio de la radiación solar del país y la instalación de paneles solares, dejando a un lado la otra mitad del uso de la energía del Sol que es la termosolar y de la cual se ocupará el presente trabajo de graduación.

Por medio de una propuesta de diseño de un motor Stirling, tomando en cuenta su parte mecánica, materiales y termodinámica se podría generar electricidad y que de esto se desprenda una herramienta para posteriores estudios tanto en la mejora de eficiencia del diseño, diferentes diseños y estudios de aprovechamiento de radiación solar.

1. GENERALIDADES

En 1816, el reverendo escocés Robert Stirling patentó un motor que funcionaba con aire caliente. La patente de este motor era el glamuroso final de una serie de intentos de simplificar las máquinas a vapor. 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 había inventado el acero y las calderas explotaban con facilidad.

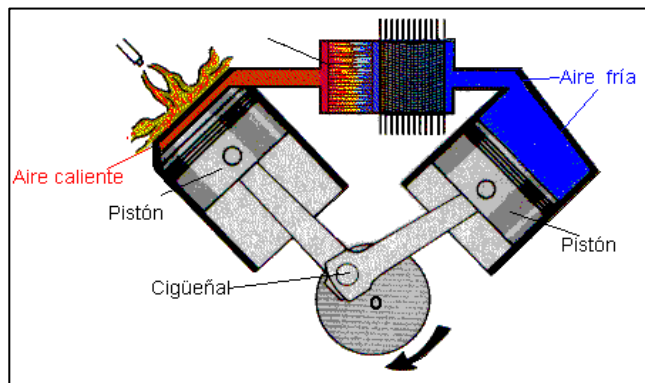
El motor de Stirling realizaba los mismos procesos de calentamiento y enfriamiento de un gas, pero todo dentro del motor y el gas era aire en vez de vapor de agua, por lo que el motor no necesitaba caldera. Un tipo de motor bastante común en su época, sobre todo para pequeñas máquinas de uso doméstico tales como ventiladores, bombas de agua, entre otros. Su potencia específica no era muy elevada pero su sencillez y silencio eran magníficos.

El principio del funcionamiento es tan solo el calentar y enfriar un medio de trabajo, sea aire, helio, hidrógeno o incluso un líquido. Calentando ese medio provoca una expansión del mismo dentro del motor.

El medio de trabajo es desplazado a otra parte del motor dónde es enfriado. Al enfriar el medio, el volumen se reduce de nuevo.

Ese cambio de volúmenes activa un pistón de trabajo el cual ejerce el trabajo del motor. El motor es hermético por lo que siempre se utiliza el mismo medio en un circuito cerrado (no hay escape del medio de trabajo).

Figura 1. **Esquema básico motor Stirling tipo alfa**



Fuente: *Esquemas básicos*. <http://www.ecotec2000.de/espanol/stir2.htm>. Consulta: 12 de agosto de 2103.

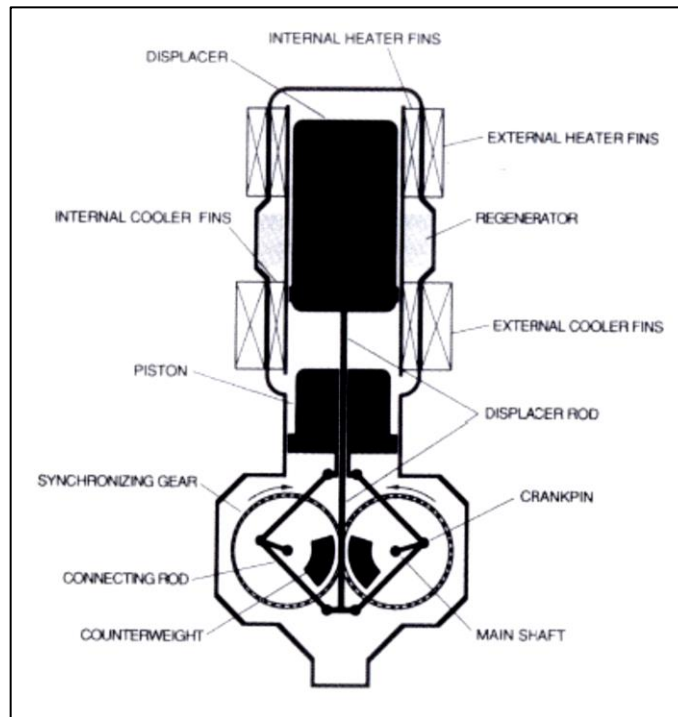
Inicialmente muy común, esa tecnología murió con el invento de los motores Otto y Diesel, hasta renacer al inicio del siglo XX impulsado por la compañía Philips en Holanda. La segunda guerra mundial puso fin a una serie de nuevos desarrollos y solo hace 25 años volvieron a iniciar nuevas iniciativas y desarrollos. Hoy en día se utiliza motores Stirling para generar calor, para impulsar submarinos y próximamente como motores en automóviles híbridos.

1.1. Descripción de los componentes de un motor Stirling

El motor Stirling consta básicamente de dos pistones uno donde está la zona caliente y otro donde se encuentra la zona fría, puede tener un solo cilindro o puede constar de dos dependiendo de su configuración (alfa, beta y

gamma), los componentes del mecanismo biela-manivela, el volante, y en muchos casos el regenerador.

Figura 2. **Motor Stirling tipo beta, mecanismo rómbico**



Fuente: SENFT, James. *An introduction to Stirling engine*. p. 70.

En la figura 2 se pueden apreciar las partes principales de un motor Stirling tipo beta con mecanismo rómbico.

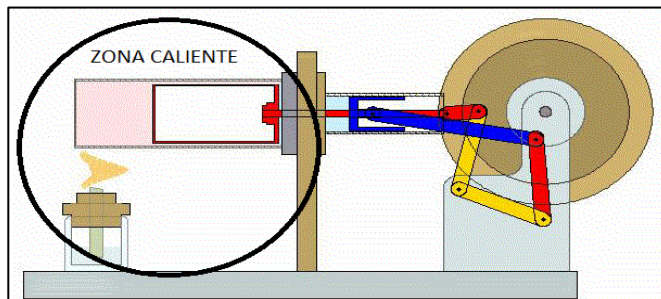
1.1.1. Zona caliente

Esta es la parte del motor donde se le entrega (transfiere) calor, y, por consiguiente, estará sometido a altas temperaturas (alrededor de 600 °C). Los

materiales a utilizar para su fabricación deberían ser materiales resistentes al desgaste y las altas temperaturas como el acero inoxidable o aceros aleados.

Esta parte puede ser de varias formas. Su forma más simple es cuando no hay ningún tipo de presurización dentro del cilindro, esta puede ser un cilindro con una tapa plana, como se muestra en la figura 3. Esta configuración se puede adoptar en motores pequeños y experimentales que no estén presurizados.

Figura 3. **Zona caliente**



Fuente: *Zona caliente*. <http://motorstirlingyadyrtectsup.blogspot.com/>. Consulta: 3 de septiembre de 2013.

El diseño de la zona caliente varía de acuerdo al fluido de trabajo a utilizar, esto es debido a las propiedades del fluido.

Por ejemplo, el helio (He) tiene una conductividad térmica seis veces mayor que la conductividad del aire, por esta razón el diámetro interno de los tubos de la zona caliente debería ser más pequeño si se utiliza aire como fluido de trabajo, esto es para hacer más eficiente la transferencia de calor debido a la baja conductividad térmica del aire. Un motor diseñado para utilizar aire, si

funciona eficientemente utilizando He y di-hidrógeno (H₂), pero no ocurre lo contrario.

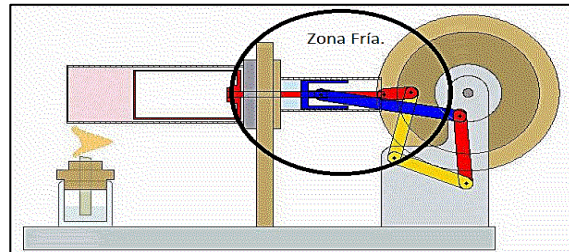
Las configuraciones mostradas anteriormente dan una idea para diseñar esta parte del motor Stirling, para la aplicación que se desee, esto no quiere decir que tiene que ser de la misma forma como se muestran en las fotografías, sino de captar la esencia de esto y hacerlo de la forma más conveniente para la configuración del motor Stirling a utilizar, sin aumentar mucho el volumen muerto.

1.1.2. Zona fría

En esta parte se extrae calor del motor. La extracción de calor puede realizarse por convección libre o forzada. En el caso que sea libre, esta puede realizarse mediante la colocación de aletas de aluminio para disipar rápidamente el calor.

En el caso de una refrigeración forzada, esta se realiza acondicionando una camiseta de agua. Esta parte puede hacerse de acero inoxidable, hierro fundido, aluminio, cobre, entre otros. Estos dos últimos materiales se pueden utilizar en motores de baja potencia o experimentales, ya que en motores de alta potencia sería necesario un mayor espesor de los mismos y el costo sería elevado.

Figura 4. **Zona fría**



Fuente: *Zonas frías*. <http://motorstirlingyadyrtecsup.blogspot.com/>. Consulta: 3 de septiembre de 2013.

1.1.3. **Regenerador**

Esta es una parte muy importante del motor Stirling. Es sumamente necesario hacer uso del regenerador cuando el motor Stirling es presurizado, y también, cuando el motor tenga grandes dimensiones a pesar que no esté presurizado. El regenerador absorbe y entrega calor al fluido de trabajo compensando una parte del calor perdido por el motor, haciendo que la potencia y velocidad del motor se incrementen, esto sucede porque cuando trabaja el regenerador el fluido de trabajo necesitaría absorber menos calor en cada ciclo, con lo cual hace que el ciclo necesite de menos tiempo para realizarse y también se consuma menos cantidad de combustible.

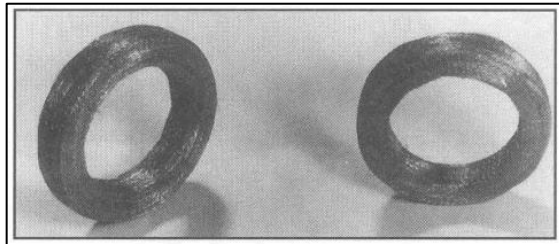
El regenerador trabaja de la siguiente manera: suponiendo que el gas en la zona caliente está a 400 °C y en la zona fría a 40 °C. Cuando el gas pasa de la zona fría a la zona caliente.

Un regenerador ideal elevaría la temperatura del gas hasta 300 °C, por lo tanto, el calentador tiene que entregar menos cantidad de calor para subir la temperatura del gas de 300 a 400 °C; de la misma manera, cuando el gas pasa

de la zona caliente a la zona fría, el calor absorbido por el regenerador dejaría al gas que está en el lado frío a una temperatura de 100 °C, y solo se tendría que enfriar un poco para pasar de 100 a 40 °C. Con esto se lograría, en ambos casos, reducir el tiempo de calentamiento y enfriamiento del gas con lo cual el ciclo se desarrolla más rápidamente.

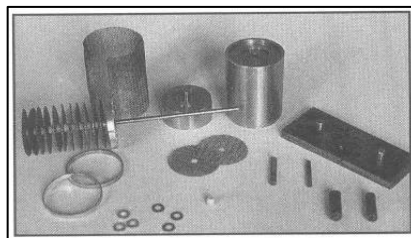
Existen varias disposiciones de los regeneradores, entre los cuales están los estáticos y los móviles. Los móviles mayormente están dentro del desplazador y los estáticos pueden estar dentro o fuera del cilindro.

Figura 5. **Regeneradores anulares internos o estáticos**



Fuente: RIZZO, James G. *The Stirling engine manual*. p. 25.

Figura 6. **Despiece del generador con rueda de arrastre**



Fuente: RIZZO, James G. *The Stirling engine manual*. p. 26.

El material del regenerador debe tener una alta capacidad de almacenar energía térmica para que su temperatura sea estable. También, debe tener una conductividad térmica baja en la dirección del flujo, para generar un gradiente de temperatura. La capacidad térmica volumétrica de un material se mide con el producto de la densidad por el calor específico ($\rho \times C_p$ (J/m³.K)), a mayor valor el material puede absorber más calor. En la siguiente tabla se pueden observar los valores de algunos materiales.

Tabla I. **Capacidades caloríficas volumétricas**

Material	Calor específico	Densidad	Capacidad calorífica volumétrica
	kcal/kg °C	kg/m ³	kcal/m ³ °C
Agua	1	1 000	1 000
Acero	0,12	7 850	950
Tierra seca	0,44	1 500	660
Granito	0,19	2 645	529
Madera de roble	0,57	750	430
Ladrillo	0,20	2 000	400
Madera de pino	0,6	640	384
Piedra arenisca	0,17	2 200	374
Piedra caliza	0,22	2 847	484
Hormigón	0,16	2 300	350
Mortero de yeso	0,2	1 440	288
Tejido de lana	0,32	111	35
Poliestireno expandido	0,4	25	10
Poliuretano expandido	0,38	24	9
Fibra de vidrio	0,19	15	2,8
Aire	0,24	1,2	0,29

Fuente: *Wikipedia*. http://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_calor%C3%ADfica. Consulta: 24 de septiembre de 2103.

Los materiales que se utilizan mayormente en los regeneradores son láminas, lana o hilos de acero inoxidable bastantes delgados (0,1 mm).

1.1.4. Pistón

Esta parte es la que realiza el trabajo motriz y va conectado al mecanismo de transformación de movimiento. El pistón debe ser ligero porque el gas realiza trabajo solo durante la expansión. Debido a que el pistón está en la zona fría del motor, se puede utilizar aluminio para su construcción. Para motores pequeños experimentales también utilizan teflón.

El pistón debe llevar anillos en el caso de que el motor sea presurizado y se podría obviar estos en el caso de ser un motor pequeño o experimental.

Figura 7. **Pistón con biela**



Fuente: *Motor a pistón*. <http://www.takeoffbriefing.com/como-funciona-un-motor-alternativo-motor-a-piston/>. Consulta: 26 de septiembre de 2013.

1.1.5. Desplazador

Esta parte es la encargada de desplazar el aire de una zona a otra. Esta parte debe ser capaz de generar un gradiente de temperatura entre la zona caliente y la zona fría. Idealmente, esto se lograría haciendo que la cámara central del desplazador sea un aislador térmico, pero debido a que sería complicada su construcción, se puede hacer el desplazador largo y que el material tenga baja conductividad térmica; por otra parte, este debe ser capaz de soportar altas temperaturas, porque la zona caliente siempre se mantendrá a alta temperatura. En motores pequeños y experimentales, el desplazador suele comportarse como un regenerador haciendo que este tenga paredes lo más delgadas posible.

El desplazador también debe ser liviano porque, en la expansión, sube, juntamente con el pistón, y si estos son pesados hacen más difícil la expansión del gas, y, por consiguiente, disminuye la potencia. Mayormente, los desplazadores se construyen de acero inoxidable por sus propiedades de conductividad térmica y de resistencia a altas temperaturas. Se sabe que en motores pequeños (de exhibición), también se pueden hacer de aluminio, pero esto no sucede en motores más grandes.

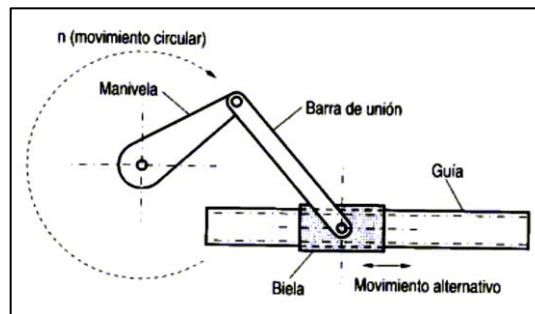
La longitud de un desplazador puede ser de 1 a 3 veces su diámetro y la holgura radial que debe haber entre este y el cilindro es de 1 a 2 % del diámetro del cilindro, para que exista un efecto de regeneración. Algunos investigadores consideran que el diámetro óptimo del desplazador es el 98 % del diámetro del cilindro, lo cual es equivalente al 1 % mencionado anteriormente.

1.1.6. Mecanismo de conversión de movimiento

Se trata de un mecanismo capaz de transformar el movimiento circular en movimiento alternativo. Dicho sistema está formado por un elemento giratorio denominado manivela que va conectado con una barra rígida llamada biela, de tal forma que al girar la manivela la biela se ve obligada a retroceder y avanzar, produciendo un movimiento alternativo.

Es un sistema reversible mediante el cual girando la manivela se puede hacer desplazar la biela y viceversa. Si la biela produce el movimiento de entrada (como en el caso de un "pistón" en el motor de un automóvil), la manivela se ve obligada a girar.

Figura 8. Mecanismo biela manivela



Fuente: *Mecanismos de conversión de movimiento*. <http://www.takeoffbriefing.com/como-funciona-un-motor-alternativo-motor-a-piston/>. Consulta: 28 de septiembre de 2013.

1.1.7. Volante

Esta es la parte que entrega energía al ciclo para que se produzca la compresión del fluido de trabajo y también ayuda a mantener estable el giro del motor.

Figura 9. **Volante**



Fuente: *Poleas y turbinas*. [http://www. Refacciones fernandosepulveda. com/polea-turbina-7-x-1in.html](http://www.Refacciones fernandosepulveda.com/polea-turbina-7-x-1in.html). Consulta: 30 de septiembre de 2013.

1.2. Tipos de configuración constructiva de los motores Stirling

Basado en la teoría de Schmidt, a continuación se explica cómo funciona la teoría termodinámica junto con las diferentes configuraciones que se han propuesto a lo largo de la historia, esta información ha sido tomada de la obra de Koichi Hirata, *Schmidt Theory for stirling engine*, 1997.

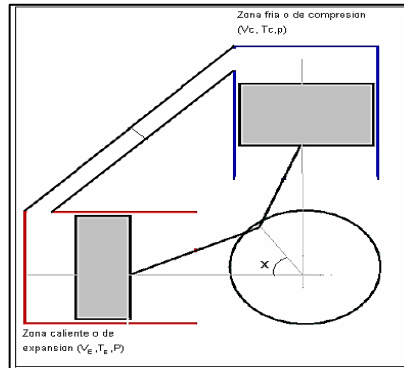
Existen tres tipos de configuraciones para un motor Stirling:

- Configuración tipo alfa
- Configuración tipo beta
- Configuración tipo gamma

1.2.1. Motores tipo alfa

La siguiente figura muestra el esquema del motor tipo alfa.

Figura 10. **Motor Stirling tipo alfa**



Fuente: *Motores alfa*. <http://personales.able.es/jgros/alfa.htm>. Consulta: 8 de octubre de 2013.

Los volúmenes en la zona fría y caliente para un ángulo del cigüeñal son lo primero que se determina. El volumen actual, que es el volumen en cada parte del ciclo, está determinado por el ángulo X (X=0 cuando el pistón de expansión se encuentra en la parte más alta del recorrido).

En las ecuaciones que se van a nombrar a continuación se cambiará el subíndice (C) de caliente, que hace referencia a las variables asociadas a la zona caliente por el subíndice (E) expansión. Asimismo, se cambiará el subíndice (F) de frío que hace referencia a la zona fría por (C). Por ejemplo:

El volumen actual de expansión V_E es determinado por la siguiente ecuación y depende de V_{SE} y V_{DE} así como del ángulo X.

$$V_E = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos X) + V_{DE} \quad \text{Ecuación (14)}$$

El volumen actual de la zona fría V_C es determinado por la ecuación siguiente y depende de V_{SC} , V_{DC} y del ángulo X.

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos(x - dx)) + V_{DC} \quad \text{Ecuación (15)}$$

El volumen actual total está definido en la ecuación siguiente

$$V = V_E + V_R + V_C \quad \text{Ecuación (16)}$$

Teniendo en cuenta las consideraciones (a), (b) y (c), la masa total al interior del motor m es calculada usando la presión del motor P y las temperaturas en las diferentes zonas así:

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_C}{RT_C} \quad \text{Ecuación (17)}$$

La relación de temperaturas t , relación de volúmenes de barridos v y las relaciones de volúmenes muertos se determinan usando las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (22)}$$

La temperatura en el regenerador es calculada teniendo en cuenta la consideración siguiente:

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Cuando la ecuación del volumen total (V) es transformada usando las ecuaciones de la masa de fluido de trabajo (m) y la relación de volúmenes muertos (X_{DC}), la masa total de aire es la siguiente:

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_C} \{S - B \cos(x - a)\} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

$$a = \tan^{-1} \left(\frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx} \right) \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos dx + v^2} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$P = \frac{2mRT_C}{V_{SE}\{S - B \cos(\theta - a)\}} \quad \text{Ecuación (28)}$$

La presión media es un arreglo matemático muy útil para cálculos posteriores. Es una presión que equivale a la presión promedio que hay al interior del motor durante todo el ciclo.

$$P_{mean} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRT_c}{V_{SE}\sqrt{S^2-B^2}} \quad \text{Ecuación (29)}$$

Dónde:

$$c = \frac{B}{S} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{S^2-B^2}}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{mean}\sqrt{1-c^2}}{1-c\cos(x-a)} \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$P_{min} = \frac{2mRT_c}{V_{SE}(S+B)} \quad \text{Ecuación (32)}$$

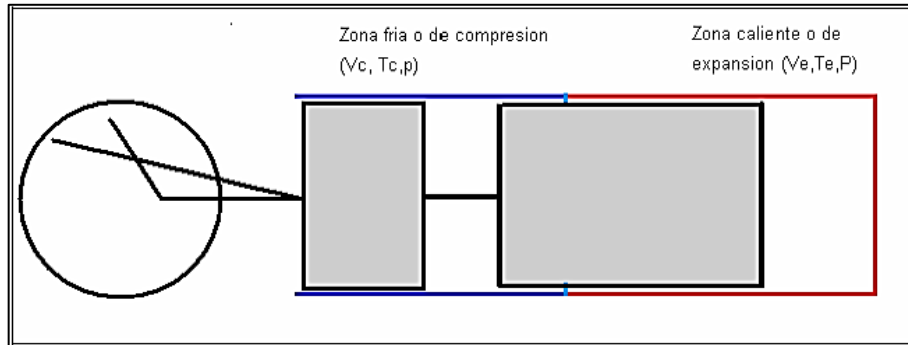
$$P = \frac{P_{min}(S+B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{min}(1+c)}{1-c\cos(x-a)} \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$P = \frac{P_{max}(S-B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{max}(1-c)}{1-c\cos(x-a)} \quad \text{Ecuación (34)}$$

1.2.2. Motores tipo beta

Las ecuaciones del motor tipo beta son similares a las de alfa. La siguiente gráfica muestra el esquema funcional.

Figura 11. Esquema de un motor Stirling tipo beta



Fuente: *Motores beta*. http://jmirez.files.wordpress.com/2012/08/stirling_configuracion_beta.jpg.
Consulta: 10 de octubre de 2013.

El volumen actual en las zonas de expansión y compresión es descrito en las siguientes fórmulas:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos X) + V_{DE} \quad \text{Ecuación (35)}$$

$$V_c = \frac{V_{SE}}{2} \{1 - \cos(x)\} + \frac{V_{SC}}{2} \{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} - V_B \quad \text{Ecuación (36)}$$

En el caso del motor tipo beta, el pistón desplazador y el de potencia se encuentran ubicados en el mismo cilindro. Esto permite que los recorridos de ambos pistones se superpongan y cuando esto ocurre se crea un espacio de trabajo efectivo V_B que es calculado en la siguiente ecuación.

$$V_B = \frac{V_{SE} + V_{SC}}{2} \sqrt{\frac{V_{SE}^2 + V_{SC}^2}{4} - \frac{V_{SE} \cdot V_{SC}}{2} \cos dx} \quad \text{Ecuación (37)}$$

El volumen actual V está definido en la ecuación

$$V = V_E + V_R + V_C \quad \text{Ecuación (38)}$$

La presión al interior del motor será:

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{1-C^2}}{1-C\cdot\cos(x-a)} = \frac{P_{min}(1+C)}{1-c\cdot\cos(x-a)} = \frac{P_{max}(1-C)}{1-C\cdot\cos(x-a)} \quad \text{Ecuación (39)}$$

Donde:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (41)}$$

$$X_B = \frac{V_B}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (42)}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (43)}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (44)}$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (45)}$$

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1}\right) \quad \text{Ecuación (46)}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 - 2X_B \quad \text{Ecuación (47)}$$

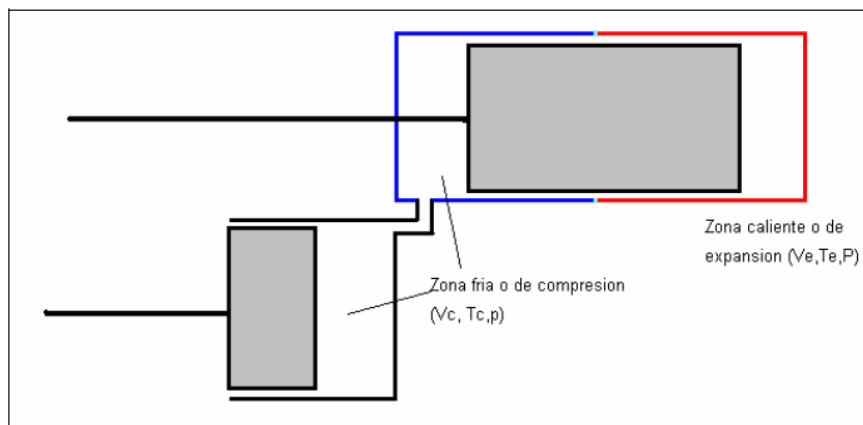
$$B = \sqrt{t^2 + 2(t - 1)v \cos dx \ v^2 - 2t + 1} \quad \text{Ecuación (48)}$$

$$c = \frac{B}{S} \quad \text{Ecuación (49)}$$

1.2.3. Motores tipo gamma

Las siguientes ecuaciones muestran el modelo de cálculo para el motor gama:

Figura 12. Esquema motor tipo gama



Fuente: *Motores gamma*. <http://motorstirlinggrupodefisica.blogspot.com/>. Consulta: 30 de octubre.

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} \{1 - \cos x\} + V_{DE} \quad \text{Ecuación (50)}$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2} \{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} \quad \text{Ecuación (51)}$$

$$V = V_E + V_R + V_C \quad \text{Ecuación (52)}$$

$$P = \frac{M_{mean}\sqrt{1-C^2}}{1-C\cdot\cos(x-a)} = \frac{P_{min}(1+C)}{1-C\cdot\cos(x-a)} = \frac{P_{max}(1-C)}{1-C\cdot\cos(x-a)} \quad \text{Ecuación (53)}$$

Donde:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad \text{Ecuación (54)}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (55)}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (56)}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (57)}$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad \text{Ecuación (58)}$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad \text{Ecuación (59)}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tV_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 \quad \text{Ecuación (60)}$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cdot \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad \text{Ecuación (61)}$$

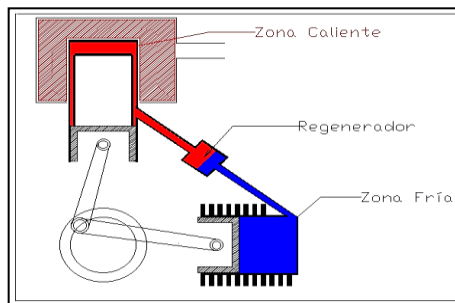
$$C = \frac{B}{S} \quad \text{Ecuación (62)}$$

1.3. Estudio del ciclo termodinámico del motor Stirling

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

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

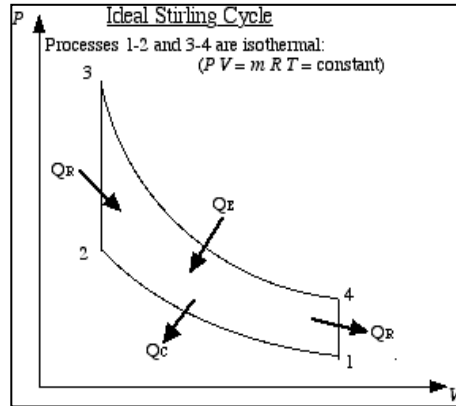
Figura 13. Zonas de un motor Stirling



Fuente: *Zonas de un motor*. <http://motorstirlingyadyrtectsup.blogspot.com/>. Consulta: 2 de noviembre de 2013.

El ciclo se compone de cuatro fases que se pueden observar en el diagrama presión versus volumen (P-v).

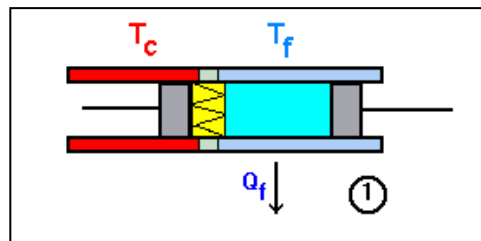
Figura 14. **Ciclo Stirling ideal**



Fuente: *Ciclo de Stirling*. http://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1_6/StirlCogen/StirlCogen.html. Consulta: 2 de noviembre de 2013.

En 1 el cilindro frío está a máximo volumen y el cilindro caliente está a volumen mínimo, pegado al regenerador. El regenerador se supone está "cargado" de calor (una discusión más extensa sobre este punto se ve en el párrafo sobre el regenerador). El fluido de trabajo está a temperatura fría (T_f) a volumen máximo (V_{max}) y a presión en la etapa uno (P_1).

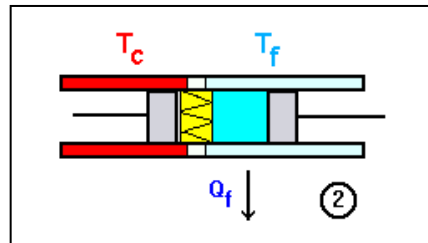
Figura 15. **Fase 1**



Fuente: *Zonas de un motor Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/string1.htm. Consulta: 4 de noviembre de 2013.

Entre 1 y 2 se extrae la cantidad de calor de salida (Q_f) de calor del cilindro (por el lado frío). El proceso se realiza a T_f constante. Por lo tanto al final en 2 se estará a volumen mínimo, (V_{\min}), T_f y la presión en la etapa dos (P_2). El pistón de la zona caliente no se ha desplazado. En esta evolución el sistema absorbe trabajo.

Figura 16. **Fase 2**



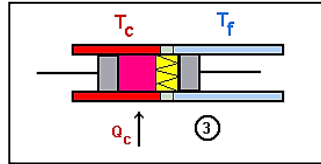
Fuente: *Zonas de un motor Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/stirling1.htm.

Consulta: 4 de noviembre de 2013.

Entre 2 y 3 los dos pistones se desplazan en forma paralela. Esto hace que todo el fluido atraviese el regenerador. Al ocurrir esto, el fluido absorbe la cantidad de calor que queda en el regenerador (Q') y eleva su temperatura de temperatura en el foco frío (T_f) a temperatura en el foco caliente (T_c).

Por lo tanto al final en 3 se estará a T_c , volumen mínimo (V_{\min}) y la presión en la etapa tres (P_3). El regenerador queda "descargado". En esta evolución el trabajo neto absorbido es cero (salvo por pérdidas por roce al atravesar el fluido el regenerador).

Figura 17. **Fase 3**



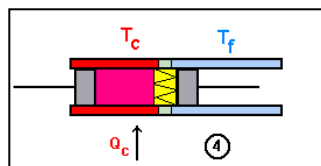
Fuente: *Zonas de un motor Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/string1.htm.

Consulta: 4 de noviembre de 2013.

Entre 3 y 4 el pistón frío queda junto al lado frío del regenerador y el caliente sigue desplazándose hacia un mayor volumen. Se absorbe la cantidad de calor Q_c y el proceso es idealmente isotérmico. Al final el fluido de trabajo está a T_c , el volumen es volumen máximo (V_{max}) y la presión en la etapa cuatro (P_4).

Finalmente los dos pistones se desplazan en forma paralela de 4 a 1, haciendo atravesar el fluido de trabajo al regenerador. Al ocurrir esto el fluido cede calor al regenerador, este se "carga de calor", la temperatura del fluido baja de T_c a T_f y la presión baja de P_4 a P_1 . Al final de la evolución el fluido está a V_{max} , P_1 y T_f . El regenerador sigue "cargado" de calor.

Figura 18. **Fase 4**



Fuente: *Zonas de un motor Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/string1.htm.

Consulta: 4 de noviembre de 2013.

1.3.1. Procesos del ciclo

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

- Proceso 1→2: es una expansión isotérmica a la temperatura T_1 , desde el volumen inicial V_1 al volumen final V_2 .

$$\text{Variación de energía interna, } \Delta U_{12}=0 \quad \text{Ecuación (63)}$$

El gas realiza un trabajo W_{12} y por tanto, tiene que absorber una cantidad igual de energía del foco caliente para mantener su temperatura constante.

$$Q_{12}=W_{12}=\int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = \int_{V_1}^{V_2} nRT_1 \cdot dV = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{Ecuación (64)}$$

- Proceso 2→3: es un proceso isócoro o a volumen constante.

$$\text{El trabajo realizado es nulo } W_{23}=0 \quad \text{Ecuación (65)}$$

El gas ideal cede calor disminuyendo su energía interna y por tanto, su temperatura.

$$\Delta U_{23}=Q_{23}=ncv(T_2-T_1)=-ncv(T_1-T_2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

- Proceso 3→4: el gas se comprime a la temperatura constante T_2 , desde el volumen inicial V_2 al volumen final V_1 . Como el gas está a baja presión, el trabajo necesario para comprimirlo es menor que el que proporciona durante el proceso de expansión.

$$\text{Variación de energía interna, } \Delta U_{34}=0 \quad \text{Ecuación (67)}$$

Se realiza un trabajo W_{34} sobre el gas y por tanto, tiene que ceder una cantidad igual de calor del foco frío para mantener su temperatura constante.

$$Q_{34}=W_{34}=\int_{V_2}^{V_1} p \cdot dV = \int_{V_2}^{V_1} \frac{nRT_2}{V} \cdot dV = nT_2 \ln \frac{V_1}{V_2} = -nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{Ecuación (68)}$$

- Proceso 4→1: es un proceso isócoro o a volumen constante.

$$\text{El trabajo realizado es nulo } W_{41}=0 \quad \text{Ecuación (69)}$$

El gas ideal absorbe calor aumentando su energía interna y por tanto, su temperatura se calcula con la ecuación (8).

$$\Delta U_{41}=Q_{41}=nc_v(T_1-T_2) \quad \text{Ecuación (70)}$$

1.3.2. Ciclo completo

Variación de energía interna:

$$\Delta U = \Delta U_{12} + \Delta U_{23} + \Delta U_{34} + \Delta U_{41} = -nc_v(T_1-T_2) + nc_v(T_1-T_2) = 0 \quad \text{Ecuación (71)}$$

Como cabía esperar de un proceso cíclico reversible de un gas ideal.

El trabajo realizado por el gas es:

$$W = W_{12} + W_{34} = nR(T_1-T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} = mMR(T_1-T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{Ecuación (72)}$$

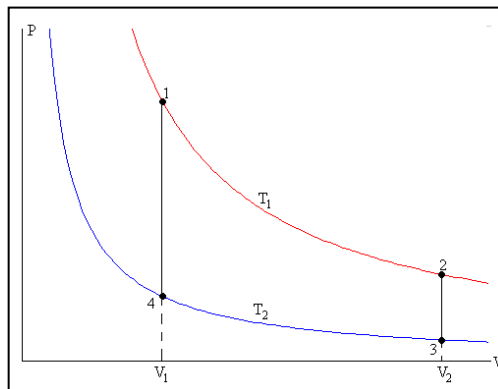
Donde m es la masa del gas, M es su peso molecular y R es la constante de los gases cuyo valor es $8.3143 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$.

Por ejemplo, hidrógeno H_2 , $M=2 \text{ g}$, helio He , $M=4 \text{ g}$, N_2 , $M=28 \text{ g}$

El trabajo se puede incrementar de varias maneras:

- Aumentando la diferencia de temperaturas T_1-T_2 entre el foco caliente y el foco frío.
- Aumentando el valor del cociente V_2/V_1 , la razón de compresión del gas.
- Eligiendo un gas cuya peso molecular M sea pequeño. Una misma masa m de produce mayor trabajo si el gas tienen menor peso molecular M .

Figura 19. **Ciclo de Stirling teórico diagrama P-v, procesos de ciclo**



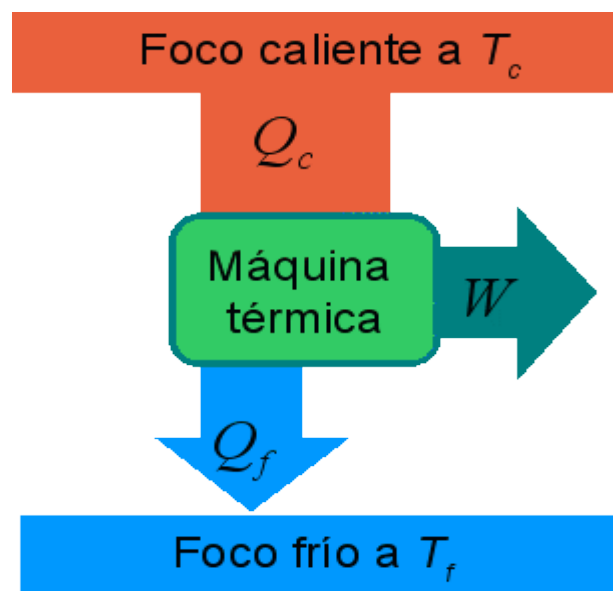
Fuente: *Procesos de ciclo*. http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/estadística/termodinámica/stirling/stirling.html. Consulta: 10 de noviembre de 2013.

1.3.3. Eficiencia

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

En la siguiente gráfica se muestra el funcionamiento de una máquina térmica:

Figura 20. Esquema de una máquina térmica



Fuente: *Máquina térmica*. http://laplace.us.es/wiki/index.php/Archivo:Ejemplo_de_maquina_termica.gif. Consulta: 10 de noviembre de 2013.

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

De esta manera:

Tabla II. **Nomenclatura temperatura y calor**

Temperatura fuente fría.	T_f .
Temperatura fuente caliente.	T_c .
Calor cedido por la fuente caliente.	Q_c
Calor cedido a la fuente fría.	Q_f
Trabajo realizado.	W

Fuente: elaboración propia.

$$\varepsilon = \textit{Eficiencia} = \frac{\text{Energía en la forma requerida}}{\text{Energía de entrada}} \quad \text{Ecuación (73)}$$

Para este caso:

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_c} = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} = \left(1 - \frac{Q_f}{Q_c}\right) \times 100 \quad \text{Ecuación (74)}$$

Se debe recordar también que una máquina térmica ideal alcanza su eficiencia más alta si sigue un ciclo de Carnot, ciclo ideal, en cuyo caso se cumple que:

$$\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{T_f}{T_c} \quad \text{Ecuación (75)}$$

Con lo cual:

$$\varepsilon_{ideal} = \frac{W}{Q_c} \times 100 = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} \times 100 = \left(1 - \frac{Q_f}{Q_c}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) \times 100 \quad \text{Ecuación (76)}$$

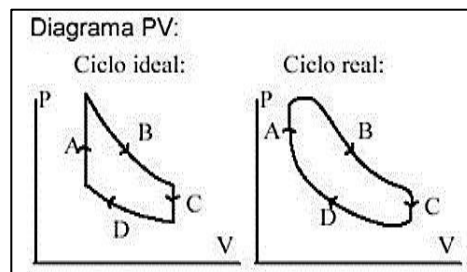
En cualquier caso se cumplirá que:

$$\varepsilon_{stirling} < \varepsilon_{ideal} = \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) \times 100 < 1 \quad \text{Ecuación (77)}$$

1.3.4. Ciclo real del motor Stirling

Debido a que no existe un mecanismo que realice el movimiento ideal del pistón y del desplazador para la realización del ciclo y a la dificultad de obtener los ciclos puramente isotérmicos debido a los mecanismos de transferencia de calor, asociados a la velocidad con que se pretende realizar el ciclo, se pierde potencia y rendimiento, el resultado final es un ciclo “redondeado” en forma de elipse.

Figura 21. **Ciclo real vs. ciclo ideal**



Fuente: *Observatorio del tiempo*. <http://elobservatoriodeltiempo.wordpress.com/2012/09/21/energias-alternativas-el-motor-stirling-es-tan-sencillo-que-hasta-lo-puedes-construir-tu-mismo/>. Consulta: 15 de noviembre de 2013.

1.4. Principales parámetros del diseño de un motor Stirling

El desempeño del motor puede ser graficado en un diagrama P-V. El volumen del motor es calculado usando la geometría interna y el ángulo en el cual se encuentre el cigüeñal.

Cuando se establecen los volúmenes internos, las temperaturas y la masa del fluido de trabajo, la presión puede ser calculada usando la ecuación del gas ideal.

$$Pv = mRT \quad \text{Ecuación (78)}$$

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

- No hay pérdida de presión en los conductos internos y la presión es igual en todo el motor para un instante de tiempo determinado.
- Los procesos de expansión y compresión son isotérmicos.
- El fluido de trabajo se comporta como un gas ideal.
- El volumen muerto de la zona caliente se mantiene a una temperatura T_E , y el volumen muerto de la zona fría se mantiene a una temperatura T_f durante el ciclo.
- La temperatura del gas en el regenerador es el promedio entre la temperatura en la zona fría y la temperatura en la zona caliente.

- El volumen de expansión V_E y el de compresión V_c cambian de acuerdo a la función coseno.

Tabla III. **Símbolos usados en la teoría de Schmidt**

Nombre	Símbolo	Unidades
Presión del motor	P	Pa
Volumen barrido por el pistón de expansión o por el desplazador	V_{se}	m^3
Volumen barrido por el pistón de compresión o pistón de potencia	V_{sc}	m^3
Volumen muerto de la zona de expansión o zona caliente	V_{de}	m^3
Volumen del regenerador	V_r	m^3
Volumen muerto de la zona de compresión o zona fría	V_{dc}	m^3
Volumen actual de la zona caliente	V_e	m^3
Volumen actual de la zona fría	V_c	m^3
Volumen actual total	V	m^3
Masa del fluido de trabajo	m	Kg
Constante del gas	R	J/Kg-K
Temperatura del gas en la zona caliente	T_h	K
Temperatura del gas en la zona fría	T_l	K
Temperatura del gas en el regenerador	T_r	K
Angulo de fase	d_x	Grados
Relación de temperaturas	t	
Relación de volúmenes barridos	v	
Relación de volúmenes muertos	V	
Velocidad del motor	n	Hz
Trabajo de expansión por ciclo	W_e	J
Trabajo de compresión por ciclo	W_c	J
Trabajo total por ciclo	W_i	J
Potencia de expansión	L_e	W
Potencia de compresión	L_c	W

Continuación de la tabla III.

Potencia por ciclo	L_i	W
Eficiencia	ε	

Fuente: *Teoría Schmidt*. https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/lib/exe/fetch.php?media=stirlingaguero_zv.pd. Consulta: 20 de noviembre de 2013.

1.4.1. Influencia de los parámetros sobre la potencia indicada

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

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

$$W_E = \oint P dV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi C \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad \text{Ecuación (79)}$$

$$= \frac{P_{min} V_{SE} \pi C \sin a}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad \text{Ecuación (80)}$$

$$= \frac{P_{max} V_{SE} \pi C \sin a}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad \text{Ecuación (81)}$$

La energía de compresión se calcula de manera similar.

$$W_c = \oint P dV_c = - \frac{P_{mean} V_{SE} \pi C \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad \text{Ecuación (82)}$$

$$= - \frac{P_{min} V_{SE} \pi C t \sin a}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad \text{Ecuación (83)}$$

$$= \frac{P_{max} V_{SE} \pi C \sin a}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad \text{Ecuación (84)}$$

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

$$W_i = W_e + W_c \quad \text{Ecuación (85)}$$

$$W_i = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi C (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi C (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad \text{Ecuación (86)}$$

$$= \frac{P_{max} V_{SE} \pi C (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - C^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad \text{Ecuación (87)}$$

Las relaciones entre P_{mean} , P_{min} y P_{max} se definen a continuación:

$$\frac{P_{min}}{P_{mean}} = \sqrt{\frac{1 - c}{1 + c}} \quad \text{Ecuación (88)}$$

$$\frac{P_{max}}{P_{mean}} = \sqrt{\frac{1 + c}{1 - c}} \quad \text{Ecuación (89)}$$

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

$$L_e = W_E n \quad \text{Ecuación (90)}$$

$$L_C = W_C n \quad \text{Ecuación (91)}$$

$$L_i = W_i n \quad \text{Ecuación (92)}$$

La eficiencia del motor se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t \quad \text{Ecuación (93)}$$

1.4.2. Ejemplo del cálculo

Realizar un diagrama PV y calcular la potencia indicada de un motor Stirling tipo alfa bajo las siguientes condiciones.

Cilindrada de un pistón de expansión: $0,628 \text{ cm}^3$, cilindrada de un pistón de compresión: $0,628 \text{ cm}^3$, el volumen muerto del espacio de expansión: $0,2 \text{ cm}^3$, volumen muerto de la cámara de compresión: $0,2 \text{ cm}^3$, volumen regenerador: $0,2 \text{ cm}^3$, ángulo de fase: 90 grados ($^\circ$), presión media: 101,3 kPa, temperatura de los gases de expansión: 400 grados centígrados ($^\circ\text{C}$), la temperatura del gas de compresión: 30 degC, velocidad del motor: 2,000 rpm.

Una relación temperatura - T, una relación de volumen de barrido - V y otra relación de volumen muerto se calculan con la ecuación (18) - (22).

$$t = \frac{30 + 273}{400 + 273} = 0,450$$

$$v = \frac{0,628 \times 10^{-6}}{0,628 \times 10^{-6}} = 1000$$

$$X_{DE} = \frac{0,2 \times 10^{-6}}{0,628 \times 10^{-6}} = 0,318$$

$$X_{DC} = \frac{0,2 \times 10^{-6}}{0,628 \times 10^{-6}} = 0,318$$

$$X_R = \frac{0,2 \times 10^{-6}}{0,628 \times 10^{-6}} = 0,318$$

Cada coeficiente se calcula con las ecuaciones (25) - (27) y (30).

$$a = \tan^{-1} \frac{1 \times \sin 90^\circ}{0,45 + \cos 90^\circ} = 65,772^\circ$$

$$S = 0,45 + 2 \times 0,45 \times 0,318 + \frac{4 \times 0,45 \times 0,318}{1 + 0,450} + 1 + 2 \times 0,318 = 2,767$$

$$B = \sqrt{0,45^2 + 2 \times 0,45 \times \cos \frac{\pi}{2} + 1} = 1,097$$

$$c = \frac{1,097}{2,767} = 0,396$$

La presión del motor se calcula con la ecuación (31).

Cuando el ángulo de cigüeñal - $x = 0^\circ$:

$$P = \frac{101,3 \times 10^3 \sqrt{1 - 0,396^2}}{1 - 0,396 \cos(0 - 65,772)} = 101,988 \times 10^3 \text{ (Pa)} = 101,988 \text{ (kPa)}$$

Del mismo modo, cuando $x = 10$ grados:

$$P = 109,89 \text{ kPa)}$$

Cuando $x = 20$ grados:

$$P = 118,01 \text{ (kPa)}$$

Cada momento de volumen se calcula con la ecuación (14), (15) y (16).

Cuando el ángulo de cigüeñal, $x = 0$ grados:

$$V_E = \frac{0,628 \times 10^{-6}}{2}(1 - \cos 0^\circ) + 0,2 = 0,200 \times 10^{-6} (\text{m}^3) = 0,200 (\text{cm}^3)$$

$$V_C = \frac{0,628 \times 10^{-6}}{2}\{1 - \cos(0^\circ - 90^\circ)\} + 0,2 = 0,514 \times 10^{-6} (\text{m}^3) = 0,514 (\text{cm}^3)$$

$$V = 0,2 + 0,2 + 0,514 = 0,91 (\text{cm}^3)$$

Cuando $x = 10$ grados:

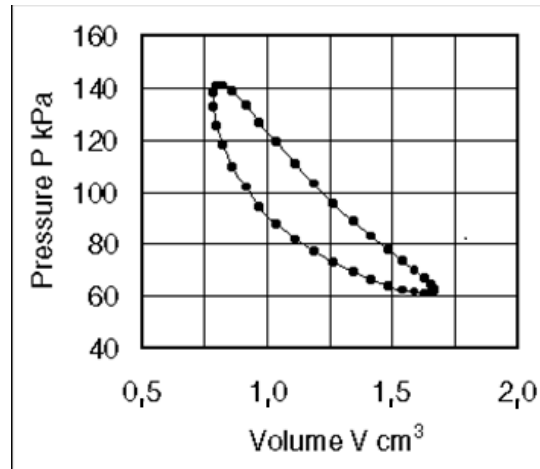
$$V = 0,86 (\text{cm}^3)$$

Cuando $x = 20$ grados:

$$V = 0,82 (\text{cm}^3)$$

Se repite el cálculo para completar el ciclo de presiones y volúmenes es en papel cuadrículado. Un ejemplo del diagrama P-V se muestra en la figura 22.

Figura 22. Diagrama Presión-Volumen (P-v)



Fuente: elaboración propia.

La energía indicada se calcula con las ecuaciones (63), (66) y (70).

$$W_E = \frac{101,3 \times 10^3 \times 0,628 \times 10^{-4} \times 3,14 \times 0,396 \times \sin 65,772^\circ}{1 + \sqrt{1 - 0,396^2}} = 3,760 \times 10^{-2} (\text{J})$$

$$W_c = -\frac{101,3 \times 10^3 \times 0,628 \times 10^{-4} \times 3,14 \times 0,396 \times 0,45 \times \sin 65,772^\circ}{1 + \sqrt{1 - 0,396^2}} = -1,692 \times 10^{-2} (\text{J})$$

$$W_i = 3,760 \times 10^{-2} - 1,692 \times 10^{-2} = 2,068 \times 10^{-2} (\text{J})$$

La potencia indicada de este motor se calcula con la ecuación (76).

$$L_i = \frac{5,452 \times 10^{-2} \times 200}{60} = 0,689(\text{W})$$

La potencia indicada de este motor es de 0,689 W.

1.4.3. Eficiencia mecánica de un motor Stirling

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

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

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

$$L_S = B_n \times P \times V \times N \quad \text{Ecuación (94)}$$

Se puede calcular la potencia útil con la fórmula anterior teniendo en cuenta que L_S es la potencia al eje, B_n es el número de Beale, P es la presión media (P_{mean}), V es el volumen en centímetro cúbicos y N es la velocidad en Hertz.

El número de Beale va desde 0,011 para motores pequeños hasta 0,015 para motores de alto desempeño y que trabajan a altas temperaturas.

1.4.4. Carrera y diámetro de los pistones

Cuando se escoge una relación carrera/diámetro hay que tener en cuenta las revoluciones por minuto (rpm) deseadas, el área superficial, materiales de los anillos y las presiones a las cuales van a trabajar.

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

$$\text{Dist} = 2 \times \text{Carrera} \times \text{rpm} \qquad \text{Ecuación (95)}$$

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

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

En lo que respecta al área del cilindro, con carreras pequeñas el diámetro tendrá que ser grande y el área interior será mayor.

Para el caso de los motores de combustión externa, es necesario tener áreas grandes de transferencia para poder absorber y retirar calor eficientemente.

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

1.5. Energía termosolar

La radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce y también a través de la absorción de la radiación, por ejemplo en dispositivos ópticos o de otro tipo. Es una de las llamadas energías renovables, particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde.

La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

Figura 23. **Central térmica solar de concentración**



Fuente: *Afinidad eléctrica*. <http://www.afinidadelctrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=189>.

Consulta: 2 de enero de 2014.

En general, la tecnología termosolar o solar termoeléctrica está basada en el concepto de la concentración de la radiación solar para producir vapor o aire caliente, que puede posteriormente ser usado para accionar plantas eléctricas convencionales. La captación de energía solar, que tiene una densidad relativamente baja, es uno de los mayores retos en el desarrollo de plantas termosolares.

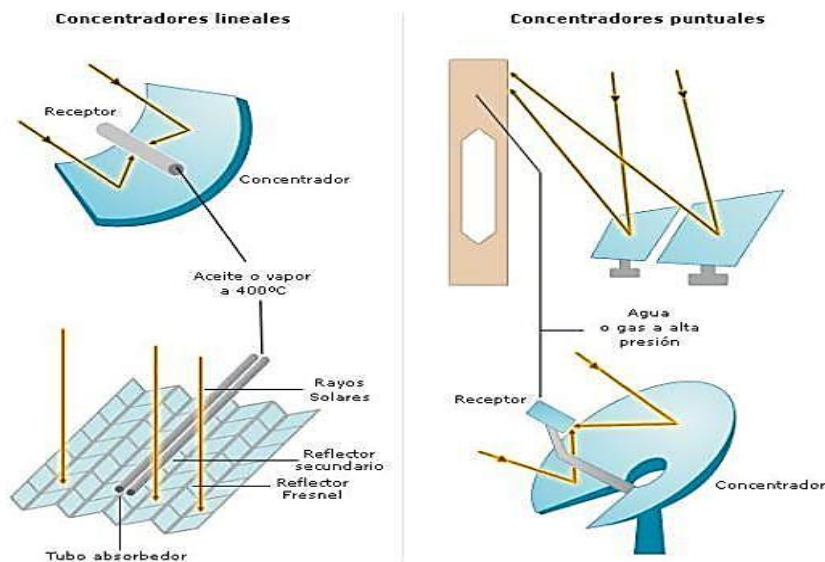
Constructivamente, es necesario concentrar la radiación solar para que se puedan alcanzar temperaturas elevadas, de 300 hasta 1 000 ° C, y obtener así un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico, que no se podría obtener con temperaturas más bajas.

La captación y concentración de los rayos solares se hacen por medio de espejos con orientación automática que apuntan a una torre central donde se

calienta el fluido, o con mecanismos más pequeños de geometría parabólica. El conjunto de la superficie reflectante y su dispositivo de orientación se denomina heliostato.

La concentración puntual y lineal puede aprovechar solamente la radiación directa, y no la difusa debido a que esta última no puede ser concentrada. La concentración lineal es más fácil de instalar al tener menos grados de libertad, pero tiene un factor de concentración menor y por lo tanto puede alcanzar menores temperaturas que la tecnología de concentración puntual.

Figura 24. **Diferentes formas de concentración solar**



Fuente: *Termosolar*. http://www.construmatica.com/construpedia/Energ%C3%ADa_Termosolar.

Consulta: 2 de enero de 2014.

1.5.1. Tecnologías

Dentro de la energía termosolar existen diferentes tipos de tecnologías, siendo las más conocidas, la tecnología cilindro parabólica, la tecnología disco Stirling, la tecnología de torre y la torre solar de aire ascendente.

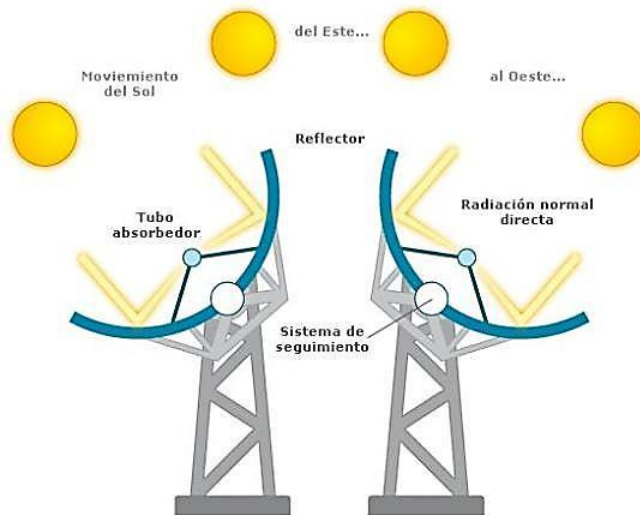
1.5.2. Tecnología cilindro parabólica

La tecnología cilindro parabólica es una tecnología limpia, madura y con un extenso historial que demuestra estar preparada para la instalación a gran escala.

La tecnología lleva siendo instalada desde los años 80 a nivel comercial con un excepcional comportamiento. Desde entonces, la tecnología ha experimentado importantes mejoras a nivel de costes y rendimientos. Actualmente hay 300 MWs en operación, 400 en construcción y alrededor de 6 GWs en promoción a nivel mundial.

La tecnología cilindro parabólica basa su funcionamiento en seguimiento solar y en la concentración de los rayos solares en unos tubos receptores de alta eficiencia térmica localizados en la línea focal de los cilindros.

Figura 25. **Sistema cilindro parabólico con seguimiento solar**



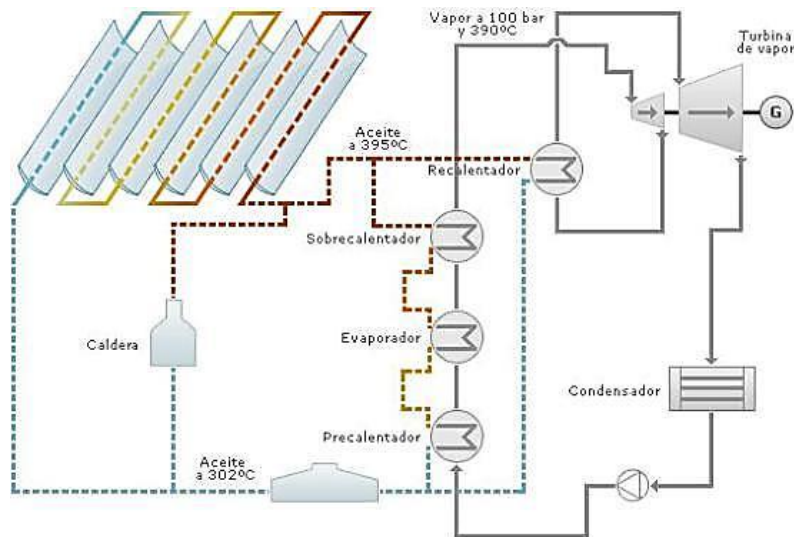
Fuente: *Termosolar*. <http://www.solarweb.net/termosolar.php>. Consulta: 2 de enero de 2014.

En estos tubos, un fluido transmisor de calor, tal como aceite sintético es calentado a aproximadamente 400 °C por los rayos solares concentrados. Este aceite es bombeado a través de una serie de intercambiadores de calor para producir vapor sobrecalentado. El calor presente en este vapor, se convierte en energía eléctrica en una turbina de vapor convencional.

En tecnología de cilindro parabólica, se puede incorporar el almacenamiento de energía. A partir de este almacenamiento el sistema puede proporcionar energía aun en condiciones de nubosidad o de noche.

Actualmente la solución más utilizada es el uso de un tanque de sales fundidas que acumula la energía para ser distribuida en otro momento. Consecuentemente la planta necesita ser sobredimensionada. Otra aplicación utilizada en tecnología de cilindro parabólica es la hibridación.

Figura 26. **Esquema de planta termosolar de cilindros parabólicos**



Fuente: *Energía termosolar*. <http://www.slideshare.net/OscarAraosGuzman/energia-termsolar-por-oscar-araos>. Consulta: 5 de enero de 2014.

Los componentes principales del campo solar de la tecnología cilindro parabólico son:

- El reflector cilindro parabólico: la misión del receptor cilindro parabólico es reflejar y concentrar sobre el tubo absorbente la radiación solar directa que incide sobre la superficie. La superficie especular se consigue a través de películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la suficiente rigidez. En la actualidad los medios soportes más utilizados son la chapa metálica, el vidrio y el plástico.
- El tubo absorbente: el tubo absorbente consta de dos tubos concéntricos separados por una capa de vacío. El interior, por el que circula el fluido que se calienta es metálico y el exterior de cristal.

- El fluido de trabajo: que circula por el tubo interior es diferente según la tecnología. Para bajas temperaturas ($< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) se suele utilizar agua desmineralizada con Etileno-Glicol mientras que para mayores temperaturas ($200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) se utiliza aceite sintético. Las últimas tecnologías permiten la generación directa de vapor sometiendo a alta presión a los tubos y la utilización de sales como fluido caloportante.
- El sistema de seguimiento del sol: el sistema seguidor más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje.
- La estructura metálica: la misión de la estructura del colector es la de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen.

Figura 27. **Vista de los concentradores parabólicos**



Fuente: *Afinidad eléctrica*. <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=189>.

Consulta: 15 de enero de 2014.

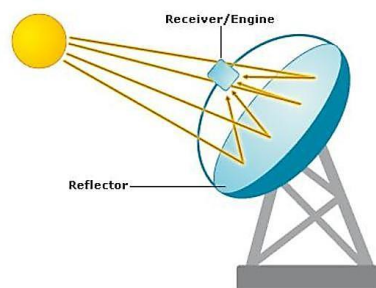
Los principales beneficios de esta tecnología frente a otras es que se la considera como una tecnología madura y preparada para ser instalada a nivel comercial. Las primeras plantas CCP llevan instaladas en EE. UU. desde principios de los 80.

1.5.3. Tecnología disco Stirling

Un sistema de concentrador disco Stirling (*dish* Stirling) está compuesto por un concentrador solar de alta reflectividad, por un receptor solar de cavidad, y por un motor Stirling o una micro turbina que se acopla a un alternador.

El funcionamiento consiste en el calentamiento de un fluido localizado en el receptor hasta una temperatura entorno a los 750 °C. Esta energía es utilizada para la generación de energía por el motor o la microturbina. Para óptimo funcionamiento, el sistema debe estar provisto de los mecanismos necesarios para poder realizar un seguimiento de la posición del Sol en dos ejes.

Figura 28. **Esquema del concentrador de disco parabólico cóncavo**



Fuente: *Termosol*. http://www.construmatica.com/construpedia/Energ%C3%ADa_Termosolar.

Consulta: 23 de febrero de 2014.

Los sistemas disco Stirling son adecuados para la generación descentralizada de energía eléctrica a partir de la energía solar y generalmente tienen una capacidad de 10 a 50 kW cada uno.

Los principales componentes de un sistema disco Stirling son el concentrador parabólico, el motor Stirling y el sistema de seguimiento solar.

Al igual que todos los sistemas de producción de energía eléctrica a partir de las energías renovables, el coste de la inversión inicial en el sistema disco Stirling es fuerte. Sin embargo, los costes de operación son relativamente bajos porque no existe consumo de combustible.

Figura 29. **Sistema disco Stirling compuesto por segmentos**



Fuente: *Disco Stirling*. <http://www.slideshare.net/OscarAraosGuzman/energia-termosolar-por-oscar-araos>. Consulta: 24 de febrero de 2014.

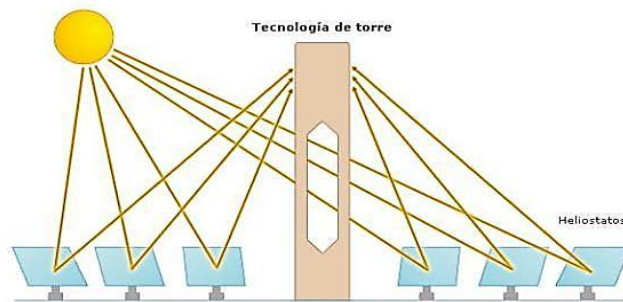
1.5.4. Tecnología de torre

Una central de torre o sistema de receptor central, está compuesta por un sistema concentrador o campo de heliostatos, que capta y concentra la componente directa de la radiación solar sobre un receptor (donde se produce la conversión de la energía radiante en energía térmica) que suele instalarse en la parte superior de una torre. El fluido de trabajo puede ser: aire, vapor de agua, sodio fundido o sales fundidas, según la tecnología escogida. entre otros, En las de vapor de agua, este mueve directamente una turbina. En los otros, el fluido transporta el calor a un generador de vapor de agua, con el que se hace funcionar una turbina que mueve al generador eléctrico.

En los sistemas de torre, un campo de helióstatos o espejos móviles que se orientan según la posición del Sol, reflejan la radiación solar para concentrarla hasta 600 veces sobre un receptor que se sitúa en la parte superior de una torre. Este calor se transmite a un fluido con el objetivo de generar vapor que se expande en una turbina acoplada a un generador para la producción de electricidad.

El funcionamiento de la tecnología de torre se basa en tres elementos característicos: los helióstatos, el receptor y la torre.

Figura 30. **Esquema torre de concentración**



Fuente: *Solar*. <http://www.solarweb.net/termosolar.php>. Consulta: 3 de marzo de 2014.

Los helióstatos tienen la función de captar la radiación solar y dirigirla hacia al receptor. Están compuestos por una superficie reflectante, una estructura que le sirve de soporte, y mecanismos que permiten orientarlo para ir siguiendo el movimiento del Sol (lo que implica tanto los sistemas necesarios para el movimiento del helióstato como los sistemas de control). Las superficies reflectantes más empleadas actualmente son de espejos de vidrio.

El receptor, que transfiere el calor recibido a un fluido de trabajo (que puede ser agua, sales fundidas, entre otros). Este fluido es el encargado de transmitir el calor a la otra parte de la central termosolar, generalmente a un depósito de agua, obteniéndose vapor a alta temperatura para producción de electricidad mediante el movimiento de una turbina. Los últimos avances e investigaciones se centran en la obtención de torres de alta temperatura con fluidos caloportantes tales como aire, sales.

La torre sirve de soporte al receptor, que debe situarse a cierta altura sobre el nivel de los helióstatos con el fin de evitar, o al menos reducir, las sombras y los bloqueos.

Las altas temperaturas (superiores a 1 000 °C) que se pueden alcanzar con esta tecnología permiten aspirar a elevados rendimientos en la generación de electricidad, incluso por encima del 25 % en la transformación de radiación solar a electricidad.

En tecnología de torre, se puede incorporar el almacenamiento de energía. A partir de este almacenamiento el sistema puede proporcionar energía aun en condiciones de nubosidad o de noche. Actualmente la solución más utilizada es el uso de un tanque de almacenamiento de agua/vapor o sales fundidas que acumula la energía para ser distribuida en otro momento.

Consecuentemente la planta necesita ser sobredimensionada. Otra aplicación utilizada en tecnología de torre es la hibridación.

Figura 31. **Vista aérea de una central termosolar de torre de concentración**



Fuente: *Termosol*. http://www.construmatica.com/construpedia/Energ%C3%ADa_Termosolar.

Consulta: 12 de marzo de 2014.

1.5.5. La radiación solar

Es el flujo de energía que se recibe del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). Aproximadamente la mitad de las que se recibe, comprendidas entre $0,4 \mu\text{m}$ y $0,7 \mu\text{m}$, pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que se conoce como luz visible.

De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta. La porción de esta radiación que no es absorbida por la atmósfera, es la que produce quemaduras en la piel a la gente que se expone muchas horas al Sol sin protección. La radiación solar se mide normalmente con un instrumento denominado pirómetro.

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiación:

- Radiación directa: es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.
- Radiación difusa: parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por estas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, entre otras. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies

horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque solo ven la mitad.

- Radiación reflejada: la radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.
- Radiación global: es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones. En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa.

Los distintos tipos de colectores solares aprovechan de forma distinta la radiación solar. Los colectores solares planos, por ejemplo, captan la radiación total (directa + difusa). Sin embargo, los colectores de concentración solo captan la radiación directa. Por esta razón, los colectores de concentración suelen situarse en zonas de muy poca nubosidad y con pocas brumas, en el interior, alejadas de las costas.

La aplicación de la Ley de Planck al Sol con una temperatura superficial de unos 6 000 K, lleva a que el 99 % de la radiación emitida está entre las longitudes de onda 0,15 μm (micrómetros o micras) y 4 micras. Como 1 angstrom 1 Å... = 10^{-10} m = 10^{-6} micras resulta que el Sol emite en un rango de 1 500 Å... hasta 40 000 Å.... La luz visible se extiende desde 4 000 Å... a 7 400

Å... La radiación ultravioleta u ondas cortas iría desde los 1 500 Å... a los 4 000 Å... y la radiación infrarroja u ondas largas desde las 0,74 micras a 4 micras.

La atmósfera de la Tierra constituye un importante filtro que hace inobservable radiaciones de longitud de onda inferior a las 0,29 micras, por la fuerte absorción del ozono y oxígeno. Ello libra de la radiación ultravioleta más peligrosa para la salud. La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a los 24 micras, ello no afecta a la radiación solar pero sí a la energía emitida por la Tierra que llega hasta las 40 micras y que es absorbida. A este efecto se conoce como efecto invernadero.

El máximo (Ley de Wien) ocurre a 0,475 micras es decir a 4 750 Å...Considerando la ley de Wien ello corresponde a una temperatura de:

$$T = \frac{2\,897,6}{0,475} \frac{\mu m \cdot K}{\mu m} = 6\,099\text{ K} \quad \text{Ecuación (96)}$$

Tabla IV. **Promedios mensuales y anuales de radiación solar (Cal/cm²/min)**

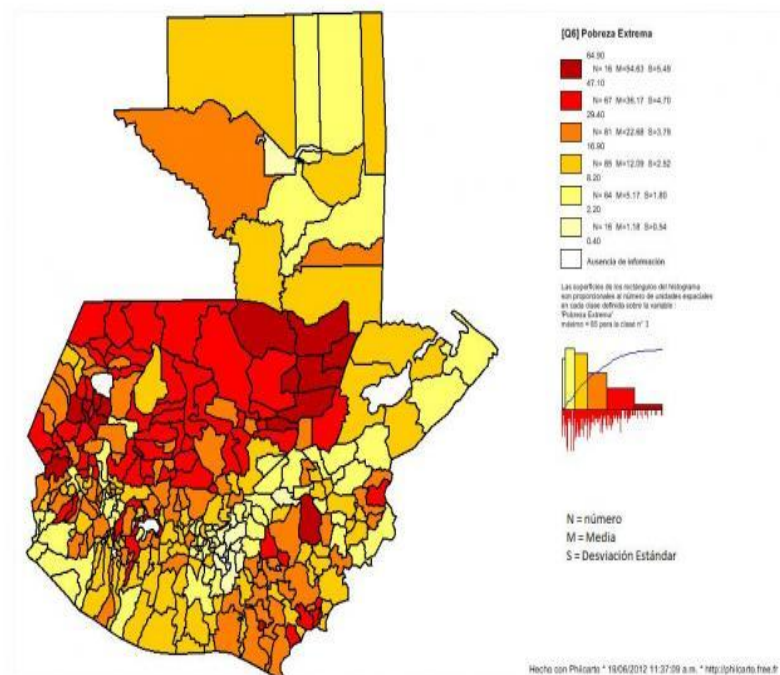
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Ab.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	ANUAL
1995	0,21	0,26	0,28	0,28	0,28	0,45	0,42	0,34	0,28	0,37	0,38	0,34	0,32
1996	0,37	0,46	0,49	0,46	0,46	0,43	0,43	0,48	0,43	0,40	0,39	0,37	0,43
1997	0,40	0,50	0,47	0,42	0,43	0,32	0,39	0,39	0,37	0,31	0,31	0,29	0,38
1998	0,31	0,35	0,37	0,37	0,32	0,35	0,32	0,33	0,32	0,30	0,29	0,32	0,33
1999	0,30	0,37	0,35	0,35	0,33	0,28	0,34	0,34	0,25	0,32	0,29	0,35	0,32
2000	0,37	0,36	0,37	0,36	0,29	0,37	0,30	0,32	0,30	0,34	0,31	0,32	0,33
2001	0,33	0,30	0,32	0,26	0,28	0,35	0,38	0,53	0,36	0,39	0,34	0,3	0,35
2002	0,35	0,37	0,4	0,43	0,35	0,37	0,33	0,32	0,28	0,31	0,34	0,33	0,35
2003	0,41	0,38	0,31	0,36	0,3	0,31	0,37	0,31	0,35	0,35	0,44	0,45	0,36
2004	0,47	0,53	0,58	0,59	0,47	0,48	0,51	0,53	0,51	0,5	0,47	0,5	0,51
2005	0,52	0,57	0,55	0,55	0,47	0,49	0,47	0,45	0,40	0,42	0,50	0,49	0,49
2006	0,53	0,52	0,58	0,56	0,47	0,38	N/D	0,47	0,50	0,47	0,47	0,51	0,50
2007	0,00	0,55	0,56	0,58	0,50	0,50	0,50	0,40	0,40	0,40	0,50	0,40	0,44
2008	0,50	0,60	0,50	0,60	0,50	0,50	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	0,48
2009	0,50	0,50	0,46	0,42	0,50	0,35	0,40	0,37	0,39	0,38	0,35	0,34	0,41

Continuación de la tabla IV.

2010	0,41	0,39	0,41	0,36	0,36	0,36	0,39	0,28	0,40	0,48	0,40	0,46	0,39
2011	0,37	0,50	0,61	0,56	0,50	0,64	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0,53
2012	0,31	0,40	0,41	0,38	0,29	0,27	0,30	0,31	0,37	0,35	0,40	0,33	0,34
2013	0,33	0,36	0,50	0,40	0,33	0,28	0,30	0,31	0,26	0,28	0,30	0,37	0,34
2014													

Fuente: *Estaciones Guatemala*. [http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ ESTACIONES / GUATEMALA/ Insivumeh/Radiacion%20Solar%20Insivumeh.htm](http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/GUATEMALA/Insivumeh/Radiacion%20Solar%20Insivumeh.htm). Consulta: 25 de marzo de 2014.

Figura 32. Mapa solar de Guatemala



Fuente: *Plaza Pública*. <http://www.plazapublica.com.gt/content/la-pobreza-esta-sobre-todo-en-otra-parte>. Consulta: 25 de marzo de 2014.

2. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING

Este capítulo se basa en su totalidad en la obra de Gustav Johann Leopold Schmidt (1826-1883) quien fuese responsable de publicar en 1871, la teoría que acompaña al motor Stirling, ya que para 1817 Robert Stirling aportó el mecanismo y diseño. Dicha obra fue compilada y traducida por Koichi Hirata en 1989 y en la cual se propone un ejercicio que se ejemplifica en las siguientes páginas.

La nomenclatura utilizada para el desarrollo de este capítulo es la misma de la página 33 en la tabla III del capítulo primero del presente trabajo.

El objetivo del cálculo termodinámico es determinar la presión máxima, mínima y media, trabajo potencia y eficiencia en el motor a partir de las hipótesis de temperaturas.

En los próximos puntos se plantearan un cálculo simplificado del motor Stirling. Se aplicarán conceptos e hipótesis básicas:

- El gas en el interior del motor se comporta como gas perfecto.
- De existir regenerador, este se considera perfecto.
- La irreversibilidad termodinámica asociada a la transferencia de calor se tornará en cuenta por coeficiente empírico.
- Definiremos las siguientes variables fundamentales:

T_{max} : Temperatura máxima del fluido de trabajo.

T_{min} : Temperatura mínima del fluido de trabajo.

2.1. Secuencia de cálculo

El volumen máximo ocurre con el máximo desplazamiento del pistón de trabajo y el mínimo en la situación opuesta. Durante el ciclo de trabajo, se pasa por el máxima y mínimo una vez y por los volúmenes medios dos veces.

Hay algunos aspectos que hay que tomar en cuenta:

- El volumen mínimo tiende a ocurrir hacia la temperatura mínima.
- Mientras más pequeña sea la diferencia de volumen, más grande tiende a ser la diferencia de presiones.
- La máxima diferencia de presiones se produce para un ΔV de 0.

2.1.1. Parámetros de análisis

Teniendo en cuenta que el motor tendrá que entregar una potencia de 70 vatios (W), se debieron determinar las condiciones de operación tales como las temperaturas en la zona fría y caliente, presión interna y revoluciones por minuto. La geometría es el resultado del análisis termodinámico.

Este análisis se realiza teniendo como presión de carga la presión atmosférica para la ciudad de Guatemala que es 640 milímetros de mercurio (mm-HG), que son 85 326,07 pascales (Pa).

La velocidad del motor depende en gran parte de la capacidad que se tenga para calentarlo, pero también está limitada por la velocidad de transferencia de calor que se da entre la fuente de calor y el interior de la zona caliente y de la zona fría al exterior. Para alcanzar velocidades rotacionales cercanas a 3 000 rpm en los motores Stirling se suministra calor a temperaturas cercanas a 800 °C.

Por lo que se proponen las condiciones de operación como las siguientes:

- La potencia del eje debería de ser 70 W
- La temperatura en la zona caliente será de 500 °C.
- La temperatura en la zona fría debería ser de 70 °C.
- Se estima que el motor podría llegar a 2 000 rpm.
- La temperatura ambiente promedio en la ciudad es de 25 °C.
- La presión atmosférica promedio en la ciudad es de 85 326,07 pascales (Pa).
- El motor será tipo alfa.

Para el cálculo de volumen desplazado es necesario tener en cuenta los parámetros de: presión media, potencia, revoluciones del motor, volúmenes muertos y las pérdidas.

2.2. Análisis termodinámico de Schmidt

Los métodos usados para calcular los principales parámetros de funcionamiento de las primeras máquinas Stirling fueron muy precarios, fueron operaciones a volumen constante fueron supuestas. Asimismo, se tomó cualquier ley a conveniencia (isotérmico, politrópico y adiabático), para las fases

de compresión y expansión, incluso de relaciones lineales de presión-volumen, fueron utilizadas a menudo.

En 1871, Gustav Schmidt publicó un análisis en el cual cálculo el trabajo de salida por medio de integración, el análisis termodinámico descrito por Schmidt se basa en un ciclo regenerativo suponiendo fases isotérmicas de un gas ideal, el cual implica una transferencia de calor infinito (operación isotérmica) a través de las paredes del cilindro a velocidad cero.

El método propuesto por Schmidt fue el más utilizado por los ingenieros de la época, convirtiéndose así en un método clásico en el cálculo de los parámetros de funcionamiento de las máquinas Stirling.

En el presente análisis se tratará la transferencia de calor así como la variación del área superficial de los cilindros de compresión y expansión, de igual manera se propondrán las expresiones para las variaciones cíclicas de la presión y la temperatura del fluido de trabajo. Estas expresiones se basan en un par de ecuaciones diferenciales simultáneas de primer orden, las cuales se pueden resolver utilizando métodos de integración numérica.

Se realizará un balance térmico completo, por lo que las eficiencias y coeficientes de funcionamiento actuales pueden ser calculadas mientras se supongan iguales a los valores ideales del ciclo Carnot como se ha estado haciendo generalmente en la práctica hasta ahora.

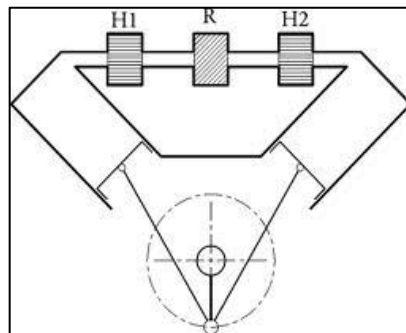
2.3. Hipótesis de la teoría de Schmidt

En la figura 36 se muestra una representación esquemática de un motor simple generalizado de ciclo Stirling, que puede funcionar como máquina

motriz, refrigerador o bomba de calor, dependiendo solamente de los valores relativos de la temperatura en los dos cilindros.

Aunque se conocen diversas construcciones que son un poco diferentes al arreglo mostrado en la figura 36, todas éstas configuraciones se podrían reducir, a elementos esenciales para cada ciclo de trabajo los cuales son mostrado en la figura 21, y el análisis basado en este arreglo es por lo tanto aplicable para otros arreglos o configuraciones.

Figura 33. **Diagrama generalizado del mecanismo de una máquina Stirling**



Fuente: *Mecanismos de máquinas Stirling*. http://paisa_maca0.tripod.com/paginas/2/inf.varia7.htm. Consulta: 26 de marzo de 2014.

Las siguientes suposiciones básicas se utilizan en el desarrollo del presente análisis:

- El fluido de trabajo se comporta como un gas ideal.
- La masa total del fluido de trabajo es constante durante todo el proceso.

- La presión instantánea es igual a través del sistema, la caída de presión debido a la fricción aerodinámica puede ser despreciada.
- Los volúmenes en las zonas de compresión y de expansión varían de forma senoidal, y las separaciones en la parte superior del punto muerto del centro son incluidas en el volumen constante de los cambiadores de calor adyacentes.
- El regenerador es perfectamente eficaz. Esta área superficial y el coeficiente de transferencia térmica también se consideran bastante grandes, para cambiar la temperatura del fluido de trabajo, que pasa a través al valor terminal. La conducción de calor longitudinal y transversal es cero.
- La temperatura en los límites de las paredes de cada intercambiador de calor es constante e igual a uno de los límites de la temperatura. Los intercambiadores de calor son bastante eficientes.
- La temperatura de las superficies internas de las paredes del cilindro y de las cabezas del cilindro y de pistón asociadas a cada espacio de trabajo es constante, e igual a uno de los límites de la temperatura. El coeficiente de transferencia térmica de estas superficies es también constante.
- Las variaciones locales de la temperatura dentro del espacio de compresión y de expansión son despreciadas, aquí se supone una mezcla perfecta del contenido del cilindro en cada instante.

- La temperatura de las porciones respectivas al fluido de trabajo en cada uno de los espacios auxiliares, tales como intercambiadores de calor, regeneradores, conductos y separaciones, se supone debe permanecer en un valor medio particular en cada caso.
- La velocidad rotatoria del motor es constante.

Se consideran estables las condiciones para la operación total del motor, de modo que las presiones, temperaturas, entre otros. Están sujetas solo a las variaciones cíclicas.

2.4. Análisis isotérmico ideal

Conocer la presión del fluido de trabajo, es muy importante, ya que permite estudiar cómo diferentes mecanismos de transmisión afectan la potencia de salida, por lo tanto, el objetivo fundamental del presente capítulo es proponer una expresión que permita calcular la presión del fluido en función de las variaciones de volumen en los espacios de compresión y expansión.

El análisis se llevará a cabo desde el punto de vista isotérmico, se aplicará la ley de conservación de la energía al fluido para estudiar la transferencia de calor en los diversos componentes del motor, y analizar de esta manera el comportamiento teórico de la máquina.

La expansión isoterma de un gas ideal puede llevarse a cabo colocando el gas en contacto térmico con otro sistema de capacidad calorífica muy grande y a la misma temperatura que el gas; este otro sistema se conoce como foco caliente. De esta manera el calor se transfiere muy lentamente, permitiendo que el gas se expanda realizando trabajo.

Como la energía interna de un gas ideal solo depende de la temperatura y esta permanece constante en la expansión isoterma, el calor tomado del foco es igual al trabajo realizado por el gas:

$$Q = W. \quad \text{Ecuación (97)}$$

Una curva isoterma es una línea que sobre un diagrama representa los valores sucesivos de las diversas variables de un sistema en un proceso isotermo. Las isotermas de un gas ideal en un diagrama presión *versus* volumen (p-V), llamado diagrama de Clapeyron, son hipérbolas equiláteras, cuya ecuación de la presión por el volumen es ($p \cdot V =$ una constante) una constante.

2.4.1. Proceso isotérmico

En este proceso la temperatura permanece constante. Como la energía interna de una gas ideal solo es función de la temperatura, en un proceso isotérmico de un gas ideal la variación de la energía interna es cero ($\Delta U = 0$) La curva hiperbólica se conoce como isotérmica.

2.4.2. Trabajo isotérmico

El problema pide que se determine el trabajo de un proceso cuasiestático isotermo en el que se dobla la presión. En general el trabajo será:

$$w = \int_{p_0}^{2p_0} p_e dv \quad \text{Ecuación (98)}$$

Donde p_e es la presión exterior al sistema. Como el proceso es cuasiestático la presión exterior y la del gas coinciden en todo momento y se tiene que:

$$w = \int_{p_0}^{2p_0} p dv \quad \text{Ecuación (99)}$$

El problema de esta integral es que se integra en el volumen pero se conocen los valores límites (inicial y final) de la presión. Es absurdo calcular los volúmenes inicial y final puesto que la ecuación de estado es cuadrática en la presión.

Es más conveniente cambiar la variable de integración del volumen a la presión. Matemáticamente es hacer un cambio de variable v por $v(p, T)$. Al hacer este cambio, como la temperatura es constante se tiene que:

$$dv = \left(\frac{dv}{dp} \right)_T dp \quad \text{Ecuación (100)}$$

Por lo tanto:

$$w = \int_{p_0}^{2p_0} p \left(\frac{dv}{dp} \right)_T dp = - \int_{p_0}^{2p_0} v k_T p dp \quad \text{Ecuación (101)}$$

Usando la ecuación (81) se tiene que la integral es:

$$w = - \int_{p_0}^{2p_0} \left(\frac{RT}{p^2} - b - 2cp \right) p dp \quad \text{Ecuación (102)}$$

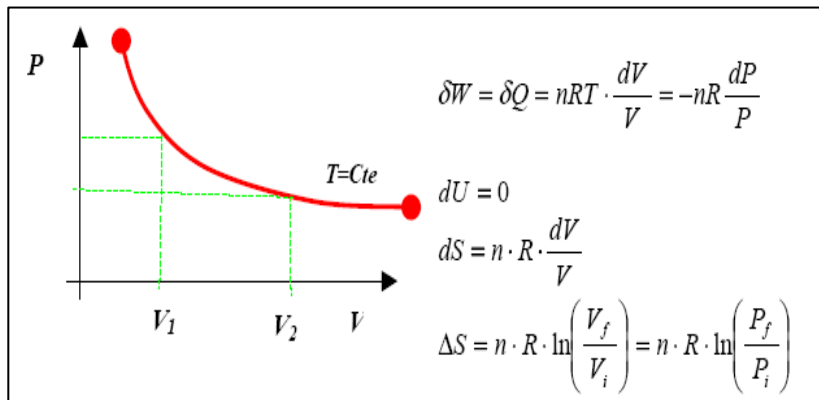
Es decir:

$$w = - \int_{p_0}^{2p_0} \left(\frac{RT}{p} - bp - 2cp^2 \right) dp \quad \text{Ecuación (103)}$$

Por tanto:

$$w = -RT \log 2 + \frac{3}{2}bp_0^2 + \frac{14}{3}cp_0^3 \quad \text{Ecuación (104)}$$

Figura 34. **Proceso isotérmico**



Fuente: *Procesos de motor Stirling*. <http://jmirez.wordpress.com/2011/07/18/j283-una-explicacion-del-motor-stirling/>. Consulta: 28 de marzo de 2014.

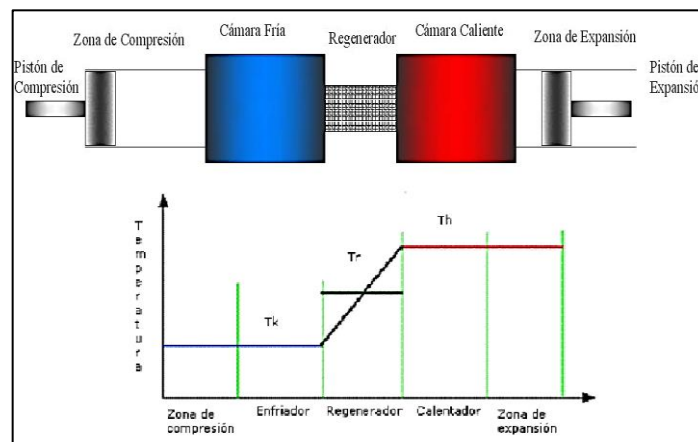
2.5. Análisis térmico de un motor Stirling

El motor Stirling fue un invento muy adelantado a su época y a todo el conocimiento científico de ese tiempo, famosos científicos como Michael Faraday no pudieron explicar el funcionamiento de la máquina, tuvieron que pasar 30 años para que se dieran las primeras explicaciones teóricas, y más de 40 para realizar el primer análisis del ciclo sobre el cual se basa el funcionamiento del motor, la primera tentativa de análisis fue publicada en 1871, por Gustav Schmidt.

El análisis descrito por Schmidt fue el método más simple y útil durante el desarrollo de la máquina Stirling, se basa en la expansión y compresión isotérmica de un gas ideal, este método se ha convertido en el análisis clásico y punto de partida para el estudio de los motores de ciclo Stirling. Desafortunadamente en el análisis de Schmidt se obtiene una solución cerrada lo cual imposibilita enormemente predecir el ciclo real, no obstante se utilizará como punto de partida para dirigirse en última instancia a un acercamiento más realista.

Existe una gran variedad de diseños del motor Stirling, los cuales se han agrupado en tres configuraciones, para realizar el análisis se tomará como modelo la configuración tipo alfa, la cual se muestra en la figura 38.

Figura 35. **Representación esquemática del motor Stirling tipo alfa**



Fuente: *Proceso de motor Stirling*. <http://stirlingsolar.blogspot.com/p/motor-stirling.html>.

Consulta: 29 de marzo de 2014.

Ahora bien, considerando la figura 38 como un modelo en serie de cinco componentes, cada componente estará representado de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

- Zona de Compresión c
- Enfriador k
- Regenerador r
- Calentador h
- Zona de Expansión e

Cada componente es considerado como una entidad o celda homogénea. El gas interior está representado por una masa instantánea “M”, temperatura absoluta “T”, volumen “V” y presión “P”.

Se considerará que la masa total del gas es constante.

$$M = m_c + m_k + m_r + m_h + m_e \quad \text{Ecuación (105)}$$

Despejando m de la ecuación de estado y aplicando la ecuación de los gases ideales $pV = mRT$, para cada célula se obtiene:

$$m = \frac{pV}{RT} \quad \text{Ecuación (106)}$$

Sustituyendo por la masa en cada célula y tomando en cuenta las suposiciones 2 y 3 se obtiene:

$$M = \frac{pV_c}{RT_c} + \frac{pV_k}{RT_k} + \frac{pV_r}{RT_r} + \frac{pV_h}{RT_h} + \frac{pV_e}{RT_e} \quad \text{Ecuación (107)}$$

Factorizando se obtiene:

$$M = \frac{p}{R} \left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e} \right) \quad \text{Ecuación (108)}$$

Despejando p de la ecuación, se puede calcular la presión en función de las variaciones de volúmenes se obtiene:

$$P = \frac{MR}{\left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e} \right)} \quad \text{Ecuación (109)}$$

El trabajo realizado por el sistema, en un ciclo, está dado por la integral cerrada de $\oint P dV$. Donde θ es el ángulo de giro de la manivela del motor.

$$Q_c = W_c = \oint P dV_c = \int_0^{2\pi} \left(P \frac{dV_c}{d\theta} \right) d\theta \quad \text{Ecuación (110)}$$

$$Q_e = W_e = \oint P dV_e = \int_0^{2\pi} \left(P \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta \quad \text{Ecuación (111)}$$

$$W = W_c = W_e = \oint p dV_c + \oint p dV_e = \oint p \left(\frac{p dV_e}{d\theta} + \frac{dV_c}{d\theta} \right) d\theta \quad \text{Ecuación (112)}$$

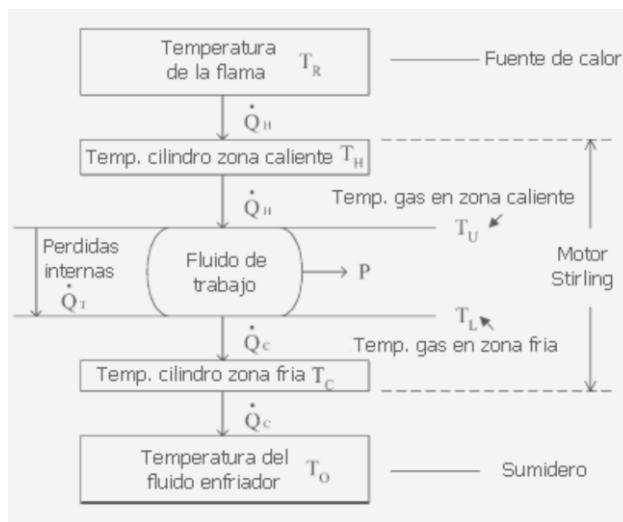
Dónde: θ = ángulo de la manivela

Tabla V. El sistema de ecuaciones obtenidas del análisis

Presión	$P = \frac{MR}{\left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e}\right)}$
Calor transferido	$Q_e = W_e = \oint \left(p \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta$ $Q_c = W_c = \oint \left(p \frac{dV_c}{d\theta} \right) d\theta$
Trabajo efectuado	$W = W_c + W_e = \int_0^{2\pi} p \left(\frac{dV_c}{d\theta} + \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta$
Eficiencia	$\eta = \frac{W}{Q_{eQ}}$

Fuente: elaboración propia, resumen de ecuaciones.

Figura 36. Representación de análisis del motor Stirling



Fuente: SENFT, James R. *Mechanical efficiency of heat engines*. p. 90.

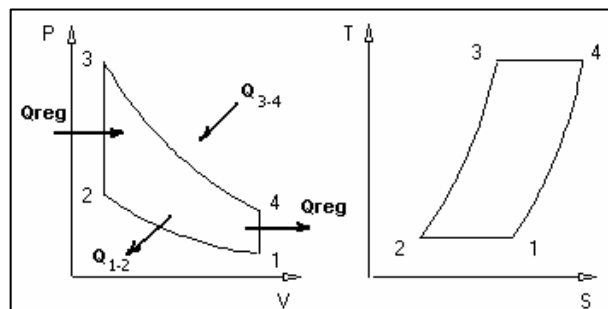
Donde T_R es la temperatura de la fuente de calor, T_O es la temperatura del foco frío, T_H es la temperatura de la superficie en contacto con el fluido de trabajo en la zona caliente, T_C es la temperatura de la superficie en contacto con el fluido de trabajo en la zona fría y las inversas de las resistencias térmicas

(HA)H y (HA)C de la zona caliente y la zona fría respectivamente, los cuales gobiernan el flujo de calor que entra y sale del motor.

2.6. Eficiencia térmica del motor Stirling

El ciclo ideal Stirling se compone de dos procesos isotérmicos y dos isométricos; la regeneración se efectúa a volumen constante, tal como se muestra en el gráfico siguiente:

Figura 37. Ciclo ideal Stirling

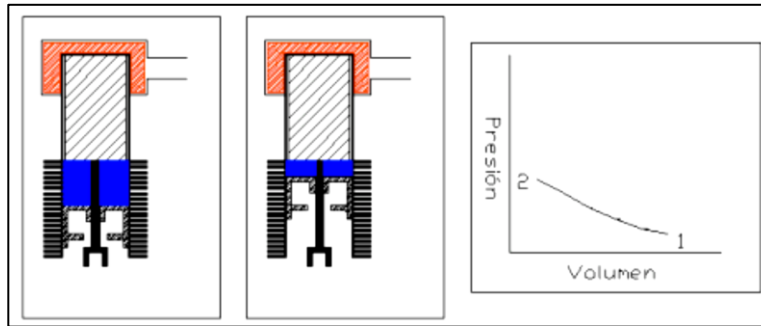


Fuente. *Ciclos Stirling*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S181559442011000200002&script=sci_arttext. Consulta: 30 de marzo de 2014.

En primer lugar se parte del estado 1. Los elementos son: cilindro, pistón, fluido, desplazador. Todo el gas está en la zona fría, y el pistón está en la posición inferior.

Proceso 1-2. Cuando el pistón pasa del estado 1 al 2, se realiza una compresión isotérmica a la temperatura más baja. El proceso está representado en el diagrama presión-volumen anterior. Aquí se le extrae calor al ciclo.

Figura 38. **Compresión isotérmica (proceso 1-2)**



Fuente: *Ciclos Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/trlng1.htm. Consulta: 30 de marzo de 2014.

El trabajo consumido en este proceso es igual al calor rechazado en el ciclo.

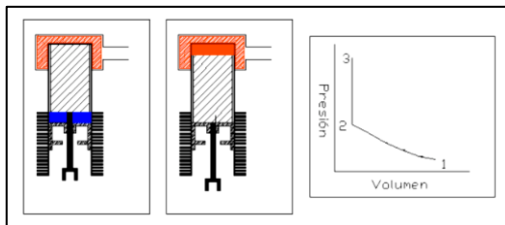
$$Q_{1-2} = R \cdot T_{min} \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{Ecuación (113)}$$

$$W_{1-2} = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{Ecuación (114)}$$

$$s_2 - s_1 = R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{Ecuación (115)}$$

Proceso 2-3. Si se mantiene fijo el pistón y se mueve el desplazador, se hace pasar todo el fluido a la zona caliente, obteniendo un proceso isométrico en el que aumenta la presión sin cambiar el volumen. Aquí el regenerador entrega calor a la sustancia de trabajo, elevando su temperatura de T_{min} a T_{max} .

Figura 39. **Suministro de calor a volumen constante (proceso 2-3)**



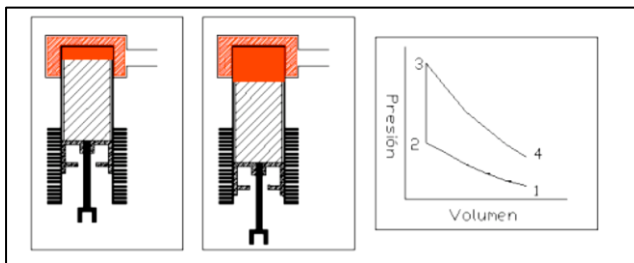
Fuente: *Ciclos Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/string1.htm. Consulta 2 de abril de 2014.

$$Q_{reg} = Q_{2-3} = cv * (T_3 - T_2) \quad \text{Ecuación (116)}$$

$$s_3 - s_2 = cv * \ln\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}\right) \quad \text{Ecuación (117)}$$

Proceso 3-4. En este momento, se puede obtener una expansión isotérmica a la temperatura superior haciendo bajar juntos al pistón y al desplazador. En este proceso se le entrega calor externo a la sustancia de trabajo.

Figura 40. **Expansión isotérmica (proceso 3-4)**



Fuente: *Ciclos Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/string1.htm. Consulta: 2 de abril de 2014.

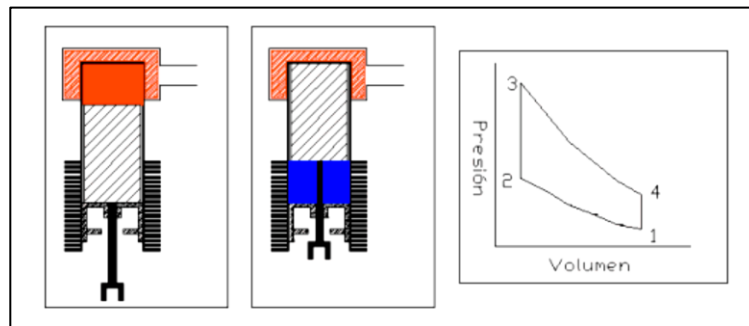
$$Q_{3-4} = R * T_{max} * \ln\left(\frac{P_3}{P_4}\right) = R * T_{max} * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad \text{Ecuación (118)}$$

$$W_{3-4} = P_3 * V_3 * \ln\left(\frac{P_3}{P_4}\right) \quad \text{Ecuación (119)}$$

$$s_4 - s_3 = R * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad \text{Ecuación (120)}$$

Proceso 4-1. Moviendo el desplazador al estado inicial, se obtendrá otro proceso isométrico que finalizará el ciclo termodinámico representado por el proceso 1-4. Aquí el regenerador absorbe calor.

Figura 41. **Extracción de calor a volumen constante (proceso 4-1)**



Fuente: *Ciclos Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/strlng1.htm. Consulta: 2 de abril de 2014.

$$Q_{4-1} = -Q_{reg} = cv * (T_1 - T_4) \quad \text{Ecuación (121)}$$

$$s_3 - s_4 = cv * \ln\left(\frac{T_{min}}{T_{max}}\right) \quad \text{Ecuación (122)}$$

La eficiencia térmica del ciclo Stirling se calcula de con la siguiente expresión:

$$\eta_t = \frac{Q_{3-4} - Q_{1-2}}{Q_{3-4}} = \frac{R * T_{max} * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - R * T_{min} * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{R * T_{max} * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad \text{Ecuación (123)}$$

Donde finalmente se obtiene:

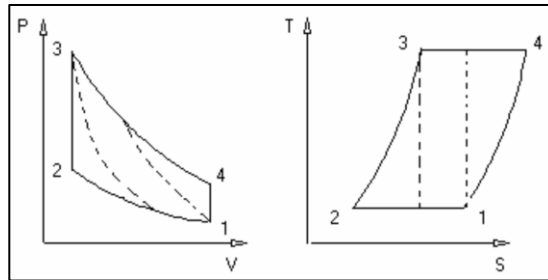
$$\eta_t = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad \text{Ecuación (124)}$$

$$T_{min} = T_1 = T_4 \quad \text{Ecuación (125)}$$

$$T_{max} = T_2 = T_3 \quad \text{Ecuación (126)}$$

Con esto queda demostrado que el ciclo ideal Stirling tiene la misma eficiencia que el ciclo de Carnot, la cual es la máxima eficiencia que puede alcanzar una máquina térmica considerando que todas las pérdidas sean cero. El ciclo de Carnot utiliza procesos isentrópicos, no procesos regenerativos de intercambio de calor, asumiendo que el calor específico del regenerador es infinitamente grande, como el ciclo Stirling. A continuación se mostrará un esquema comparativo de los dos ciclos.

Figura 42. **Diagrama P-V y S-T del ciclo Stirling (línea continua) y Carnot (línea discontinua)**



Fuente: *Ciclo Stirling*. http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/stirling1.htm. Consulta: 5 de abril de 2014.

La figura anterior muestra una comparación de los ciclos Stirling y Carnot funcionando entre dos temperaturas extremas iguales. Como se puede apreciar otra ventaja del ciclo Stirling es el mayor trabajo indicado realizado en comparación con el ciclo de Carnot ($W_{\text{stirling}} > W_{\text{carnot}}$).

2.7. Parámetros que afectan el funcionamiento de un motor Stirling

Los principales parámetros son cuatro:

$$\Gamma = \frac{T_C}{T_H} \quad \text{Ecuación (127)}$$

$$k = \frac{V_C}{V_E} \quad \text{Ecuación (128)}$$

α es el ángulo de desfase del mecanismo

$$X = \frac{V_D}{V_E} \quad \text{Ecuación (129)}$$

Donde TC y TH son las temperaturas del fluido de trabajo en la zona fría y zona caliente respectivamente, VC y VE son los volúmenes de barridos por el pistón y desplazador respectivamente, α es el ángulo de desfase del mecanismo; y VD es el volumen muerto dentro del motor.

No existe una combinación ideal de estos parámetros, porque los valores óptimos varían de acuerdo a un caso particular.

3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MECANISMO

La obra *Mechanical efficiency of heat engines* de James R. Senft es de las principales en las que está basado este capítulo, debido al estudio e investigación que su autor dedicó al análisis mecánico del motor Stirling.

En este capítulo se realizará el análisis cinemático del mecanismo rómbico, ya que este es el mecanismo que se usa para el motor estudiado. El mecanismo de biela manivela, se eligió por las siguientes razones:

- Este mecanismo da uno de los “mejores” ciclos para el motor Stirling.
- Elimina la fuerza lateral que actúa sobre el pistón-cilindro que se produciría con un mecanismo de biela-manivela.
- Da un balance dinámico perfecto entre sus partes.

Así como este mecanismo tiene ventajas, también tiene desventajas:

- Requiere de alta precisión en su fabricación
- Tiene un gran número de partes móviles
- Tiene mayor desgaste

A continuación se realizará el análisis cinemático del motor, pero antes se mencionará la nomenclatura a utilizar:

- θ = ángulo de la manivela con respecto a la vertical
- L_d = longitud del desplazador
- L_p = longitud del pistón

- L_{vd} = longitud del vástago del desplazador
- L_{vp} = longitud del vástago del pistón
- R_m = radio de la manivela
- L = longitud de la biela
- E = longitud desde el eje central del pistón hasta un extremo de la biela
- e = longitud muerta del espacio caliente

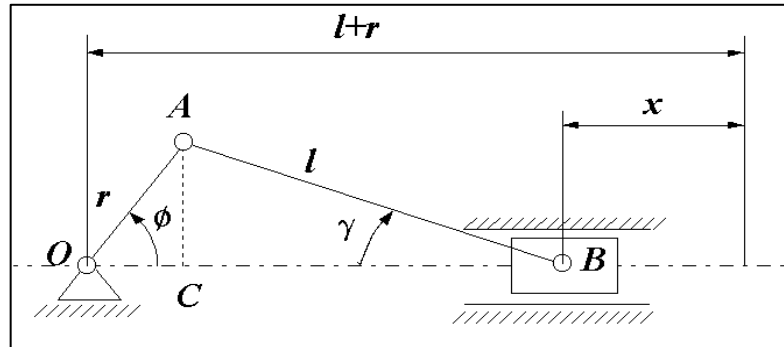
3.1. Diseño del mecanismo biela manivela para la transformación del movimiento

Este mecanismo consta de dos piezas básicas articuladas entre sí y de las que recibe el nombre: la manivela y la biela. La manivela OB es una pieza que gira alrededor de un punto O y describe un movimiento circular.

La biela AB es una pieza rígida acoplada a la manivela en el punto B. Este extremo, denominado cabeza de la biela, sigue el mismo movimiento circular que la manivela, mientras el otro extremo A, denominado pie de biela, describe un movimiento alternativo o de vaivén.

Las bielas constan de tres partes habitualmente, la manivela actúa como elemento motriz y la biela, como elemento conducido. De este modo se pueden transformar movimientos circulares en movimientos alternativos.

Figura 43. **Esquema mecanismo biela manivela**



Fuente: *Mecanismos biela manivela*. <http://www.monografias.com/trabajos14/palancas/palancas.shtml>. Consulta: 15 de abril de 2014.

3.2. Ecuaciones de movimiento

A pesar de que encontrar el movimiento rectilíneo uniforme en la naturaleza es bastante extraño, es el movimiento más fácil de estudiar y servirá para estudiar otros más complejos. El movimiento rectilíneo uniforme cumple las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned}
 X &= r + l - r \cos(\theta) - l \cos(\gamma) \\
 &= r(1 - \cos(\theta)) + l(1 - \cos(\gamma)) \\
 &= r(1 - \cos(\theta)) + l(1 - \sqrt{1 - \sin^2(\gamma)}) \\
 &= r(1 - \cos(\theta)) + l\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2\theta} \quad \text{Ecuación (130)}
 \end{aligned}$$

Y se puede escribir aproximadamente como:

$$x = r(1 - \cos(\theta)) + \frac{r^2}{2l} \sin^2 \theta \text{ Aprox.} \quad \text{Ecuación (131)}$$

La variación del ángulo F del cigüeñal que se utilizó en el cálculo del ciclo Schmidt, es el mismo ángulo designado como θ para los cálculos en el movimiento alternativo.

Tabla VI. **Tabla de parámetro de análisis para movimiento alternativo**

Orden	Parámetro	Nomenclatura	Medida	Unidad
	Radio del cigüeñal	r	20	m
	Longitud de la biela	L	60	m
	Carrera del pistón	C	40	m
	Número de revoluciones	n	2 000	rpm
	Ángulo de fase	θ	0-360	

Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Índice del ángulo de inclinación del cigüeñal

Al considerar el deslizamiento de un cuerpo sobre un plano inclinado, se observa que al variar la inclinación de dicho plano, el objeto inicia el movimiento al alcanzarse un ángulo de inclinación crítico.

$$\lambda = \frac{r}{L} \quad \text{Ecuación (132)}$$

$$\lambda = 0,333333 \quad \text{Ecuación (133)}$$

3.2.2. Ángulo del desplazamiento de la biela

Ángulo del desplazamiento de la biela

$$\beta = (\text{sen}(\lambda x \sin(\alpha_1))) \quad \text{Ecuación (134)}$$

$$\beta = 9,594^\circ$$

3.2.3. Desplazamiento en función del ángulo cigüeñal

Este es el parámetro que determina la posición del pistón respecto al cigüeñal dependiendo del ángulo sobre su trayectoria rectilínea.

$$X = r x \left| (1 - \cos(\alpha_1)) + \left(\frac{1}{\lambda}\right) x \left[1 - \sqrt{1 - \lambda^2 x (\sin(\alpha_1))^2} \right] \right| \quad \text{Ecuación (135)}$$

$$X = 3,52 \text{ mm}$$

3.2.4. Velocidad del pistón

Cuando se habla de la velocidad del pistón, normalmente suele ser de la velocidad media en su recorrido desde punto muerto superior al punto muerto inferior.

$$VL = \frac{\pi x n}{30} x r_1 x \left(\sin(\alpha_1) + \frac{\lambda}{2} x \sin(2\alpha_1) \right) \quad \text{Ecuación (136)}$$

$$VL = 2,699 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.2.5. Velocidad media del pistón

Se supone que durante todo su recorrido la velocidad es la misma, esto no es así por supuesto, pero para algunos aspectos es más sencillo pensar en la velocidad media que en la real. Como la velocidad = distancia / tiempo, se puede calcular la velocidad a la que se recorre una distancia en un tiempo, como si se hiciera a una velocidad constante.

$$V_{mp} = \frac{c \cdot n}{30} \quad \text{Ecuación (137)}$$

$$V_{mp} = 2,66667 \frac{m}{s}$$

3.2.6. Velocidad angular

La velocidad angular es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo y se designa mediante la letra griega ω . Su unidad en el Sistema Internacional es el radián por segundo (rad/s).

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad \text{Ecuación (138)}$$

$$\omega = 209,44 \frac{rad}{s}$$

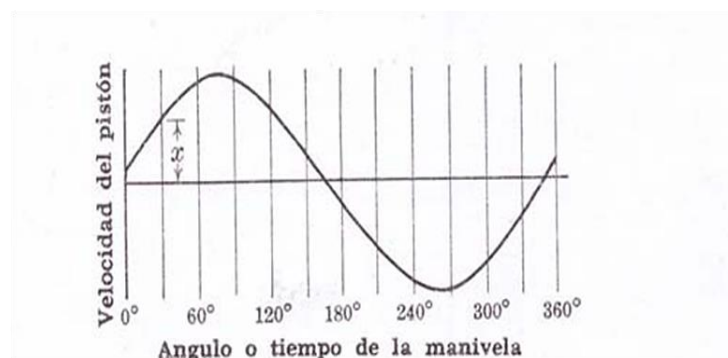
3.2.7. Aceleración

En física, la aceleración es una magnitud vectorial que indica el cambio de velocidad por unidad de tiempo.

$$a = \omega^2 \times r_1 \times (\cos(\alpha_1) + \lambda \times \cos(2\alpha_1)) \quad \text{Ecuación (139)}$$

$$a = 905,979 \frac{m}{s^2}$$

Figura 44. **Gráfica de velocidad versus desplazamiento**



Fuente: *Fundamentos de máquinas*. <http://fundamentosdemaquinaswmn.blogspot.com/2010/08/normal-0-21-false-false-false-es-x-none.html>. Consulta: 17 de abril de 2014.

3.2.8. Fuerza

El pistón de potencia entrega la fuerza para aplicar torque al cigüeñal. La fuerza máxima será hacia afuera y está dada por:

$$F_{max} = A \times (P_{max} - P_{amb}) \quad \text{Ecuación (140)}$$

$$F_{max} = \pi \times \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \times (P_{max} - P_{amb}) \quad \text{Ecuación (141)}$$

$$F_{max} = 130,02 \text{ N}$$

La fuerza mínima será hacia adentro y está dada por:

$$F_{min} = A \times (P_{amb} - P_{min}) \quad \text{Ecuación (142)}$$

$$F_{min} = \pi \times \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \times (P_{amb} - P_{min}) \quad \text{Ecuación (143)}$$

$$F_{min} = -15,62 \text{ N}$$

3.2.9. Torque

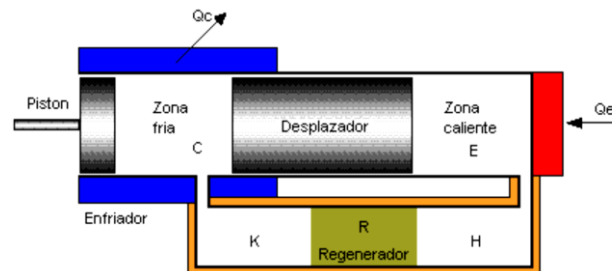
La tendencia de una fuerza a hacer girar un cuerpo en torno a cierto eje se mide por medio de una cantidad llamada momento de torsión (torque), la magnitud del momento de torsión debido a una fuerza F es:

$$\tau = F * d \quad \text{Ecuación (144)}$$

3.3. Análisis termodinámico aplicado al prototipo

Para la modelación termodinámica del prototipo, se utilizó simultáneamente la teoría de Schmidt y un modelo adiabático. Para ambos modelos se consideró una eficiencia mecánica para la potencia real en el eje.

Figura 45. Esquema general de un motor Stirling



Fuente: *Simulaciones Mecánicas*. <http://jmirez.wordpress.com/2012/08/01/j497-descripcion-motor-stirling-configuracion-beta-y-algunas-simulaciones-mecanicas-en-matlab/>. Consulta: 25 de abril de 2014.

Como se puede observar en la figura, el motor está dividido en 5 celdas (C, K, R, H y E) conectadas entre sí. Para el cálculo se considerará que las celdas K, R y H son adiabáticas y entonces se aplicarán las ecuaciones anteriores para cada una de las celdas.

3.4. Consideraciones para el cálculo

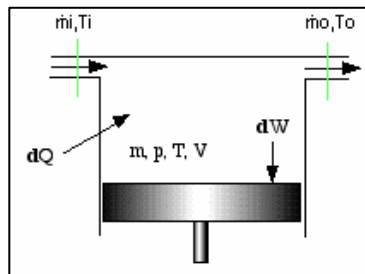
- Se considerará que la presión instantánea dentro del motor es la misma en todas las celdas (análisis de Schmidt).
- Se considerará que la masa total de aire en el motor es constante.
- Se considerará al fluido de trabajo (aire) un gas ideal.
- Se considerará a las celdas K, R y H son adiabáticas.

3.5. Ecuaciones generales a utilizar

Ecuación de la conservación de la energía en una celda:

$$dQ + c_p * \dot{m}_i * T_i - c_p * \dot{m}_o * T_o = dW + c_v * d(m * T) \quad \text{Ecuación (145)}$$

Figura 46. **Esquema general de energía en una celda**



Fuente: *Simulaciones mecánicas*. <http://jmirez.wordpress.com/2012/08/01/j497-descripcion-motor-stirling-configuracion-beta-y-algunas-simulaciones-mecanicas-en-matlab/>. Consulta: 25 de abril de 2014.

Ecuación de estado de los gases ideales:

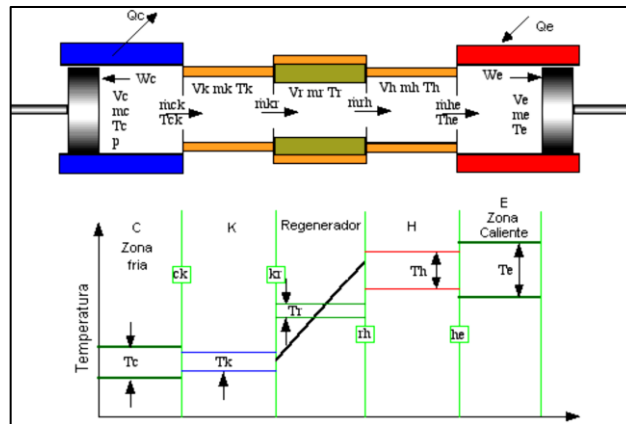
$$P * V = m * R * T \quad \text{Ecuación (146)}$$

$$\frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} = \frac{dm}{m} + \frac{dT}{T} \quad \text{Ecuación (147)}$$

3.6. Cálculo

El ciclo ideal Stirling se compone de dos procesos isométricos (calentamiento y enfriamiento del fluido de trabajo a volumen constante) y dos isotérmicos (compresión y expansión a temperatura constante). La eficiencia termodinámica del ciclo ideal Stirling es igual a la de un ciclo de Carnot, trabajando a las mismas temperaturas de las fuentes de calor, lo cual se debe principalmente a la “regeneración” que se lleva a cabo durante los procesos a volumen constante del ciclo.

Figura 47. **Esquema general para el cálculo termodinámico aplicado al prototipo**



Fuente: *Máquina Stirling*. <http://www.slideshare.net/kevinalejandruruizbalcazar/maquina-stirling>.

Consulta: 2 de mayo de 2014.

Nomenclatura utilizada:

- V_c = volumen instantáneo en el espacio frío.
- V_k = volumen del gas en el ducto del espacio frío.
- V_r = volumen del gas en el regenerador.
- V_h = volumen del gas en el ducto del espacio caliente.
- V_e = volumen instantáneo en la espacio caliente.
- T_c = temperatura instantánea del gas en el espacio frío.
- T_k = temperatura instantánea del gas en el ducto del espacio frío.
- T_r = temperatura instantánea del gas en el regenerador.
- T_h = temperatura instantánea del gas en el ducto del espacio caliente.
- T_e = temperatura instantánea del gas en el espacio caliente.
- m_c = masa de gas en el espacio frío.
- m_k = masa de gas en el ducto del espacio frío.

- m_r = masa de gas en el regenerador.
- m_h = masa de gas en el ducto del espacio caliente.
- m_e = masa de gas en el espacio caliente.
- P = presión total instantánea del sistema.
- M = masa total del gas (constante).
- R = constante universal de los gases.
- $K = C_p/C_v$ = exponente adiabático.
- T_{ck} = temperatura de ingreso o salida del gas entre el espacio frío y el ducto del espacio frío.
- T_{he} = temperatura de ingreso o salida del gas entre el espacio caliente y el ducto del espacio caliente.
- θ = ángulo de giro del cigüeñal con respecto a la vertical.

Como se ha dicho anteriormente, se asumirá que la masa de aire total en el motor es constante y su valor igual a M .

$$M = m_c + m_k + m_r + m_h + m_e \quad \text{Ecuación (148)}$$

Despejando m en la ecuación (148) y reemplazándola en la (149), se tiene:

$$P = \frac{M \cdot R}{\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e}} \quad \text{Ecuación (149)}$$

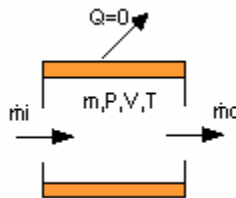
Ahora, como $M = \text{cte.}$, entonces:

$$dM = 0 \quad \text{Ecuación (150)}$$

$$dmc + dm_k + dmr + dm_h + dme = 0 \quad \text{Ecuación (151)}$$

Del análisis de las celdas adiabáticas K, R y H, se tiene:

Figura 48. **Esquema de cálculo para las celdas K, R y H**



Fuente: *Máquinas Stirling*. <http://tecmotor.wordpress.com/category/ninguna/>. Consulta: 4 de mayo de 2014.

Ya que $V = \text{cte.}$, entonces:

$$dV = 0 \quad \text{Ecuación (152)}$$

$$dW = 0 \quad \text{Ecuación (153)}$$

Por lo tanto, la ecuación de la conservación de la energía se reduce a:

$$c_p * (\dot{m}_i + \dot{m}_o) * T = c_v * d(m * T) \quad \text{Ecuación (154)}$$

De la ecuación de estado de los gases ideales, se tiene:

$$\frac{dm}{m} = \frac{dP}{P} - \frac{dT}{T} \quad \text{Ecuación (155)}$$

Resolviendo las dos ecuaciones anteriores:

$$k = \frac{cp}{cv} \quad \text{Ecuación (156)}$$

$$dm = \frac{m}{K} * \frac{dP}{P} \quad \text{Ecuación (157)}$$

Por lo tanto, aplicando lo anterior para las celdas K, R y H, se tiene:

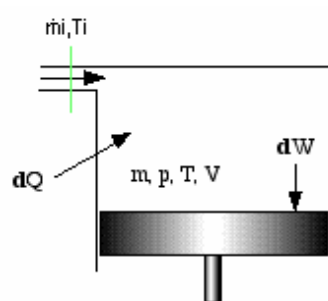
$$dmk = \frac{mk}{k} * \frac{dP}{P} \quad \text{Ecuación (158)}$$

$$dmr = \frac{mr}{k} * \frac{dP}{P} \quad \text{Ecuación (159)}$$

$$dmh = \frac{mh}{k} * \frac{dP}{P} \quad \text{Ecuación (160)}$$

Del análisis de las celdas C y E, se tiene:

Figura 49. **Esquema de cálculo para las celdas C y E**



Fuente: *Máquinas Stirling*. <http://tecmotor.wordpress.com/category/ninguna/>.

Consulta: 4 de mayo de 2014.

De la ecuación de la conservación de la energía:

$$dQ + cp * \dot{m}_i * T_i = dW + cv * d(m * T) \quad \text{Ecuación (161)}$$

De la ecuación de estado de los gases ideales:

$$m * T = \frac{P * V}{R} \quad \text{Ecuación (162)}$$

Si $m_i > 0$

$$\dot{m}_i = dm \quad \text{Ecuación (163)}$$

De lo contrario se obtiene que:

$$\dot{m}_i = -dm \quad \text{Ecuación (164)}$$

Resolviendo, se tiene que:

$$k = \frac{cp}{cv} \quad \text{Ecuación (165)}$$

$$dm = \frac{P * dV + \frac{V * dP}{K}}{R * T_i} - \frac{dQ}{\omega * cp * T_i} \quad \text{Ecuación (166)}$$

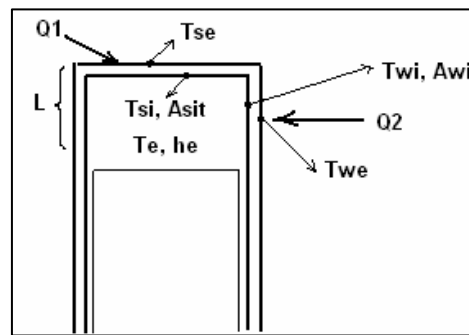
3.7. Análisis térmico aplicado al prototipo

Para realizar el análisis térmico al prototipo, se analizarán los dos focos del motor para obtener las ecuaciones que gobiernan el intercambio de calor en el motor.

3.8. Análisis térmico en el foco caliente

Un motor térmico es una máquina térmica que transforma calor en trabajo mecánico, por medio del aprovechamiento del gradiente de temperatura entre una fuente de calor (foco caliente) y un sumidero de calor (foco frío). El calor se transfiere de la fuente al sumidero y, durante este proceso, algo del calor se convierte en trabajo por medio del aprovechamiento de las propiedades de un fluido de trabajo, usualmente un gas o el vapor de un líquido.

Figura 50. Esquema de cálculo para la transferencia de calor en la zona caliente



Fuente. *Foco caliente*. https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/doku.php?id=recopilacio_de_conceptes_stirling. Consulta: 4 de mayo de 2014.

Donde:

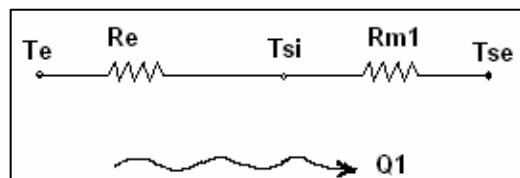
- $Q1$ = calor que ingresa al del motor por la tapa de la zona caliente.
- $Q2$ = calor que ingresa al del motor por el cilindro de la zona caliente.
- Tse = temperatura promedio exterior de la tapa.
- Tsi = temperatura promedio interior de la tapa.

- T_{we} = temperatura promedio exterior de de las paredes del cilindro.
- T_{wi} = temperatura promedio interior de de las paredes del cilindro.
- A_{sit} = área interior de la tapa.
- A_{wi} = área interior de las paredes del cilindro en una longitud igual a la carrera.
- T_e = temperatura interior del fluido de trabajo en la zona caliente.
- h_e = coeficiente de convección del fluido de trabajo en la zona caliente.

3.8.1. Cálculo del calor Q_1

El esquema de la resistencia térmica es como se muestra a continuación:

Figura 51. Circuito térmico equivalente para hallar Q_1



Fuente: *Foco caliente*. [https://cooperativa.ecoxarxes .cat/dokuwiki/110657 / doku. php?id = recopilacio_de_conceptes_stirling](https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/doku.php?id=recopilacio_de_conceptes_stirling). Consulta: 4 de mayo de 2014.

$$Q_1 = \frac{T_{se} - T_{si}}{R_{m1}} = \frac{T_{si} - T_e}{R_e} \quad \text{Ecuación (167)}$$

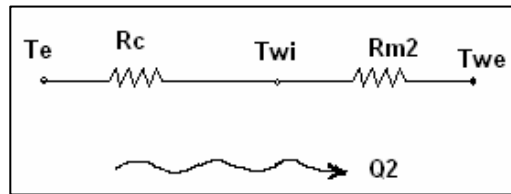
$$T_{si} = \frac{T_{se} * R_e + T_e * R_{m1}}{R_{m1} + R_e} \quad \text{Ecuación (168)}$$

$$Q_1 = A_{sit} * h_e * (T_{si} - T_e) \quad \text{Ecuación (169)}$$

3.8.2. Cálculo del calor Q2

El esquema de la resistencia térmica es como se muestra a continuación:

Figura 52. Circuito térmico equivalente para hallar Q2



Fuente: *Foco caliente*. https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/doku.php?id=recopilacio_de_conceptes_stirling. Consulta: 5 de mayo de 2104.

$$Q2 = \frac{T_{we} - T_{wi}}{R_{m2}} = \frac{T_{wi} - T_e}{R_c} \quad \text{Ecuación (170)}$$

$$T_{wi} = \frac{T_{we} * R_w + T_e * R_{m2}}{R_{m2} + R_w} \quad \text{Ecuación (171)}$$

$$Q2 = A_{wi} * h_e + (T_{wi} - T_e) \quad \text{Ecuación (172)}$$

El calor total entregado por el foco frío hacia el fluido de trabajo será:

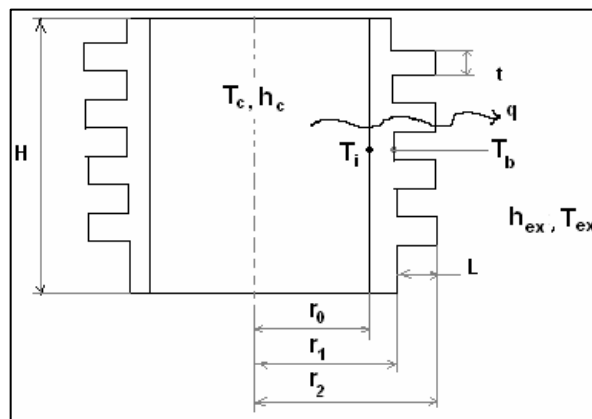
$$Q_e = Q1 + Q2 \quad \text{Ecuación (173)}$$

$$Q_e = A_{si} * h_e * (T_{si} - T_e) + A_{wi} * h_e * (T_{wi} - T_e) \quad \text{Ecuación (174)}$$

3.9. Análisis térmico en el foco frío

Un motor térmico es una máquina térmica que transforma calor en trabajo mecánico, por medio del aprovechamiento del gradiente de temperatura entre una fuente de calor (foco caliente) y un sumidero de calor (foco frío).

Figura 53. Esquema de cálculo para la refrigeración por aletas



Fuente: *Foco frío*. https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/doku.php?id=recopilacio_de_conceptes_stirling. Consulta: 6 de mayo de 2014.

Donde:

- H = altura del cilindro
- t = espesor de las aletas
- T_b = temperatura exterior del cilindro en la zona donde no hay aletas
- r_0 = radio interno
- r_1 = radio exterior al inicio de las aletas
- r_2 = radio exterior al final de las aletas
- q = calor que se extrae

- h_{ex} = coeficiente de convección del medio externo
- T_{ex} = temperatura del medio externo
- K = conductividad térmica del material
- h_c = coeficiente de convección del aire interno
- η_f = eficiencia de las aletas
- N = número de aletas

Calor total rechazado por el sistema de aletas

$$q = q_f + q_b \quad \text{Ecuación (175)}$$

Calor rechazado por las aletas

$$q_f = N * \eta_f * q_{max} \quad \text{Ecuación (176)}$$

$$q_{max} = 2 * \pi * h_{ex} * (r_{2c}^2 - r_1^2) * (T_b - T_{ex}) \quad \text{Ecuación (177)}$$

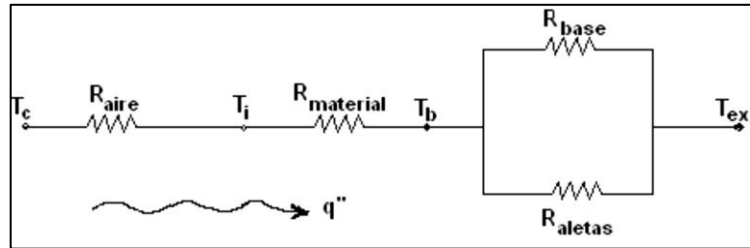
Calor rechazado por la parte donde no hay aletas

$$q_b = h_{ex} * A_b * (T_b - T_{ex}) \quad \text{Ecuación (178)}$$

$$A_b = (H - N * t) * (2\pi * r_1) \quad \text{Ecuación (179)}$$

Haciendo un circuito equivalente, se tiene lo siguiente.

Figura 54. **Circuito térmico equivalente para hallar el calor rechazado**



Fuente: *Foco frío*. [https://cooperativa.ecoxarxes .cat/dokuwiki/110657/doku. php?id=recopilacio_ de_conceptes_stirling](https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/doku.php?id=recopilacio_de_conceptes_stirling). Consulta: 7 de mayo de 2014.

Las fórmulas de las resistencias térmicas de la figura anterior son:

$$R_{aire} = \frac{1}{h_c \cdot \pi \cdot 2r_0 \cdot H} \quad \text{Ecuación (180)}$$

$$R_{material} = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi \cdot K \cdot H} \quad \text{Ecuación (181)}$$

$$R_{base} = \frac{1}{h_{ex} \cdot (2\pi \cdot r_1 - N \cdot t) \cdot H} \quad \text{Ecuación (182)}$$

$$R_{aletas} = \frac{1}{N \cdot \eta_f \cdot h_{ex} \cdot A_f} \quad \text{Ecuación (183)}$$

Área efectiva de las aletas:

$$A_f = 2\pi \cdot (r_{2c}^2 - r_1^2) \quad \text{Ecuación (184)}$$

Donde el calor total disipado por las aletas tiene la siguiente fórmula:

$$q = \frac{T_b - T_c}{R_{aire} + R_{material}} \quad \text{Ecuación (185)}$$

$$q = \frac{T_{ex} - T_c}{R_{aire} + R_{material} + \left(\frac{1}{R_{base}} + \frac{1}{R_{aletas}}\right)^{-1}} \quad \text{Ecuación (186)}$$

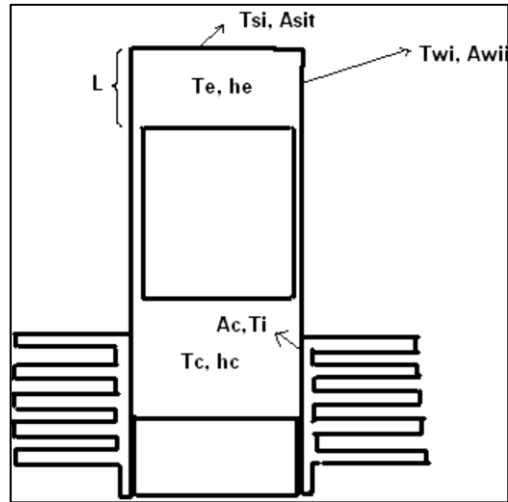
Expresado de otra manera, se tiene:

$$q = \frac{N * \eta_f * h_{ex} * 2\pi * (r_{2c}^2 - r_1^2) * (T_b - T_{ex}) + h_{ex} * (H - N * t) * (2\pi * r_1) * (T_b - T_{ex})}{(2\pi * r_1) * (T_b - T_{ex})} \quad \text{Ecuación (187)}$$

3.10. Cálculo térmico para el motor Stirling

Para el cálculo, se asumirá constante las temperaturas en los focos. Donde T_{si} es la temperatura promedio de la tapa en la parte interna del foco caliente, T_{wi} es la temperatura promedio del cilindro en la parte interna del foco caliente en una longitud igual a la carrera del desplazador, y T_i es la temperatura de la parte interna del cilindro en el foco frío.

Figura 55. Esquema de cálculo el análisis térmico aplicado al prototipo



Fuente: *Foco frío*. [https://cooperativa.ecoxarxes .cat/dokuwiki/110657/doku.php?id =recopilacio _de_conceptes_stirling](https://cooperativa.ecoxarxes.cat/dokuwiki/110657/doku.php?id=recopilacion_de_conceptes_stirling). Consulta 10 de Mayo de 2014.

3.10.1. Cálculo de los calores que entran y salen en el motor

El calor rechazado por el motor Stirling es:

$$Q_c = h_c * A_c * (T_i - T_c) \quad \text{Ecuación (188)}$$

El calor absorbido por el motor Stirling es:

$$Q_e = A_{sit} * h_e * (T_{si} - T_e) + A_{wi} * h_e * (T_{wi} - T_e) \quad \text{Ecuación (189)}$$

Donde h_e y h_c son los coeficientes de transferencia de calor por convección instantáneo del fluido de trabajo del motor. A_c, A_e, A_w son las áreas de transferencia, T_c y T_e son las temperaturas instantáneas del fluido de trabajo en el foco frío y caliente, respectivamente.

3.10.2. Cálculo de h_e y h_c

Para el cálculo de estos coeficientes se utilizará la fórmula para hallar el coeficiente de convección instantánea de los gases de combustión en un motor de combustión interna, la cual deriva de la siguiente correlación:

$$\frac{h*B}{k} = a \left(\frac{\rho*w*B}{\mu} \right)^b \quad \text{Ecuación (190)}$$

Donde a es una constante, B es el diámetro del cilindro, ρ es la densidad, w es la velocidad promedio del gas en el motor, μ es la viscosidad cinemática del gas, k es la conductividad térmica del gas; a y b son constantes cuyos valores son 0,035 y 0,8, respectivamente.

Para el cálculo de w se tiene la siguiente relación:

$$w = C_1 * S_p + C_2 * \frac{V_d * T_r}{p_r * V_r} (p - p_m) \quad \text{Ecuación (191)}$$

Ya que en el interior del cilindro no hay combustión, $C_2 = 0$, por lo que la ecuación queda como:

$$w = C_1 * S_p \quad \text{Ecuación (192)}$$

Donde C_1 es 2,28 para períodos de expansión y compresión. S_p es la velocidad promedio del motor.

Lo que se hizo en este trabajo es cambiar las propiedades de los gases de combustión por las del aire y reemplazarlos en la ecuación. Al final se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$h_c = 1,678 * B^{-0.2} * mc^{0.8} * T_c^{0,21478} * \left(\frac{w}{V_c}\right)^{0.8} \quad \text{Ecuación (193)}$$

$$h_e = 1,678 * B^{-0.2} * me^{0.8} * T_e^{0,21478} * \left(\frac{w}{V_e}\right)^{0.8} \quad \text{Ecuación (194)}$$

Donde:

- B = diámetro del cilindro del motor
- me = masa instantánea de aire en la zona caliente
- mc = masa instantánea de aire en la zona fría
- Te = temperatura instantánea en la zona caliente
- Tc = temperatura instantánea en la zona fría
- w = velocidad promedio del gas dentro del motor
- Ve = volumen instantáneo en la zona caliente
- Vc = volumen instantáneo en la zona fría

4. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

Según las propuestas para los diferentes modelos que James Rizzo compiló en su obra *The Stirling Engine Manual*, las medidas propuestas para este modelo han sido tomadas de su aporte, el proceso de maquinado de cada pieza así como la fabricación de la estructura se pueden observar con mejor detalle en los anexos del presente trabajo.

Para dimensionar el motor se definieron dos de los parámetros dimensionales del mismo, como son la carrera del pistón y el diámetro del cilindro. La carrera influye sobre las dimensiones del mecanismo biela manivela y también puede influir en la longitud del cilindro dependiendo del mecanismo a utilizar; el diámetro del cilindro influye en la dimensión del desplazador y, por ende, en la longitud del cilindro.

Este motor, tiene un lado horizontal donde se encuentra al cilindro desplazador y uno vertical que es el cilindro de potencia, todo está sobrepuesto en un marco de metal llamado bastidor que consiste en una caja de aluminio de 3 pulgadas cúbicas, con un faltante para poder instalar el eje cigüeñal y el volante de inercia.

Ambos cilindros están interconectados por un conducto que bien puede ser de cobre o de algún polímero de alta densidad y puede estar soldado o roscado a los extremos de los cilindros.

Ambos cilindros son atornillados al bastidor para que puedan ser conectados por el mecanismo biela-manivela, el cilindro del desplazador se hace de una forma más alargada, esto para evitar las tensiones que pueda sufrir por la alta temperatura del concentrador solar, asimismo libera tensión en el pasador del volante.

4.1. Dimensionamiento del mecanismo biela manivela

Las medidas propuestas en el diseño original del motor, determinan la carrera más corta de ambos cilindros que corresponde a 1" total de carrera en el cilindro desplazador, por lo que el diámetro mínimo del cigüeñal es de $\frac{1}{2}$ " para poder completar la carrera en ambos pistones, y se hace con un espesor de $\frac{1}{4}$ ", para poder sujetar ambos eslabones sobre este cigüeñal. El cigüeñal se hizo de acero AISI 1018.

4.2. Dimensionamiento del desplazador

El desplazador se fabricó de un cilindro de aluminio de 2" de diámetro, primero se rectificó el cilindro, dejándolo interiormente a una medida de $\frac{1}{8}$ " de pared con diámetro interior de $1 \frac{1}{4}$ " diámetro y exterior de $\frac{1}{2}$ ", luego se construyó una tapadera del mismo material para atornillarla al pistón dejándolo como un cilindro cerrado en ambas partes. Se hizo una rosca en el centro de la tapadera para ajustar el largo del eslabón desplazador.

Figura 56. **Desplazador**



Fuente: elaboración propia.

4.3. **Dimensionamiento del pistón de potencia**

Se incorporó esta parte para aumentar la longitud del desplazador. Se forma de un cilindro de aluminio de 1 1/4" de largo, 1 1/2" de diámetro exterior la medida que queda entre el cilindro de la zona fría y este desplazador es equivalente a un ajuste deslizante del orden de 5 décimas (0,005") de pulgada.

Figura 57. **Pistón de potencia**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Dimensionamiento del cilindro del foco caliente

Se utilizó acero inoxidable AISI 1018. El cilindro está compuesto por un tubo de 5" de largo, 2" de diámetro exterior 1 7/8" de diámetro interior. Primero se rectificaron en forma basta los materiales, se hizo el desgaste interno de los mismos hasta obtener el espesor de 1/16" de pared.

Figura 58. **Cilindro del foco caliente A**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Vástago del desplazador

Se fabricó de una barra de aluminio diámetro 3/8"y 4" de largo. Se recomienda rectificar con pasos cortos y lentos ya que por la longitud y el grosor de este se tiende a flexionar ligeramente, lo que ocasiona que se forme una "barriga" en el medio, lo cual no es bueno porque no permite el paso del vástago a través del agujero del pistón. Una vez corroborado que las medidas en diferentes posiciones del eje son las mismas, recién se procede a hacer la rosca.

Figura 59. **Cilindro del foco caliente B**



Fuente: elaboración propia.

4.6. **Conectores**

Se fabricó de una barra de aluminio de 3/8" de diámetro. Se recomienda primero dejar toda la plancha a un rectángulo perfecto y trabajar con coordenadas en la fresa ya que eso nos da una mayor precisión en la distancia entre los agujeros.

Figura 60. **Conector de aluminio al final del vástago**



Fuente: elaboración propia.

4.7. Pines

Se hizo de acero trefilado, y hay que verificar que entren en las bocinas de las bielas una vez que estas ya estén colocadas en ellas. De igual manera, se debe verificar que no exista juego entre los pines y los conectores ya que esto se manifiesta en golpeteos durante el funcionamiento del motor.

4.8. Ejes

Se fabricaron de ejes de aluminio de 3/8" de diámetro. Se recomienda trabajar entre puntas (en el torno). Se le hicieron unos pequeños rebajes al eje en las zonas donde no están en contacto con los rodamientos para un ingreso más fácil del eje en estos.

Debido al funcionamiento del motor, se originaba el desplazamiento de los ejes de sus posiciones, lo cual generaba una mayor fricción del pistón con el cilindro, se recomienda colocar seguros de tal manera que se mantengan fijos en una posición.

Figura 61. Eje de aluminio



Fuente: elaboración propia.

4.9. Construcción de las partes del motor

En un proyecto de una máquina incluye otros muchos factores además de la determinación de las cargas y tensiones y la selección de materiales adecuados. Antes de que la construcción pueda comenzar, es necesario tener planos completos del conjunto y de los detalles de despiece, para ofrecer al personal de fabricación toda la información necesaria.

Usualmente el proyectista no hace los planos, pero regularmente es él quien se encarga de la supervisión de los dibujantes, es evidente que el plano debe hacerse de tal forma que tenga una interpretación unicamente.

En las dimensiones de un dibujo deben indicarse las tolerancias para limitar las variaciones admisibles en tamaño, porque es imposible fabricar una pieza exactamente con una dimensión dada. Aunque las tolerancias pequeñas dan trabajo de mejor calidad y mecanismos que funcionen mejor, el costo de fabricación crece rápidamente a medida que disminuyen las tolerancias como indica la curva característica de la figura 4.1. Por ello es importante que se den a las tolerancias los valores mayores que permitan las consideraciones de funcionamiento.

4.10. Diseño inicial del motor Stirling con mecanismo biela manivela

Este motor está basado en las medidas que se comprenden en el libro de James Rizzo *The Stirling Engine Manual*, las cuales se proponen en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Medidas de los componentes principales**

Parte del motor	Medida (pulgadas)	Material
Marco del Motor	3"X3"X3"	Alu minio
Cilindro de potencia	1 5/8" D.I. 1 1/2" D.E. 2 1/2" Longitud	Ac ero
Brida del cilindro de potencia	2 3/8" X 2 3/8"	Ac ero
Piston de potencia	1 1/2" D.I. 1 1/4" Longitud	Ac ero
Eslabon de potencia	3/8" de diámetro 2 3/4" longitud	Ac ero
Cilindro desplazador	2" D.E. 1 7/8" D.I. 5" longitud	Ac ero
Segunda brida para el cilindro desplazador	2 1/2" D.E. 2 1/2" longitud	Ac ero
Desplazador	1 13/16" D.E. 3 15/16" longitud	Alu minio
Eslabon del cilindro desplazador	3/8" de diámetro 2 3/4" longitud	Alu minio
Volante de inercia	5" diámetro 1/2" de espesor	Ac ero
Cigüeñal	3/4" diámetro 1/4" de espesor	Ac ero

Fuente: RIZZO, James. *The Stirling Engine Manual*. p. 104.

Figura 62. **Fotos del ensamble del motor Stirling con mecanismo biela manivela**



Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Ensamble final motor Stirling**



Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Motor acoplado al disco parabólico**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El diseño y la construcción del motor fue en un inicio la motivación principal del presente trabajo, concluyendo como se ve en las fotografías un motor Stirling tipo beta acoplado a un disco parabólico cóncavo. Cabe mencionar que el diseño y las medidas fueron tomadas de la obra de James Rizzo, con lo que se puede decir que este fue uno de los objetivos trazados y alcanzados.
2. La generación de energía mecánica está implícita con la idea de construir un motor y echarlo a andar con energía solar, pues bien ahora es seguro que no esta tan fácil como se muestra en los libros, ya que el prototipo no dio ningún resultado que hubiera sido posible medir y fue expuesto a la temperatura de la concentración solar que asciende a trescientos grados centígrados y a un soplete que alcanza una temperatura mucho mayo, y en ambos casos no se obtuvo un resultado satisfactorio, solo intentos fallidos. Por lo cual este apartado no fue cumplido como parte de los objetivos específicos.
3. La conversión de radiación solar a energía de alta temperatura se algo que se puede apreciar en las fotografías de los anexos, ya que esto básicamente es el reflejo que se logra con el espejo cóncavo, ya que puede concentrar una rayo solar a una temperatura de trescientos grados centígrados.

4. Como proyecto innovador es un buen primer intento de llevar la teoría a la práctica del motor Stirling y que servirá en futuras referencias ya que ha sido donado a la Escuela de Ingeniería Mecánica.
5. Las fugas se hicieron presentes también, y esto en un principio se supuso como la falta de potencia del mismo motor, ya que el cilindro de potencia quedo con mucha holgura por lo cual fue necesario fabricar un anillo de teflón que se adaptara al pistón y ajustara con el cilindro, esto permitió incrementar la compresión de una forma significativa.
6. Un problema importante de este prototipo es su lubricación, ya que por ser un motor que se concibe como hermético y su disposición geométrica no permite tener un acumulado de lubricante líquido, por lo que fue necesario agregar dos retenedores en el eslabón del pistón desplazador y el foco caliente para lograr una cámara para alojar lubricante semisólido con eso lograr el sello del sistema total, esta adaptación permitió que el movimiento fuera mucho más suave y se evitó la fricción.
7. Muchas de las mediciones experimentales no se llevaron a cabo, no se contó con recursos ilimitados, ni con mucha ayuda en cuanto a equipo de laboratorio y medición, la parte del maquinado fue una ayuda que se consiguió y por la cual se hizo posible fabricar este prototipo.

RECOMENDACIONES

En un proyecto tan interesante e importante como lo fue este, se desea que haya una mejora en el mismo, por lo tanto se recomienda a futuros estudiantes que tengan interés en el proyecto propuesto, lo siguiente:

1. Extender los estudios expuestos en este trabajo ya que al momento en que se incursionó sobre este campo la información es escasa, la bibliografía muchas veces está en otros idiomas y los materiales necesarios para realizar el proyecto son difíciles de conseguir.
2. Como parte de lo expuesto en el punto anterior se hace de conocimiento a todo aquel interesado en este tema, que se ha dejado la bibliografía utilizada en este trabajo de graduación en posesión de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y al proyecto físico a la Escuela de Ingeniería Mecánica, como parte de contribución al desarrollo de la Universidad de San Carlos de Guatemala y la educación superior.
3. La fricción puede reducirse considerablemente utilizando materiales más especializados como por ejemplo, bronce grafitado SAE 64 y acero inoxidable AISI 316, pero de la mano tiene que ir un proceso de maquinado muy preciso, de lo contrario si falla la geometría los materiales no cumplirán con su propósito y el gasto será en vano.
4. La eficiencia térmica en futuros prototipos y proyectos deberá ser medida ya que en este proyecto solo fue un mero factor como resultado de diseño. La eficiencia aumentará utilizando diferentes materiales como

mayor capacidad calorífica y utilizando el ciclo completo con regeneración.

5. El tema del maquinado y los ajustes mecánicos que se necesitan para la elaboración del proyecto, en cuanto a mano de obra no es difícil conseguir personas en las capacidades de realizar este trabajo, pero se considera que la forma más adecuada de hacer el maquinado es realizando piezas completas ya que se tuvo problemas de centrado en el pistón desplazador y el cilindro del foco caliente.

BIBLIOGRAFÍA

1. FINKELSTEIN, Theodor. *Air engines*. United Kingdom: Professional Engineering Publishing Limited, 2001. 45. p.
2. LEYENSETTER, A. *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. España: Reverté, 1974. 90 p.
3. MARTINI, William R. *Stirling engine design manual*. Hawaii: University Press of the Pacific, 2004. 67 p.
4. ORGAN, Allan J. *Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine*. United Kingdom: University of Cambridge, 1992. 89. p. 978-0521-13179-7.
5. Österreichisches Biographisches Lexikon und biographische. *Dokumentation Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*. Osterreich: Alle Rechte vorbehalten, 2015. 78. p. ISBN: 978-3-7001-3213-4.
6. RIZZO, James G. *Modelling Stirling and hot air engines*. England: Patrick Stephens, 1985. 129. p. 0-85059-736-6.
7. _____. *The Stirling engine manual*. 2000. Barrow Farm: Candem Miniature Steam Services, 1995. 183 p.

8. SENFT, James R. *An introducion to Stirling engines*. s.l.: Moriya Press, 2010. 90 p.
9. _____. *Mechanical efficiency of heat Engines*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 34 p.
10. SPOTTS, M. F. *Proyecto de elementos de máquinas*. España: Reverté, 1976. 145 p.
11. WYLEN, Van. *Fundamentos de termodinámica*. México: Limusa, 2000. 167 p.

ANEXOS

Fotos del maquinado del motor

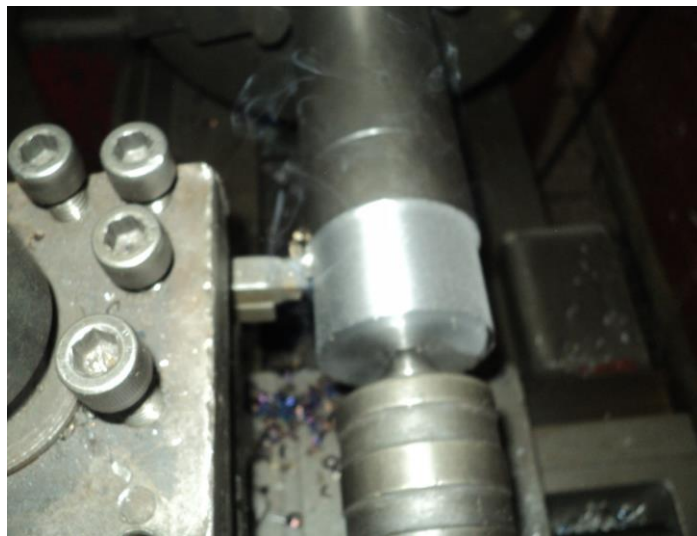
Como primera parte del maquinado, es la elaboración de bocetos y guías de trabajo, para la correcta elaboración de las pizas.



Se puede observar la calibración del eje de acero AISI 1018 para empezar el trabajo de maquinado.



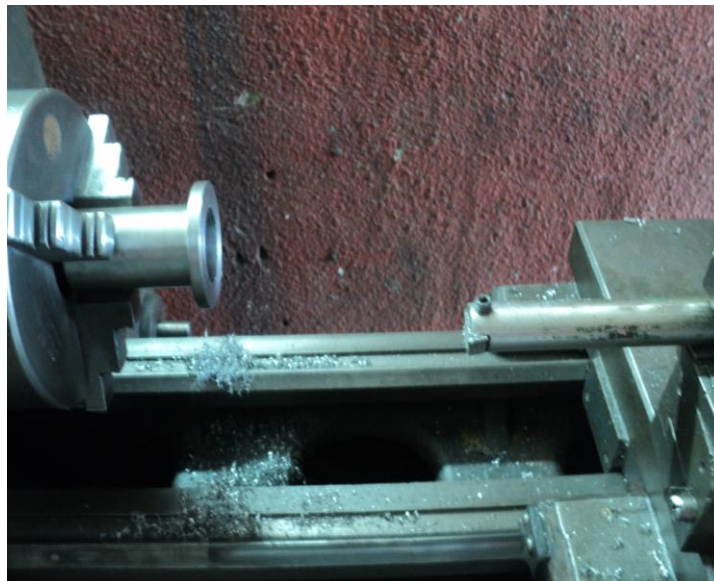
El maquinado de los ejes hasta que den la medida deseada.



El maquinado que se realiza con una broca para las paredes del cilindro, luego de eso se procede a afinar el interior para evitar fricción.



El maquinado interno se realiza con una extensión atornillada a un buril, esto permitió llegar hasta el fondo del cilindro para un buen acabado.



Herramientas de uso común en el trabajo de maquinado.



Refrentado del volante de inercia.



Aquí se puede ver las piezas del motor en su totalidad, ya que el mismo se encuentra desarmado.



El resultado, un motor Stirling tipo beta sin regenerador.



Otra imagen donde da el resultado final del despiece del motor Stirling.



La estructura metálica, se realizó con angulares y tubería cuadrada chapa 16, para obtener una buena resistencia, la precisión es necesaria en esta parte, por lo que todo ajuste fue realizado a mano.



La precisión lo es todo.



Construcción del marco final para la colocación del espejo parabólico.



Mecanismo de sujeción y giro para la rotación del espejo.



Vista final del montaje.



La vista desde el cilindro.



Fuente: Motor Stirling.

