



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

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
MOTOR TÉRMICO STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA
ELÉCTRICA**

Alex Danilo Leiva Cabrera

Asesorado por el Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

Guatemala, agosto de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
MOTOR TÉRMICO STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA
ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALEX DANILO LEIVA CABRERA

ASESORADO POR EL ING. MARIO RENATO ESCOBEDO MARTÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2018

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Veliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR TÉRMICO STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 12 de octubre de 2015.



Alex Danilo Leiva Cabrera

Guatemala, 21 de mayo de 2018

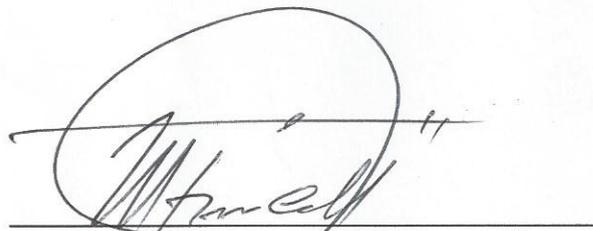
Ingeniero
Saul Cabezas Durán
Coordinador de área de potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado ingeniero:

Reciba un cordial saludo, la presente es haciendo de su conocimiento que he tenido a bien asesorar el trabajo de graduación titulado: **"ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR TÉRMICO STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA"** elaborado por el estudiante: **Alex Danilo Leiva Cabrera** con carné No. **2009 15035**. Encontrándolo satisfactorio, por lo que resuelvo dar mi aprobación al mismo, remitiéndole a la coordinación para el trámite pertinente.

Agradeciendo su atención

Atentamente:



Mario Renato Escobedo Martínez
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado No. 3635

ING. RENATO ESCOBEDO
MEC-ELECTRICO
COLEGIADO 3635



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 49. 2018.
31 DE JULIO 2018.

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE
CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR TÉRMICO
STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN
ENERGÍA ELÉCTRICA,** del estudiante; Alex Danilo Leiva
Cabrera, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Saúl Cabezas Durán
Coordinador de Potencia





REF. EIME 49. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen el Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: **ALEX DANILO LEIVA CABRERA** titulado: **ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR TÉRMICO STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 2 DE AGOSTO 2018.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

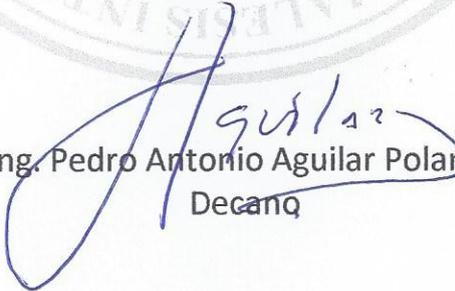


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 268.2018

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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOTOR TÉRMICO STIRLING PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **Alex Danilo Leiva Cabrera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, agosto de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

El dueño del universo y todo lo que en él habita; por guiarme siempre por el buen camino, con sabiduría, perseverancia y esfuerzo con plena confianza de que todo es posible cuando nos proponemos y hacemos la parte que nos toca, respetando a los demás y a nosotros mismos.

Mis padres

Samuel Leiva Carvajal y Neyda Cabrera Paiz de Leiva, quienes desde niño me instruyeron con buenos principios y valores enseñándome a trabajar y a esforzarme por lo que quiero y merezco, apoyándome en todo momento de manera incondicional y con paciencia, motivándome a seguir adelante a pesar de las adversidades. Gracias a ellos estoy aquí y ahora.

Mis hermanos

Ludin Josué, Elmer Aroldo y Karla Judith Leiva Cabrera, por estar allí siempre que los necesito; por apoyarme y darme ánimos para seguir adelante y alcanzar mis metas. Gracias por ser mis hermanos.

Amigos

A todos los que me apoyaron en el transcurso de los años vividos en la facultad; amigos que a pesar de no ser universitarios me brindaron su apoyo, sus conocimientos, sus experiencias y sus consejos para seguir adelante y alcanzar mis metas; gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por hacerme libre y guiarme por senderos de justicia, por librarme de tantos peligros y permitirme salir de tantas adversidades, sin Él no sería la persona que soy ahora.
- Mis padres** Samuel Leiva Carvajal Y Neyda Cabrera Paiz de Leiva, por apoyarme en todo momento a lo largo de mi vida y en mi carrera universitaria, animándome a terminar mis estudios y dándome el soporte necesario cuando más lo necesité.
- Mis hermanos** Ludin Josué, Elmer Aroldo y Karla Judith Leiva Cabrera, por no abandonarme en ningún momento sin negarme su apoyo cuando los necesito.
- Mi novia** Alice María Córdón Calderón, por aparecerse en el momento justo para apoyarme y animarme de manera incondicional a seguir adelante con mi trabajo de graduación.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por abrirme las puertas del conocimiento en esta vida y por formarme como profesional, haciéndome cumplir uno más de mis sueños.

**Ing. Mario Renato
Escobedo Martínez**

Por asesorarme a lo largo de esta investigación, brindándome su apoyo y conocimientos, basados en su experiencia profesional y personal, instruyéndome paso a paso hasta llegar a cumplir las condiciones de un trabajo profesional y bien elaborado que satisface los requerimientos para completar mi carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXVII
OBJETIVOS.....	XXIX
INTRODUCCIÓN.....	XXXI
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1. Ciclo Stirling ideal	2
1.1.1. Trabajo realizado por el ciclo ideal	6
1.1.2. Calor suministrado al ciclo.....	7
1.1.3. Eficiencia térmica del ciclo.....	8
1.2. Tipos de motores Stirling	10
1.2.1. Por el modelo de operación.....	11
1.2.1.1. Motor de simple efecto	11
1.2.1.2. Motor Stirling de doble efecto	12
1.2.1.3. Motor de una fase.....	14
1.2.1.4. Motor multi – fase n	15
1.2.1.5. Motor resonante.....	16
1.2.1.6. Motor no resonante.....	17
1.2.2. Por la forma de acoplamiento del cilindro.....	18
1.2.2.1. Motor tipo alfa	18
1.2.2.2. Motor tipo beta.....	20
1.2.2.3. Motor tipo gamma.....	21
1.2.3. Por la forma de acoplamiento del pistón.....	22

1.3.	Parámetros del funcionamiento de un motor Stirling.....	25
1.3.1.	Consecuencia del traspaso de calor en las fases de calentamiento y enfriamiento.....	26
1.3.2.	Consecuencia de la transferencia de calor en el regenerador.....	27
1.3.3.	Impacto de los espacios muertos	31
1.3.4.	Impacto del desplazamiento del émbolo o pistón	33
1.3.5.	Consecuencias que se combinan.....	34
1.3.6.	Conversión de energía y eficiencia efectiva de un motor Stirling	35
1.4.	Principios de radiación solar y concentradores parabólicos.....	37
1.4.1.	Radiación solar.....	39
1.4.2.	Colectores solares.....	41
1.4.2.1.	Razón de concentración (CR)	42
1.4.3.	Colectores concentradores.....	43
1.4.3.1.	Colectores cilíndrico-parabólicos.....	43
1.4.3.2.	Disco parabólico.....	45
1.4.3.3.	Helióstato	46
1.4.3.4.	Análisis térmico en el receptor	46
1.4.4.	Radiación incidente y temperatura en el foco.....	48
2.	TIPOS DE MOTORES STIRLING.....	49
2.1.	Generalidades.....	49
2.2.	Motor Stirling tipo alfa.....	49
2.2.1.	Motor Stirling tipo alfa para generación eléctrica solar	50
2.2.2.	Fases de funcionamiento	51
2.2.3.	Motor Stirling tipo beta	54
2.2.3.1.	Fases de funcionamiento	55

2.2.4.	Motor Stirling tipo gama	58
3.	PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE CONSTRUCCIÓN	61
3.1.	Planteamiento de alternativas	61
3.1.1.	Alternativa 1: motor tipo alfa	61
3.1.1.1.	Características del motor tipo alfa	62
3.1.1.2.	Ventajas del motor tipo alfa	63
3.1.1.3.	Desventajas del motor tipo alfa.....	64
3.1.2.	Alternativa 2: motor tipo beta	65
3.1.2.1.	Características del motor tipo beta	65
3.1.2.2.	Ventajas del motor tipo beta	67
3.1.2.3.	Desventajas del motor tipo beta	68
3.1.3.	Alternativa 3: motor tipo gamma	69
3.1.3.1.	Características del motor tipo gamma.....	70
3.1.3.2.	Ventajas del motor tipo gamma	71
3.1.3.3.	Desventajas del motor tipo gamma	72
3.2.	Selección de alternativa.....	73
3.2.1.	Motor	76
3.2.2.	Generador.....	85
3.2.3.	Banco de pruebas.....	88
4.	DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL TIPO DE MOTOR SELECCIONADO	91
4.1.1.	Análisis en el foco frío.....	93
4.1.1.1.	Cilindro de presión.....	93
4.1.1.2.	Pistón, 1.....	95
4.1.2.	Análisis en el foco caliente	95

	4.1.2.1.	Cilindro de presión	96
	4.1.2.2.	Pistón, 2	96
	4.1.3.	Dimensionamiento de tubería de conexión entre foco frío y foco caliente	96
	4.1.4.	Diseño del volante de inercia	99
4.2.		Construcción del motor Stirling tipo alfa	100
	4.2.1.	Cilindro de presión para el foco caliente	101
	4.2.2.	Cilindro de presión para el foco frío.....	102
	4.2.3.	Pistón, 3	102
	4.2.4.	Anillos elásticos de teflón	103
	4.2.5.	Eje	104
	4.2.6.	Buje de biela.....	105
	4.2.7.	Buje para el soporte del cigüeñal	106
	4.2.8.	volante de inercia	107
	4.2.9.	Biela	108
	4.2.10.	Soporte para el cigüeñal.....	109
	4.2.11.	Soporte superior (foco caliente)	110
	4.2.12.	Conexión entre los focos caliente y frío.....	111
	4.2.13.	Ensamble del motor Stirling del tipo seleccionado	112
4.3.		Pruebas y modificaciones del motor Stirling del tipo seleccionado	114
5.		DIMENSIONAMIENTO, DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL COLECTOR SOLAR PARABÓLICO.....	117
	5.1.	Diseño y dimensionamiento del colector solar parabólico.....	117
	5.2.	Diámetro requerido de la parábola del reflector	118
	5.3.	Diseño y dimensionamiento del soporte inferior.....	124
	5.4.	Construcción del colector solar parabólico.....	125
	5.5.	Construcción del soporte inferior giratorio.....	127

5.6.	Construcción del brazo telescópico	128
5.7.	Prueba de funcionamiento del colector solar parabólico	129
5.7.1.	Descripción de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico	130
5.7.2.	Resultados de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico	131
5.8.	Prueba de funcionamiento del sistema motor Stirling solar ...	133
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	137
6.1.	Modelo propuesto	137
6.2.	Resultados y análisis	138
6.3.	Memoria de cálculo	141
6.4.	Cuantificación del prototipo de motor Stirling solar para le generación de energía eléctrica	149
	CONCLUSIONES	155
	RECOMENDACIONES	157
	BIBLIOGRAFÍA	159
	APÉNDICES	161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagramas P-V y T-S correspondientes al ciclo Stirling ideal.....	3
2.	Funcionamiento del ciclo Stirling ideal teórico.....	4
3.	Trasformación de energía en máquinas térmicas motrices y motrices térmicas	9
4.	Motor Stirling de simple efecto	12
5.	Configuración de cuatro cilindros con base en el principio de doble efecto	13
6.	Motor Stirling de doble efecto y cuatro cilindros	14
7.	Esquema motor multi – fase n (Fluydane).....	16
8.	Esquema del motor resonante	17
9.	Esquema de acople tipo biela – manivela de un motor no resonante ..	18
10.	Configuración tipo alfa.....	19
11.	Configuración tipo beta	20
12.	Configuración tipo gamma	21
13.	Esquema de acoplamiento mediante un gas	24
14.	Esquema de un motor Stirling acoplado mediante un líquido	25
15.	Rendimiento de la transmisión incompleta de calor	27
16.	Consecuencia de la influencia del regenerador	28
17.	Impacto de las fugas de fluido de trabajo.....	31
18.	Representación de espacios muertos en un motor Stirling	33
19.	Impacto del desplazamiento del émbolo	34
20.	Consecuencias de las desviaciones en la ejecución del ciclo ideal	35

21.	Diagrama de flujo para el análisis de potencia mecánica obtenible y utilizable en un motor Stirling	37
22.	Concentrador solar parabólico	38
23.	Distribución de la radiación solar	38
24.	Mapa de radiación directa del sol en Guatemala	40
25.	Colector solar estacionario	41
26.	Colector concentrador.....	42
27.	Colector solar tipo PTC.....	44
28.	Colector parabólico	45
29.	Colectores tipo helióstato.....	46
30.	Colector y receptores.....	47
31.	Receptores adecuados para uso en el colector	47
32.	Diagrama del motor tipo alfa.....	50
33.	Stirling technology Solo Kleinmotoren	51
34.	Fase de expansión al motor Stirling tipo alfa	52
35.	Fase de transferencia del motor Stirling tipo alfa A.....	52
36.	Fase de contracción del motor Stirling tipo alfa	53
37.	Fase de transferencia al motor Stirling tipo alfa B.....	54
38.	Diagrama del motor Stirling tipo beta.....	55
39.	Fase de expansión al motor Stirling tipo beta	56
40.	Fase de transferencia al motor Stirling tipo beta.....	56
41.	Fase de contracción al motor Stirling tipo beta A.....	57
42.	Fase de transferencia del motor Stirling tipo beta B	58
43.	Diagrama del motor tipo gamma.....	59
44.	Configuración de la alternativa motor alfa.....	62
45.	Configuración de la alternativa motor beta	65
46.	Configuración de la alternativa motor gamma	69
47.	Componentes principales de un prototipo de motor Stirling tipo alfa	75
48.	Módulos del motor tipo alfa.....	76

49.	Tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales	78
50.	Módulo de transferencia de calor	82
51.	Módulo de acoplamiento	82
52.	Generador	85
53.	Selección del generador de imanes permanentes	86
54.	Selección del mecanismo de transmisión de potencia	87
55.	Banco de pruebas	89
56.	Diseño y dimensionamiento del motor Stirling tipo alfa	91
57.	Esquema de presión y esfuerzo en el cilindro	93
58.	Tubería de conexión entre foco frío y foco caliente	97
59.	Esquema típico de un cigüeñal y sus partes	99
60.	Volante de inercia	100
61.	Diseño de cilindro de presión para el foco caliente	101
62.	Diseño de disipador de calor para cilindros de presión	102
63.	Diseño de pistón	103
64.	Anillos elásticos de teflón	104
65.	Eje para soporte de componentes del motor	105
66.	Buje para biela	105
67.	Buje para soporte de cigüeñal	106
68.	Cigüeñal	107
69.	Volante de inercia	108
70.	Esquema general de una biela	109
71.	Esquema de soporte para cigüeñal	110
72.	Soporte superior	111
73.	Interconexión de los focos frío y caliente	112
74.	Mapa de radiación directa del sol en Guatemala	119
75.	Esquema de soporte inferior	125
76.	Comportamiento de la temperatura en el foco caliente vs tiempo	133
77.	Sistema motor Stirling solar	134

78.	Ejemplo de diseño de un prototipo de un sistema de motor solar Stirling para la generación de energía eléctrica	135
79.	Ficha técnica de un generador de imanes permanentes	146

TABLAS

I.	Ecuaciones para calcular el trabajo realizado por el ciclo ideal	6
II.	Ecuaciones para calcular el calor suministrado al ciclo	7
III.	Eficiencia térmica del ciclo	8
IV.	Configuración de cilindros con base en el principio de doble efecto	13
V.	Tipo de acoplamiento rígido	22
VI.	Ecuaciones para calcular la eficiencia global de un motor Stirling	29
VII.	Potencia y eficiencia resultante de un proceso de conversión de potencia térmica eléctrica en potencia mecánica disponible	36
VIII.	Ventajas y desventajas de los colectores concentradores	43
IX.	Componentes que constituyen el prototipo	74
X.	Selección de material para cilindros	79
XI.	Selección de material para embolo	80
XII.	Selección de material para sello cilindro – embolo	81
XIII.	Selección de material para biela	83
XIV.	Selección de material para manivela	83
XV.	Selección apoyos	84
XVI.	Selección de la masa del volante de inercia	84
XVII.	Selección del generador de imanes permanentes	86
XVIII.	Selección del mecanismo de transmisión de potencia	87
XIX.	Resumen de las características de construcción para el diseño de los elementos del sistema de generación Stirling tipo alfa	92
XX.	Ecuación de análisis estático para un cilindro a compresión	94

XXI.	Ecuación para el cálculo de pérdida de presión en la tubería de conexión del foco frío con el foco caliente.....	97
XXII.	Acople de un motor Stirling tipo alfa.....	113
XXIII.	Prueba de funcionamiento del motor Stirling.....	114
XXIV.	Problemas y causas comunes de inmovilidad del motor Stirling y sus posibles soluciones.....	115
XXV.	Ecuación de radiación directa instantánea del sol	120
XXVI.	Ecuaciones de la radiación que se refleja, valor del calor captado y el diámetro de la parábola.....	121
XXVII.	Ecuación para calcular el calor que absorbe el foco caliente.....	122
XXVIII.	Cálculo del diámetro de la parábola	123
XXIX.	Ecuación de una parábola.....	123
XXX.	Descripción de construcción de un reflector solar parabólico	126
XXXI.	Montaje y puesta en funcionamiento del soporte inferior	127
XXXII.	Pasos para la construcción del brazo telescópico.....	129
XXXIII.	Procedimiento para el desarrollo de la prueba de funcionamiento a un colector solar parabólico	131
XXXIV.	Registro de valores de temperatura acorde a intervalos definidos de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico.....	132
XXXV.	Proceso para comprobar el funcionamiento del sistema motor Stirling solar	134
XXXVI.	Elementos, características de construcción y desempeño de un sistema de motor Stirling solar tipo alfa.....	139
XXXVII.	Variables principales de un sistema de motor térmico solar Stirling acoplado a un colector solar para la generación de energía eléctrica.....	140
XXXVIII.	Resultado de variables principales de un sistema de motor térmico solar Stirling acoplado a un colector solar para la generación de energía eléctrica.....	148

XXXIX. Presupuesto general para la construcción de prototipo de motor solar Stirling151

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_p	Calor específico a presión constante, KJ/kg · K
C_v	Calor específico a volumen constante, KJ/kg · K
Q	Calor transferido, KJ
C_m	Centímetros
R	Constante del gas, KJ/kg · K
ρ	Densidad, kg/m ³
\emptyset	Diámetro, mm
α	Dilatación térmica, °C-1
d	Distancia o distancia de un arco de circunferencia, mm
u	Energía interna específica, KJ/kg
η	Eficiencia
ε	Efectividad del regenerador
S	Entropía, KJ/K
σ	Esfuerzo, MPa
e	Espesor, mm
$^{\circ}$	Grado sexagesimal
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
m	Masa, kg
mm	Milímetros
Δp	Pérdida de presión, MPa
P	Presión, KPa.
Plg	Pulgada

k	Relación de calores específicos, C_p/C_v
z	Relación de temperaturas, T_L / T_H
V r	Relación de volúmenes, $V_{m\acute{a}x} / V_{m\acute{i}n}$
w	Trabajo por unidad de masa, KJ/kg
W	Trabajo total, KJ
q	Transferencia de calor por unidad de masa, KJ/kg
T	Temperatura, C o K
T_H	Temperatura de cuerpo a alta temperatura, K
T_L	Temperatura de cuerpo a baja temperatura, K
μ	Viscosidad, kg/ms
v	Volumen específico, m^3/kg
V_{máx}	Volumen máximo, m^3
V_{mín}	Volumen mínimo, m^3
V	Volumen total, m^3

GLOSARIO

Acero	Aleación de hierro cuya composición en carbono se sitúa entre el 3 % y el 8 %.
Abrazadera	Chapa, anillo o argolla de metal u otra materia, que se coloca para unir o afianzar una cosa con otra.
Absortividad	Mide la cantidad de la luz absorbida por una superficie, definida como la unidad de absorbancia por unidad de concentración por unidad de longitud de la trayectoria de la luz.
Acoplamiento	Elemento empleado para unir ejes y árboles de transmisión.
Acción	Acto de llevar a cabo algo; desgaste de energía que produce unos resultados.
Aislante térmico	Material que no deja pasar el calor.
Altitud	Distancia vertical de un objeto o punto determinado en el espacio y la superficie del nivel del mar, terrestre u otro punto tomado como referencia.
Amortiguar	Reducir la viveza o intensidad de algo. Por ejemplo, de un movimiento.

Alternativo	Algo que se hace o sucede con alternancia.
Articular	Conectar dos o más elementos de una manera que les permita moverse con cierta libertad.
Armónico	Componente de una señal periódica en el dominio del tiempo, cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental de dicha señal periódica.
Azimut	Ángulo de la orientación sobre la superficie de una esfera.
Balancear	Poner en equilibrio o igualar una cosa con otra.
Biomasa	Materia orgánica producida en procesos naturales procedente de restos de vegetación.
Biela	Elemento de una máquina que transforma el movimiento rectilíneo en movimiento de rotación o viceversa.
Bombeo	Impulsar líquido por un orificio, por ejemplo, una manguera o un tubo.
Calor	Proceso por el cual se modifica o transfiere energía de un medio a otro. Transmite la energía desde un cuerpo caliente a otro más frío.

Calentador	Dispositivo termodinámico que utiliza energía para elevar la temperatura de un material, un gas o un líquido.
Cámara	Espacio creado a partir de un material impermeable destinado para mantener en su interior aire o un gas a presión.
Centro de gravedad	Punto de aplicación del peso de un cuerpo.
Chaveta	Clavo hendido en casi toda su longitud, que, introducido por el agujero de un hierro, se remacha separando las dos mitades de su punta. Se utiliza para que no puedan desprenderse o desacoplarse las piezas que están montadas en un eje principal o para que se aseguren entre sí, por ejemplo, engranajes o poleas.
Cigüeñal	Elemento de máquinas motrices compuesto de un eje y varios codos, en los que se ajusta una biela la cual transforma el movimiento rectilíneo de los pistones en movimiento rotacional o viceversa.
Circuito eléctrico	Conjunto de elementos conectados entre sí por los que circula una corriente eléctrica.
Colector solar	Dispositivo diseñado para captar la energía de radiación del sol y la convierte en energía térmica.

Compresión	Esfuerzo que aparece cuando una fuerza trata de comprimir un cuerpo o un gas.
Concentrar	Acumular en un mismo punto mucha cantidad de algo, por ejemplo, calor o fuerza
Conductividad térmica	Propiedad de ciertos materiales de transmitir el calor.
Coordinar	Hacer que dos o más elementos coincidan y se complementen unos a otros para generar un conjunto o resultado armonioso.
Corriente alterna	Tipo de corriente en el que las cargas cambian de sentido en la dirección en la que se mueven. También cambia la intensidad de corriente según una gráfica senoidal.
Corriente continua	Tipo de corriente en la que las cargas se dirigen siempre en el mismo sentido y con la misma intensidad.
Desviación	Cambio de trayecto. Diferencia entre un valor observado y otro calculado.
Difuso	Carece de precisión y claridad, generalmente, por estar muy distanciado o por ser muy prolongado.
Dilatar	Hacer que algo ocupe más lugar, volumen o tiempo; hacer más grande o más largo.

Dinámico	Que implica o produce movimiento o cambio.
Dinamo	Generador eléctrico formado por una bobina de cable de cobre barnizado arrollada en un núcleo de hierro dulce (no de acero) que gira dentro de un campo magnético producido por un imán situado alrededor de ella y que cuando gira transforma la energía cinética que recibe en energía eléctrica continua.
Disipar	Esparcir o extender en varias direcciones una sustancia.
Eficacia	Posibilita realizar un trabajo. Capacidad de lograr aquello que se pretende.
Eficiencia	Capacidad de hacer un trabajo minimizando el consumo de recursos. Relación entre la cantidad de trabajo realizado o la energía generada por una máquina y la energía suministrada.
Energía	Capacidad de un cuerpo de emitir energía mediante radiación. Relación o cociente entre la energía radiada por un cuerpo y la energía radiada por un cuerpo negro a la misma temperatura.
Enfriador tubular	Se compone de tubos cilíndricos dispuestos de forma rectilínea o en forma de U; son empleados

para el enfriamiento de fluidos en sistemas que requieren o se exponen a cambios de temperatura.

Émbolo	Pieza móvil que se encuentra dentro del cuerpo de un cilindro y que al moverse alternativamente cambia la presión de un fluido, generalmente, con el objetivo de desplazarlo.
Esfuerzo	Empleo de la fuerza física necesaria para hacer o generar un movimiento.
Estanqueidad	Condición de cero presencias de fugas en un circuito de tuberías, un depósito cerrado o una máquina que trabaja bajo compresión, etc. Grosor determinado de un material normalmente plano.
Espesor	Proceso y resultado de expandir, dilatarse, ensancharse, ocupar más espacio o aumentar en tamaño o volumen.
Expansión	Que no está centrado, tiene su eje de rotación fuera de su centro.
Excéntrico	Fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre otra o que se opone al inicio del movimiento.

Fricción foco	Punto desde el cual parten los rayos caloríficos o luminosos en una superficie cóncava con forma de parábola.
Fuga	Pérdida de un fluido líquido o gaseoso a través de un orificio, grieta o abertura que puede ser a partir de un accidente o por desgaste y pérdida de las propiedades del material.
Grafito	Mineral de color negro agrisado, lustre metálico, graso al tacto, textura compacta y compuesto casi exclusivamente de carbono.
Generador eléctrico	Mecanismo capaz de transformar en electricidad otro tipo de energía; por ejemplo: mecánica, química, lumínica, térmica, entre otros.
Geometría	Propiedades espaciales de un cuerpo.
Hermético	Impenetrable, principalmente, bajo la eliminación de oxígeno.
Holgura	Espacio suficiente para meter dentro algo. Anchura apropiada. La intersección de dos líneas, planos o cuerpos.
Incidencia	Inherente, propio o esencial de una cosa. Inseparable de la cosa en sí.

Intrínseco	Se dice de un proceso termodinámico en el que se mantiene un volumen constante.
Isocórico	Se dice de un proceso termodinámico en el que se mantiene una temperatura constante.
Isotérmico lámpara	Dispositivo que convierte la energía eléctrica en luminosa al pasar la corriente por ella.
Máquina térmica	Dispositivo cuyo propósito es convertir la energía proporcionada por un gas en energía mecánica.
Material	Materia preparada y disponible para elaborar directamente cualquier producto.
Mecanizar	Hacer pasar por un proceso de elaboración mecánica; esto es, a través del uso de máquinas y herramientas: torno, fresadora, cepillo, rectificadora, entre otros.
Microcogeneración	Utilización de la cogeneración por parte de los consumidores finales de la energía, normalmente, en rangos menores a 50 KW.
Oscilar	Desplazarse alternadamente en un sentido o en el opuesto, tal como un péndulo o como una embarcación movida por las olas.

Parábola	Curva descrita por el conjunto de puntos que equidistan de una recta (eje o directriz) y un punto fijo llamado foco.
Parámetro	Constante o variable cuyos valores numéricos determinan diferentes casos de la operación de un elemento o un sistema.
Pandeo	Deformación de una estructura o un material en sentido transversal a la fuerza de compresión ejercida.
Pletina	Pieza metálica con forma rectangular plana y de poco espesor.
Potencia	Cantidad de trabajo que se realiza en la unidad de tiempo.
Polo	Punto de la superficie de un cuerpo en rotación intersectado por el eje de esta.
Presión	Fuerza ejercida por unidad de superficie.
Radiación	Energía ondulatoria que se propaga a través del espacio.
Resistencia mecánica	Resistencia que presenta un cuerpo ante fuerzas externas.

Resonancia	Fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico de dicho cuerpo. En estas circunstancias, el cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza.
Reflectivo	Que devuelve la imagen, la luz, el sonido, el calor, reflejándolos o reflectándolos.
Regenerador térmico	Consta de un medio poroso con propiedades de conductividad térmica despreciables, que contiene un fluido. Generalmente, es la división entre dos procesos a temperatura variable.
Rígido rozar	Que no se puede torcer o doblar, no admite cambios ni se adapta a ellos.
Tangencia	Apenas tocar en movimiento un borde de un cuerpo físico a otro.
Trabajo	Cualidad de tocarse o situación de estar en contacto sin atravesarse o cortarse, especialmente dos superficies o líneas.

Trabar	Forma de modificar o transferir energía de un medio a otro. Parar, suspender o interrumpir la marcha de un proceso.
Transferencia	Variación de energía interna que puede aumentar o disminuir según sea el tipo de transferencia que se realice.
Tubería	Elemento de transporte por el que circula un fluido.
Tuerca	Pieza que dispone de una rosca interior para acoplarse a un tornillo y fijar una junta o unión de dos piezas.
Volumen	Cantidad de espacio tridimensional que ocupa un objeto o un fluido.
Volante	Elemento con forma de rueda y con cierta masa, que en motores y elementos móviles mantiene el momento de inercia para que el movimiento sea continuo en los instantes en que no se aplica fuerza o incluso para mantener el movimiento una vez dejada de aplicar la fuerza.
Viruta	Lámina delgada, a menudo en espiral, que se desprende de un metal en proceso de mecanizado.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se estudia y analiza el funcionamiento de los motores Stirling para proponer un diseño de construcción de un motor Stirling solar para la generación de energía eléctrica.

En el primer capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos para comprender el ciclo termodinámico Stirling ideal; luego, se muestran las técnicas de acoplamiento de los elementos utilizados en su construcción. Se hace un análisis de los parámetros que en la práctica afectan al ciclo ideal, se establecen criterios y una formulación para predecir resultados a obtener en un ciclo real. Al final del capítulo se desarrolla una explicación sobre la energía solar y los aparatos existentes para su colección y utilización.

En el segundo capítulo se exponen y estudian las generalidades de los motores Stirling y los tipos de configuración que existen; se explican sus fases de funcionamiento.

En los capítulos tres y cuatro se presentan las alternativas para la selección del diseño de construcción, basado en las características de funcionamiento de cada configuración de motor Stirling, así como, en el análisis y descripción de las ventajas y desventajas de construcción. Finalmente, se selecciona el tipo de configuración y se procede con el diseño de construcción para cada elemento requerido en su montaje e instalación; así mismo, se describe una serie de pruebas a realizar para verificar el correcto funcionamiento.

El quinto capítulo explica el proceso de dimensionamiento y diseño de construcción para un colector solar parabólico; plantea una serie de pruebas de funcionamiento del colector acoplado con el sistema motor Stirling solar.

Finalmente, en el capítulo seis se desarrolla un ejemplo de diseño de los componentes principales de un motor Stirling tipo alfa acoplado a un colector solar para la generación de energía eléctrica; se elabora un resumen de los resultados de la investigación para el modelo propuesto y se presentan las conclusiones y recomendaciones.

OBJETIVOS

General

Describir y enunciar el funcionamiento de los motores Stirling para elaborar un diseño de construcción de un prototipo para la conversión de energía solar en energía mecánica, aplicada para la generación de energía eléctrica.

Específicos

1. Demostrar numéricamente la conversión de energía solar térmica en energía mecánica y esta última a energía eléctrica de un sistema de motor Stirling acoplado a un concentrador solar parabólico.
2. Determinar y describir en detalle el funcionamiento y las variables críticas que intervienen en el diseño de un motor Stirling para comprender su principio de trabajo y evaluar la factibilidad de su construcción.
3. Estudiar la teoría sobre el aprovechamiento de la radiación solar por medio de concentradores de calor para determinar qué tipo de concentrador solar se puede acoplar fácilmente con un sistema de motor Stirling.
4. Describir y analizar los diferentes tipos de motores Stirling para entender su funcionamiento e identificar las diferencias de construcción y desempeño.

5. Elaborar y describir alternativas para la selección de un tipo de motor Stirling que indique sus ventajas y desventajas que identifique sus características de construcción y acoplamiento que permitan decidir cuál tipo de motor es el adecuado para el desarrollo del diseño de construcción del prototipo.
6. Plantear y describir el diseño de construcción de un modelo experimental de motor Stirling solar que genere 0,5 Kw de potencia eléctrica; además determinar si es factible su construcción con materiales que ofrecen los mercados locales.
7. Elaborar el diseño de construcción de un colector solar con dimensiones adecuadas que permitan adaptarlo con el motor y que facilite su acoplamiento con el soporte inferior que cumpla con el valor de concentración solar necesario para generar 0,5 Kw de potencia eléctrica.
8. Determinar la viabilidad de construcción del prototipo diseñado y elaborar un presupuesto de construcción que permita comparar con precios que se manejan a nivel internacional.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido a la alta demanda energética a nivel mundial y por los procesos de generación derivados del uso de combustibles fósiles o hidrocarburos durante los últimos 800 000 años; el contenido de CO₂ atmosférico preindustrial se mantuvo por debajo de las 280 partes por millón (ppm) pero ahora ha aumentado hasta la media global de 403,3 ppm registrada en 2016.

Lo anterior causa cambios en el clima a nivel mundial y trae consigo una ola de desastres naturales; así mismo, la destrucción ecológica que provocan la necesidad de investigar sobre el aprovechamiento y uso de las fuentes de energía limpia y renovable, como la energía solar. De acuerdo con la OMM (Organización Meteorológica Mundial), el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero alcanza un nuevo récord, el que se describe en el boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero, publicado el 30 de octubre de 2017.

Esta actividad ha provocado parte de ese aumento significativo que se aprecia en el calentamiento global en las últimas décadas (0,83 °C por encima de la temperatura media más caliente entre 1951 y 1980) y en el agujero de la capa de ozono que se forma cada año sobre la Antártida; comienza en agosto y alcanza su punto máximo en octubre. Normalmente, ha llegado a medir hasta 12 000 millones de kilómetros cuadrados; sin embargo, los investigadores creen que el agujero de ozono se ha reducido en más de 4 millones de kilómetros cuadrados gracias a la eliminación gradual de sustancias químicas dañinas durante los últimos 30 años.

Una de las aplicaciones de la energía solar es su conversión directa en fuerza motriz, por medio de sistemas termodinámicos en vez de fotoeléctricos.

Los motores Stirling forman parte de los llamados motores de combustión externa; son motores térmicos que disponen una fuente de calor exterior que impiden que la combustión se genere dentro del cilindro; funcionan mediante la expansión y contracción de un fluido de trabajo; con base en un diferencial térmico logran realizar trabajo mecánico. La tecnología de los motores Stirling trae muchas ventajas medio ambientales en comparación con los motores de combustión interna: alta eficiencia, bajo nivel de ruidos y emisiones tóxicas. Estas ventajas ayudan a evitar el incremento en la destrucción de la capa de ozono y la destrucción ecológica, ya que este motor no presenta emisiones de gases ni derrame de combustibles.

La construcción de los motores Stirling es relativamente barata y su funcionamiento se logra con casi cualquier tipo de energía (solar, biocombustibles, geotérmica y otros).

Puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica; además es una tecnología sustentable que permite el aprovechamiento de las energías renovables dentro de las cuales la energía solar es la más abundante.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La máquina Stirling es aquel dispositivo que convierte calor en trabajo, o viceversa, a través de un ciclo termodinámico regenerativo, con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo, operando dicho fluido entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío, interactúan entre sí a partir de un circuito de tubería que los une generando un proceso termodinámico que actúa específicamente en el valor de la presión atmosférica en cada uno de los cilindros de acuerdo a la posición o fase del ciclo, generando entonces la expansión o compresión del fluido de trabajo.

A principios del siglo XIX la revolución industrial toma fuerza y el símbolo de esta etapa histórica era la máquina de vapor, sin embargo, éstas eran de gran tamaño y muy costosas, muy ineficientes y muy peligrosas, las calderas explotaban frecuentemente. A partir de estos sucesos se dio la necesidad de desarrollar motores simples, baratos de construir y al alcance de las pequeñas industrias, fue cuando el reverendo inglés Robert Stirling propuso la idea de un motor diferente y le dio por nombre motor de aire caliente porque solo usa aire como fluido de trabajo. Posteriormente, el uso de otros gases provocó que se buscaran otros nombres, como motor de gas caliente, o bien, motor Stirling, en honor a Robert Stirling, el cual obtuvo la patente de su invento en el año 1816.

La primera experiencia conocida del motor Stirling se remonta al año 1869 con un rudimentario artefacto que aprovecha la expansión de aire caliente para hacer girar un volante.

Durante la época de esplendor de las máquinas de vapor, las cuales constituían la fuerza motriz de la mayoría de industrias del siglo XIX, centenares de motores Stirling se utilizaban para el bombeo de agua y otras aplicaciones de menor potencia (0,1 – 4 W) como ventiladores.¹

Se consideraban seguros y silenciosos para estas aplicaciones, pero habían tenido más de un fracaso en las configuraciones de mayor potencia. Hasta 1940 se fabricaban en grandes cantidades.

El desarrollo de los motores de combustión interna a partir de la mitad del siglo XIX y la mejora experimentada en el refinamiento de los derivados del petróleo (gasolinas y gasóleos) colocó los motores alternativos al frente de los motores térmicos.

Este hecho, acompañado de la invención de los motores eléctricos, consiguió que, desde principios del siglo XX, la máquina de vapor y los motores Stirling fueran apartados de la carrera por la industrialización.

¹ Motor Stirling. *Historia*. <http://stirling.8m.net/historia.htm>. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

Sustituido definitivamente el motor Stirling en aplicaciones motrices y de bombeo hacia mediados del siglo XX aparece renovado interés de este dispositivo para nuevas aplicaciones. Refrigeración, calefacción y generación eléctrica a partir de fuentes de calor alternativas a los combustibles fósiles, son nuevos campos donde el motor Stirling puede ser competitivo respecto a otros sistemas.²

1.1. Ciclo Stirling ideal

El motor Stirling trabaja mediante un ciclo de expansión y posteriormente bajo compresión de un gas de trabajo, este puede ser: aire, helio, hidrogeno u otro.

El ciclo termodinámico se desarrolla a partir de dos procesos, isotérmicos (a temperatura constante) e isocóricos (a volumen constante):

- Calentamiento a alta temperatura

Se almacena un porcentaje del gas caliente en un elemento conocido como regenerador.

De tal manera que en este ciclo destaca el regenerador el cual se encarga de almacenar instantáneamente el calor.

- Enfriamiento a baja temperatura

El gas caliente se devuelve al sistema reduciendo la cantidad de energía desechada.

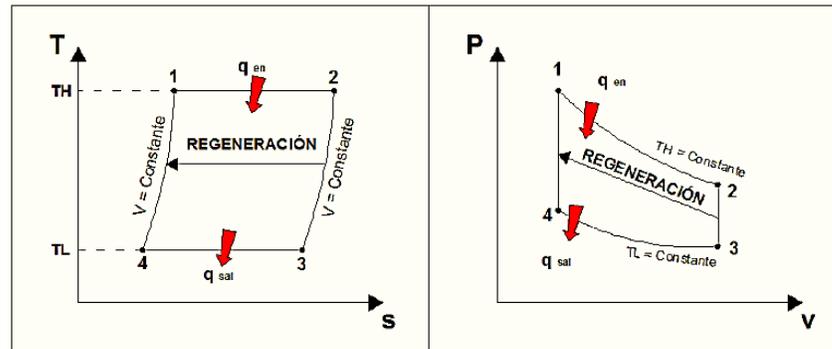
El regenerador es un elemento que puede ser: una malla de alambre, cerámica, o bien, un tapón poroso que tenga una alta capacidad térmica, es decir un alto valor de masa por calor específico; de esta manera se tiene una gran capacidad para absorber y entregar calor.³

El ciclo termodinámico Stirling ideal está compuesto de los procesos que se describen a continuación:

² Motor Stirling. *Categoría*. <https://jmirez.wordpress.com/category/motor-stirling/>. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

³ Motor Stirling. *Documentos*. <https://www.scribd.com/document/236172522/Motor-Stirling>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

Figura 1. Diagramas P-V y T-S correspondientes al ciclo Stirling ideal



Fuente: ALVAREZ FLÓRES, Jesús Andrés. *Máquinas térmicas motoras* – 1. p. 35.

- En el proceso número 1, se recibe calor a temperatura constante T_H ; logran una expansión isotérmica del fluido de trabajo, la cual se representa en los diagramas P-v y T-s de la figura 1, por el cambio de estado del punto 1 al 2.
- El proceso 2, es el de regeneración a volumen constante (de 2 a 3) en donde el fluido de trabajo transfiere internamente el calor al regenerador.
- En el proceso 3, se tiene una compresión a temperatura constante T_L (de 3 a 4), donde existe un rechazo de calor a un sumidero externo.
- El último proceso es la regeneración a volumen constante (de 4 a 1), donde se transfiere calor desde el regenerador al fluido de trabajo.

Los procesos del ciclo termodinámicos en la figura 2 se muestran mediante un sistema compuesto de un cilindro con dos émbolos a los lados y un regenerador en la parte central.

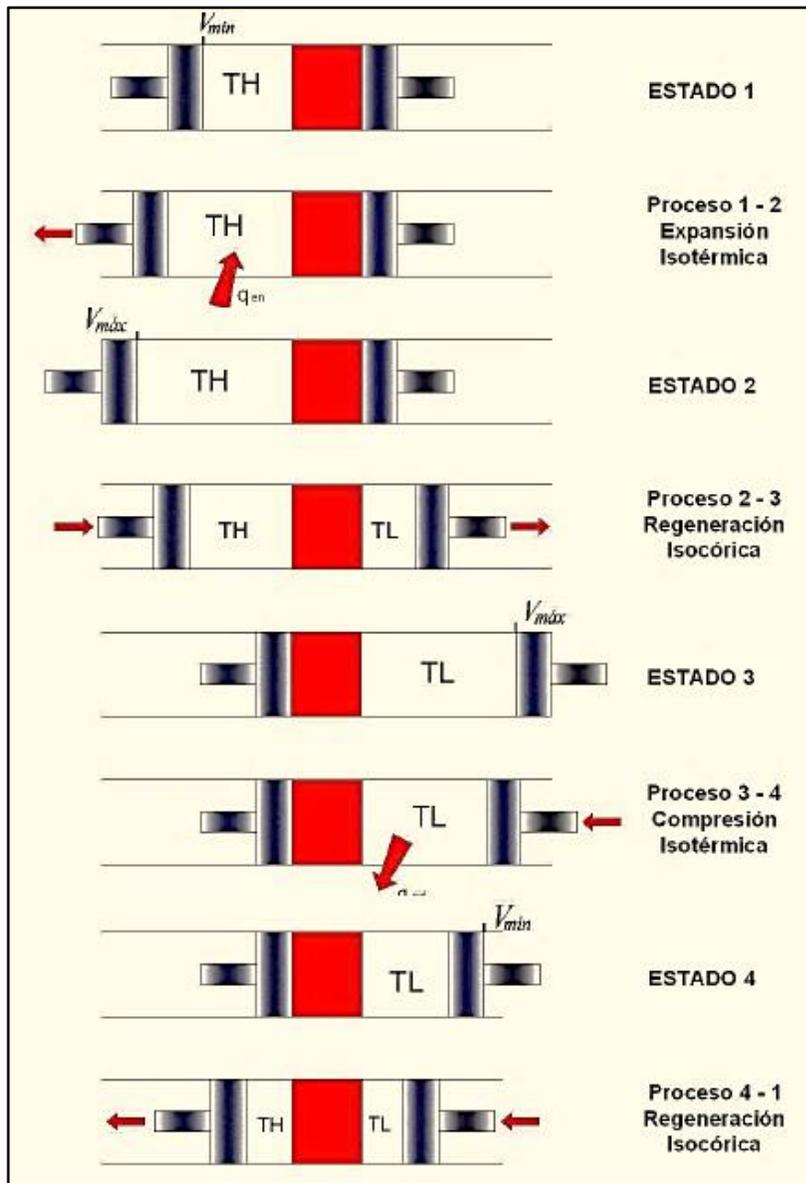
Inicialmente, el fluido de trabajo (aire) se encuentra en la cámara izquierda (zona caliente) la cual está a la temperatura T_H .

En el proceso 1 – 2 se recibe calor a alta temperatura T_H y se consigue la expansión del aire y el movimiento del émbolo de lado izquierdo y derecho hacia la derecha; mantiene constante el volumen por lo que se obliga al aire a pasar por el regenerador para enfriarse hasta la temperatura baja T_L y a ubicarse en la zona de enfriamiento.

En el proceso 3 – 4 se produce la entrega de calor al sumidero externo a baja temperatura T_L lo que da como resultado una compresión del volumen de aire y el movimiento hacia adentro del émbolo de la derecha.

Finalmente, en el proceso 4 – 1 se mueven los dos émbolos hacia el lado izquierdo con la misma velocidad, mantiene la temperatura constante y para obligar a pasar el aire a través del regenerador recuperando la energía antes almacenada e incrementando la temperatura del aire hasta T_H .⁴

Figura 2. **Funcionamiento del ciclo Stirling ideal teórico**



Fuente: ALVAREZ FLÓRES, Jesús Andrés. *Máquinas térmicas motoras* – 1. p. 38.

⁴ ALVAREZ FLÓRES, Jesús Andrés. *Máquinas térmicas motoras* – 1. p. 35.

Thombarea y Verma explican el ciclo atendiendo a esas figuras y comienzan estableciendo que la zona de compresión del fluido es la situada a la izquierda del regenerador (donde se encuentra el fluido al inicio) y la de expansión está situada a la derecha (donde se transfiere el fluido después de recalentarse).

El primer proceso (1-2) es una compresión isotérmica (a temperatura constante) en la que el pistón de compresión se separa del regenerador producto del aumento de la presión atmosférica debido al calor que entra, incrementa la capacidad del volumen encerrado, mientras el pistón de expansión se mantiene estático. La temperatura se mantiene constante y el flujo de calor se disipa en los alrededores porque existe una reserva a menor temperatura (la temperatura mínima, TL). La siguiente figura muestra la condición de los dos pistones y la capacidad de volumen que los dos encierran en el cilindro, justo antes de iniciar el proceso.

El segundo proceso (2-3) es una transferencia de calor del regenerador a volumen constante. En este proceso ambos pistones se mueven simultáneamente; es decir, el pistón de compresión se acerca más al regenerador y el de expansión se aleja, transfiriéndose así el fluido entre ambas zonas teniendo que pasar por el regenerador (que como se ha dicho actúa como una reserva calorífica) incrementando así la temperatura y la presión.

El tercer proceso (3-4) es una expansión isotérmica en la que el pistón de expansión se aproxima al regenerador y el de compresión se mantiene estático. La temperatura se mantiene constante al haber un flujo de calor desde una reserva a la temperatura del foco caliente y el interior del cilindro. De esta forma disminuye el volumen y disminuye la presión debido al calor que sale.

El último proceso (4-1) es una transferencia de calor al regenerador a volumen constante. Ambos pistones vuelven a moverse simultáneamente y el fluido de trabajo pasa por el regenerador transfiriendo así calor a este y reduciendo su temperatura hasta la del foco frío.

1.1.1. Trabajo realizado por el ciclo ideal

Para encontrar el trabajo realizado por el ciclo, es necesario analizar cada punto del diagrama P-v, donde se obtienen diferentes expresiones:

Tabla I. Ecuaciones para calcular el trabajo realizado por el ciclo ideal

Proceso 1 – 2: entrada de calor a temperatura constante	$w_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P * dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{R * T_H}{v} dv$ $w_{1-2} = R * T_H * \ln\left(\frac{v_{m\acute{a}x}}{v_{m\acute{i}n}}\right)$ $w_{2-3} = \int_{v_2}^{v_3} P * dv = 0$	<ul style="list-style-type: none"> • w = trabajo por unidad de masa, KJ/Kg. • W = trabajo total, KJ. • P = presión, KPa. • R= constante del gas, KJ/kg * °K.
Proceso 3 – 4: salida de calor a temperatura constante TL	$w_{3-4} = \int_{v_3}^{v_4} P * dv = \int_{v_3}^{v_4} \frac{R * T_L}{v} dv$ $w_{3-4} = R * T_L * \ln\left(\frac{v_{m\acute{i}n}}{v_{m\acute{a}x}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • v = volumen específico, m³/ Kg. • Vmáx = volumen máximo, m³. • Vmín = volumen mínimo, m³.
Proceso 4 – 1: regeneración a volumen constante	$w_{4-1} = \int_{v_4}^{v_1} P * dv = 0$	<ul style="list-style-type: none"> • TH = temperatura de cuerpo a alta temperatura, °K.
La suma de los trabajos en cada proceso es, entonces, el trabajo neto del motor	$W_{NETO} = R * (T_H - T_L) * \ln\left(\frac{v_{m\acute{a}x}}{v_{m\acute{i}n}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • TL = temperatura de cuerpo a baja temperatura, °K.

Fuente: elaboración propia.

1.1.2. Calor suministrado al ciclo

Para determinar el trabajo realizado por el ciclo, se analiza cada punto del diagrama P-v, donde se obtienen las siguientes expresiones: ecuaciones para calcular el calor suministrado al ciclo

Tabla II. Ecuaciones para calcular el calor suministrado al ciclo

Proceso 1 – 2: entrada de calor a temperatura constante TH	$dq = du + P * dv$ $q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} C_v * dT + \int_{v_1}^{v_2} P * dv$ $q_{1-2} = w_{1-2} = R * T_H * \ln\left(\frac{v_{m\acute{a}x}}{v_{m\acute{i}n}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • q = transferencia de calor por unidad de masa, KJ/Kg. • u = energía interna específica, KJ/Kg. • P = presión, KPa.
Proceso 2 – 3: acumulación de calor de regeneración a volumen constante	$dq = du + P * dv$ $q_{2-3} = \int_{T_2}^{T_3} C_v * dT = C_v * (T_L - T_H)$	<ul style="list-style-type: none"> • v = volumen específico, m³/ Kg.
Proceso 3 – 4: salida de calor a temperatura constante TL	$dq = du + P * dv$ $q_{3-4} = \int_{T_3}^{T_4} C_v * dT + \int_{v_3}^{v_4} P * dv$ $q_{3-4} = w_{3-4} = R * T_L * \ln\left(\frac{v_{m\acute{i}n}}{v_{m\acute{a}x}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • Cv = valor específico a volumen constante, KJ/Kg * °K. • T = temperatura, °C o °K. • Vmáx = volumen máximo, m³.
Proceso de 4 – 1: regeneración a volumen constante	$q_{4-1} = \int_{T_4}^{T_1} C_v * dT = C_v * (T_H - T_L)$	<ul style="list-style-type: none"> • Vmín = volumen mínimo, m³.
El calor que entra al sistema coincide con el del proceso 1 – 2: entonces de esta forma	$q_{entra} = R * T_H * \ln\left(\frac{v_{m\acute{a}x}}{v_{m\acute{i}n}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • TH = temperatura de cuerpo a alta temperatura, °K. • TL = temperatura de cuerpo a baja temperatura, °K. • R = constante del gas, KJ/kg * °K.

Fuente: elaboración propia.

1.1.3. Eficiencia térmica del ciclo

La eficiencia del ciclo es directamente proporcional al trabajo neto e inversamente proporcional al calor suministrado: eficiencia térmica del ciclo.

Tabla III. Eficiencia térmica del ciclo

<p>La eficiencia del ciclo es la relación entre el trabajo neto y el calor suministrado</p>	$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}}$ $\eta = \frac{R * (T_H - T_L) * \ln\left(\frac{v_{\text{máx}}}{v_{\text{mín}}}\right)}{R * T_H * \ln\left(\frac{v_{\text{máx}}}{v_{\text{mín}}}\right)}$	<ul style="list-style-type: none"> • η = eficiencia. • W= trabajo total, KJ. • Q = calor transferido, KJ. • R= constante del gas, KJ/kg * °K.
<p>Entonces, la eficiencia teórica se expresa así</p>	$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	<ul style="list-style-type: none"> • $v_{\text{máx}}$ = volumen máximo, m³. • $v_{\text{mín}}$ = volumen mínimo, m³. • T_H = temperatura de cuerpo a alta temperatura, °K. • T_L = temperatura de cuerpo a baja temperatura, °K.

Fuente: elaboración propia.

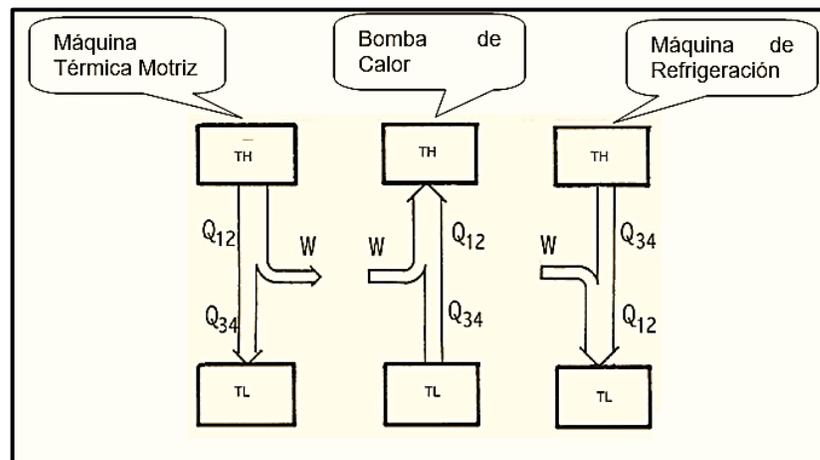
De acuerdo con el análisis de la eficiencia térmica del ciclo, y en términos generales, se puede afirmar que, en cualquier sistema en el que se entrega o genera un trabajo ($W < 0$), este corresponderá a una máquina térmica motriz, de acuerdo con el esquema que se muestra en la figura 3.

Pero, si en el sistema se requiere una fuente de trabajo ($W > 0$), para que funcione la máquina; entonces, se habla de un aparato de refrigeración o bomba de calor, como se indica en el esquema de la figura 3.

Una máquina térmica motriz aprovecha la energía de un fluido y la transforma en trabajo mecánico (W); por ejemplo, en una caldera, el vapor generado a partir del calentamiento del agua es aprovechado por una turbina para generar trabajo mecánico que podría emplearse para hacer trabajar un generador de electricidad.

Las máquinas de refrigeración o bombas de calor extraen o aportan temperatura, según sea el caso, ya sea para agregar frío o calor en un ambiente; por ejemplo, el aire acondicionado o la calefacción de un automóvil, a partir del aprovechamiento de extracción o adición de temperatura, permiten calentar o enfriar el interior del carro para brindar mayor comodidad a los pasajeros.

Figura 3. **Trasformación de energía en máquinas térmicas motrices y motrices térmicas**



Fuente: Universidad de Sevilla. *Departamento de Física Aplicada III.*

[http://laplace.us.es/wiki/index.php/M%C3%A1quinas_t%C3%A9rmicas_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/M%C3%A1quinas_t%C3%A9rmicas_(GIE)). Consulta: 10 de septiembre de 2017.

1.2. Tipos de motores Stirling

Desde la invención del motor Stirling en 1816, por el reverendo escocés Robert Stirling, este ha ido evolucionando gracias a la versatilidad de las fuentes de energía utilizables para su funcionamiento: la energía solar, todo tipo de combustible, uso de biomasa, energía geotérmica, entre otras.

Además, este es capaz de alcanzar un rendimiento muy cercano al máximo teórico conocido como rendimiento de Carnot, el cual indica que en cualquier ciclo termodinámico de un equipo o una máquina que trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de una fuente de mayor temperatura y cede un calor Q_2 a la fuente de menor temperatura genera un trabajo sobre el exterior del sistema. Por lo que; en lo que a rendimiento de motores térmicos se refiere es la opción óptima.

“El rendimiento teórico de Carnot indica que dos máquinas reversibles tienen el mismo rendimiento; este será independiente de la sustancia de trabajo de las máquinas, las propiedades o la forma como se realice el ciclo. Tan solo dependerá de las temperaturas de las fuentes entre las que trabaje”⁵.

Por tal razón, los fabricantes de motores Stirling han probado diferentes arreglos para este motor dando lugar a la aparición de nuevos modelos. En el presente trabajo se utilizarán tres niveles de clasificación e identificación:

- Por el modelo de operación
- Por la forma de acoplamiento del cilindro
- Por la forma de acoplamiento del pistón

⁵ *Ciclo de Carnot*. https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Carnot#Rendimiento. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

1.2.1. Por el modelo de operación

“Existen seis descripciones las que se pueden usar para identificar el modelo de operación del motor Stirling”⁶.

1.2.1.1. Motor de simple efecto

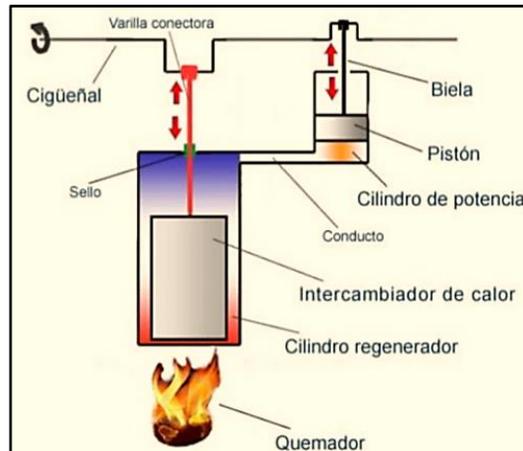
Es aquel motor que consta de una sola cámara para efectuar el ciclo de trabajo. El pistón en un motor de simple efecto trabaja como desplazador o como pistón de potencia, no puede realizar las dos funciones al mismo tiempo; esto se puede verificar en la figura 4.

En este tipo de motor se pueden configurar diferentes tipos de arreglos. Se pueden acoplar cilindros horizontalmente, verticalmente opuestos, paralelos y en forma de V.

Estos tipos de acoplamientos se analizan con mayor detalle en las secciones 1.2.2 y 1.2.3.

⁶ READER, Graham; HOOPER, Charles. *Stirling engines*. p. 162.

Figura 4. **Motor Stirling de simple efecto**



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingblogspot.blogspot.com>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

1.2.1.2. **Motor Stirling de doble efecto**

Coordina el trabajo de la parte superior e inferior del pistón de manera que la parte superior puede trabajar como pistón de potencia mientras que la parte inferior trabaja como desplazador o viceversa.

Cuando el pistón se mueve hacia su punto superior transporta el fluido hacia la siguiente cámara al tiempo que recibe el fluido de la cámara anterior. Este tipo de motores puede trabajar al mismo tiempo en más de un ciclo gracias al cigüeñal que coordina la acción de cada pistón.

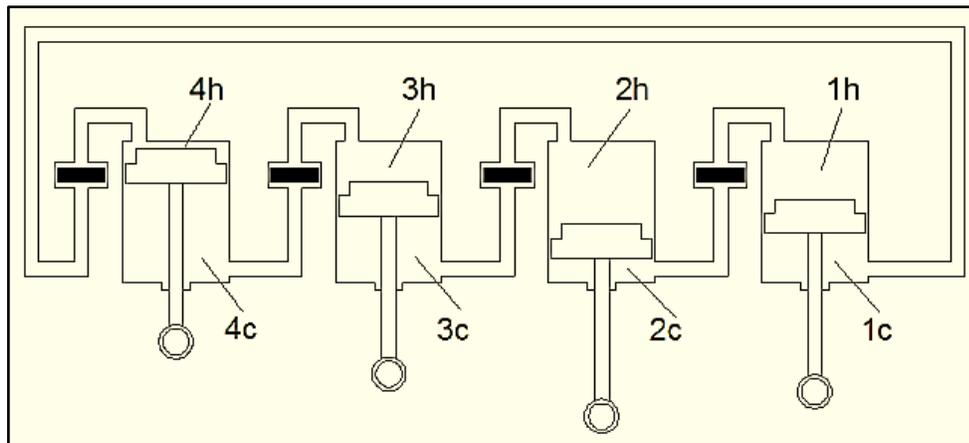
En las figuras 5 y 6 se muestra la configuración de cuatro cilindros, la que surge de la interconexión de varias unidades de simple efecto, coordinando los ciclos indicados en la tabla IV.

Tabla IV. **Configuración de cilindros con base en el principio de doble efecto**

# de cilindro	Coordinación de ciclos	
	caliente	frio
1	1h	2c
2	2h	3c
3	3h	4c
4	4h	1c

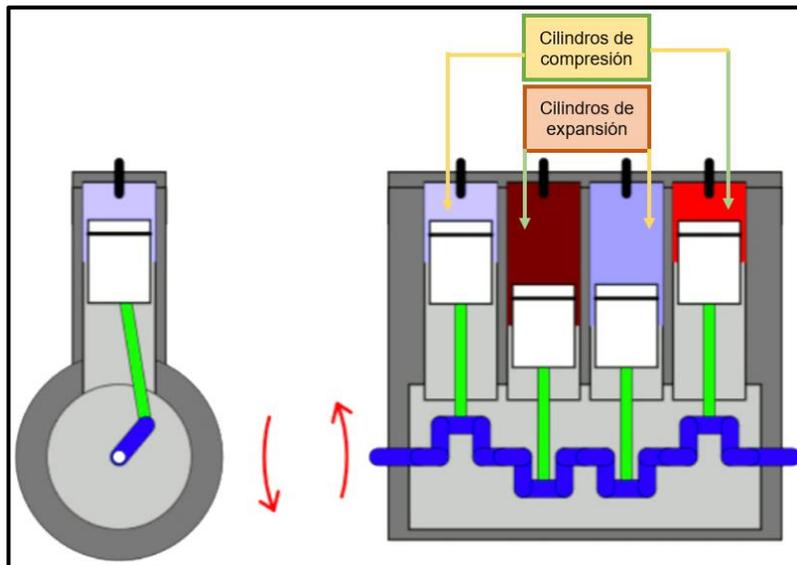
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Configuración de cuatro cilindros con base en el principio de doble efecto**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Motor Stirling de doble efecto y cuatro cilindros**



Fuente: *Cuaderno del ingeniero*. <https://cuadernodelingeniero.wordpress.com/page/2/>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

Los motores de doble efecto y de cuatro cilindros funcionan generando trabajo a partir del uso de ambos extremos del cilindro y las dos caras del pistón (pistones opuestos en un mismo ciclo) debido a la interconexión de los cilindros por medio de un eje de levas, que expanden el fluido de un lado y lo comprimen por el otro.

1.2.1.3. **Motor de una fase**

La terminología fase simple se refiere específicamente a la condición del fluido de trabajo. Mantienen las presiones internas a la presión de diseño, reduciendo los riesgos de explosión, extraen el calor al fluido de trabajo con respecto al punto más caliente y se transfiere a través del regenerador para

volver a repetir el ciclo. Este tipo de motor es el más común ya que utiliza solamente un fluido gaseoso para su funcionamiento.

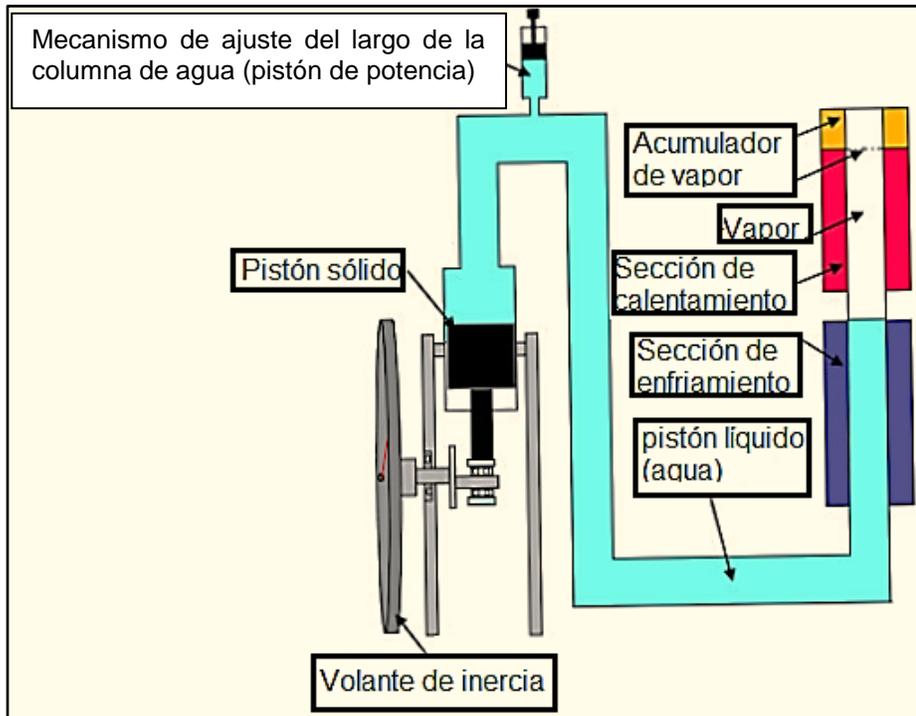
1.2.1.4. Motor multi – fase n

El desarrollo del motor Stirling tipo Fluydane basado en una columna de agua en lugar de un pistón de potencia ha permitido el obtener motores que aprovechan el cambio de fase del líquido para alcanzar mayores presiones.

En el motor Fluydane húmedo se evapora una considerable masa de líquido en la zona caliente que incrementa las variaciones de presión muy por encima de lo que se obtiene con un motor seco que utiliza solamente gas como fluido de trabajo, tal como se muestra en la figura 7.

De esta manera, en un motor multi – fase se puede obtener una relación de potencia por unidad de masa mayor que la que se obtiene con un modo de operación seco; sin embargo, se requiere una cantidad mayor de calor para evaporar el fluido, por lo tanto, su eficiencia es menor.

Figura 7. Esquema motor multi – fase n (Fluydane)



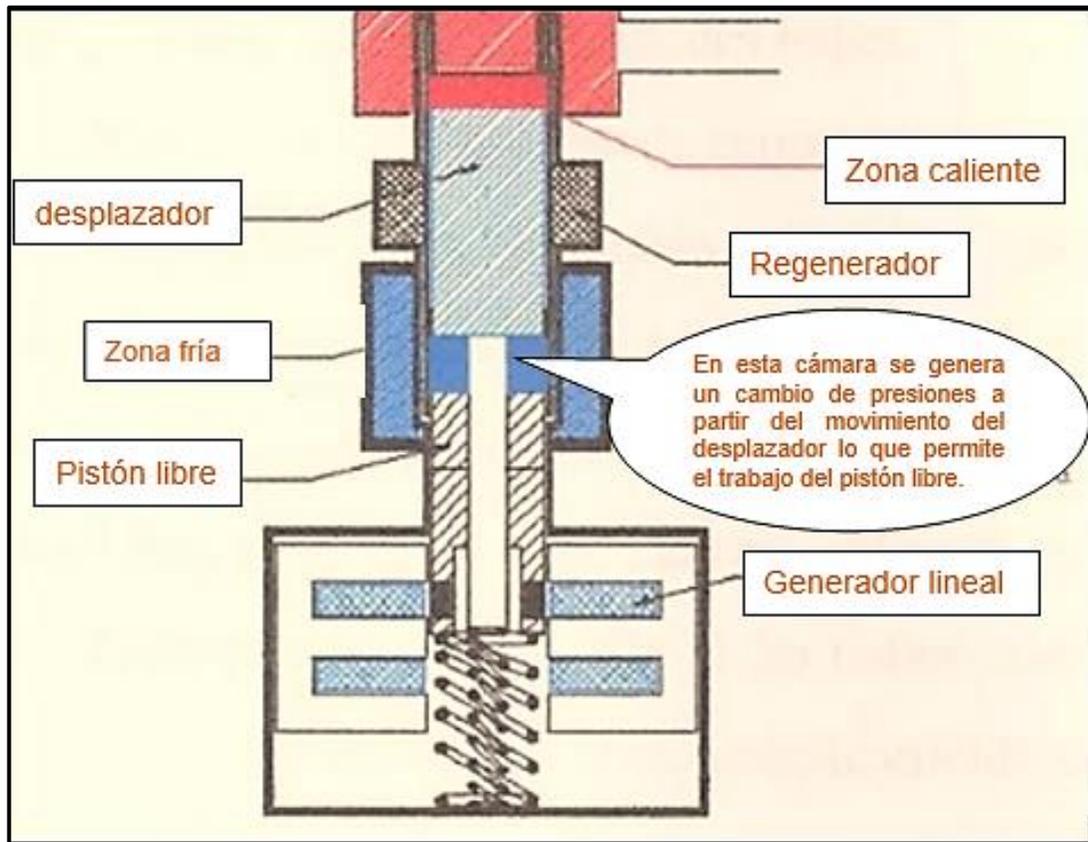
Fuente: elaboración propia.

1.2.1.5. Motor resonante

Un motor resonante no tiene una ley de movimiento preestablecida, trabaja a una frecuencia igual a la de resonancia del sistema de vibración del pistón libre (no está unido mecánicamente) que es afectado por la presión del fluido y por su propia inercia oscilante.

Es aplicado a tareas que no requieren potencia giratoria, funciona linealmente, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Esquema del motor resonante

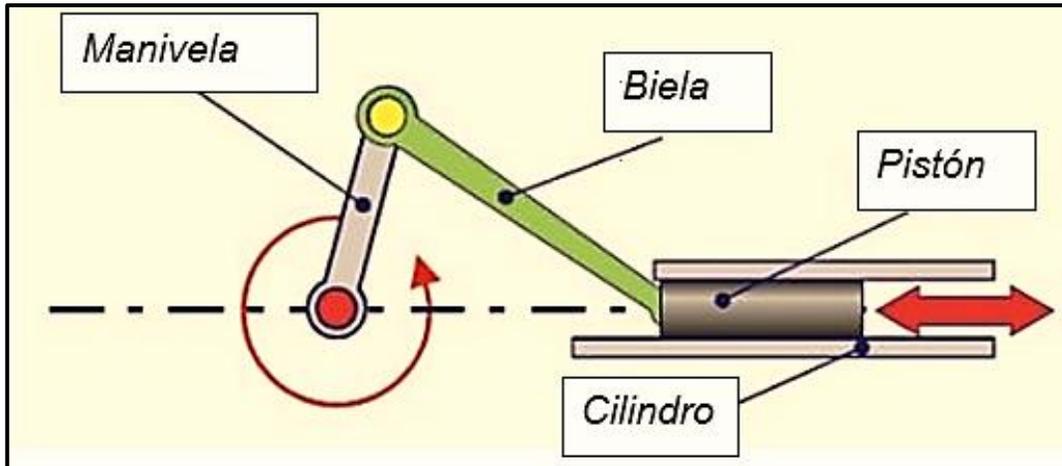


Fuente: elaboración propia.

1.2.1.6. Motor no resonante

Este tipo de motor trabaja en una frecuencia diferente a la de resonancia del sistema, su movimiento resulta del acoplamiento mecánico de sus pistones y posee una ley de movimiento preestablecida y operada a partir de un mecanismo de acoplamiento tipo biela - manivela, que convierte el movimiento lineal en movimiento giratorio, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. **Esquema de acople tipo biela – manivela de un motor no resonante**



Fuente: *Transformación del movimiento giratorio en lineal alternativo.*

https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/_/rsrc/1301736339461/Home/parte-iii/0-2---transformacion-del-movimiento-giratorio-en-lineal-alternativo/2-3---sistema-biela-manivela-embolo/Biela%20-%20Manivela%20-%20%C3%89mbolo.jpg. Consulta: 11 de octubre de 2017.

1.2.2. **Por la forma de acoplamiento del cilindro**

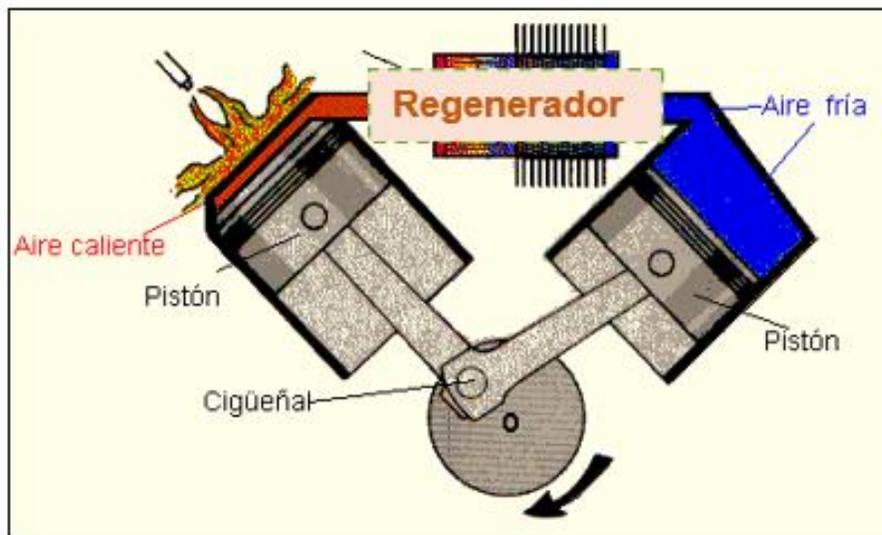
1.2.2.1. **Motor tipo alfa**

Utiliza un cilindro frío y un cilindro caliente que se encuentran separados pero interconectados por un tubo en el que se sitúa un regenerador de calor.

En cada cilindro existe un pistón sellado, se elimina la necesidad de utilizar un desplazador ya que esta función es ejecutada por los pistones (comprimen y expanden el fluido de trabajo a partir de un cambio de presión que se produce internamente en el proceso de regeneración y del movimiento que se trasmite mediante el acople del mecanismo biela manivela).

La regeneración de calor se da gracias a una conexión entre los cilindros en donde se almacena y se cede calor; permite un cambio de presión atmosférica del fluido de trabajo en cada uno de los cilindros a partir de la reinyección de aire por medio de los pistones; generalmente, los pistones tienen un desfase de 90° uno respecto del otro que, provoca que el aire pase de un cilindro a otro, calentándose y enfriándose respectivamente para generar el trabajo que permite el funcionamiento del motor; se conectan desde el mismo punto del cigüeñal como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Configuración tipo alfa



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

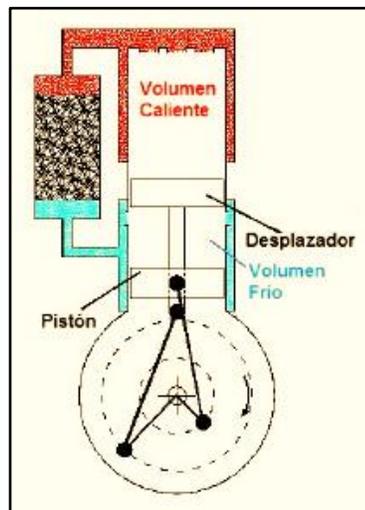
1.2.2.2. Motor tipo beta

Utiliza un único cilindro donde se encuentran el pistón de potencia y un desplazador. El objetivo del desplazador es diferenciar las zonas fría y caliente para hacer pasar el aire de la zona caliente a la zona fría o viceversa a través del regenerador.

El desfase de 90° entre el pistón y el desplazador se logra gracias a un acoplamiento tipo desplazador rómbico en el cigüeñal y permite que el motor funcione; su construcción es más complicada ya que debe disponer de dos bielas para generar el movimiento del pistón, así mismo, permitir el paso de la barra que mueve el desplazador, como se muestra en la figura 11.

El desplazador tiene un funcionamiento de doble efecto y se mueve a partir de la compresión y expansión del fluido de trabajo que se produce en las zonas fría y caliente mediante la regeneración del fluido repitiendo el ciclo de movimiento de forma indefinida que se mantiene y se compensa por medio del cilindro de trabajo⁷.

Figura 11. Configuración tipo beta



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

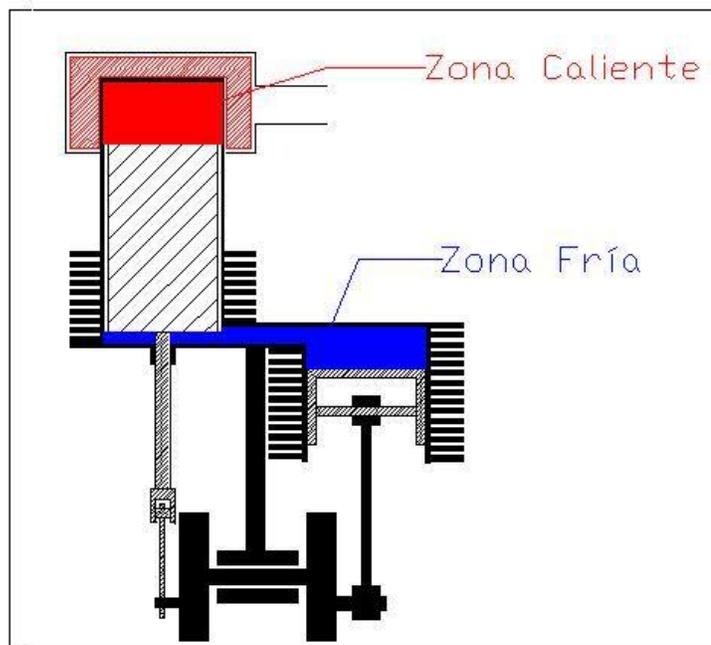
⁷ ALVAREZ FLÓRES, Jesús Andrés. *Máquinas térmicas motoras* – 1. p. 47.

1.2.2.3. Motor tipo gamma

“Es una combinación de características del motor tipo alfa y del tipo beta; tiene dos cilindros interconectados. En un cilindro se encuentra el pistón de potencia y en el otro cilindro el desplazador, mismo que se encarga de pasar el aire entre las dos zonas a través de del regenerador.

El desfase entre el desplazador y el regenerador se puede conseguir mediante un mecanismo adecuado”⁸, tal como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Configuración tipo gamma



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

⁸ READER, Graham; HOOPER, Charles. *Stirling Engines*; E & F.N. Spon. p. 215.

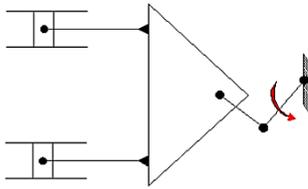
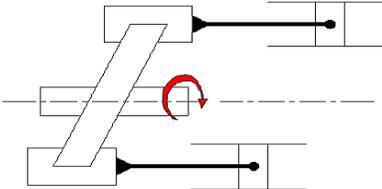
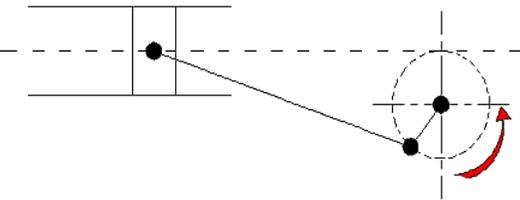
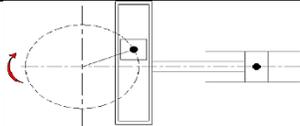
1.2.3. Por la forma de acoplamiento del pistón

Tres formas básicas del acoplamiento del pistón son utilizadas para construir nuevas configuraciones de motor Stirling:

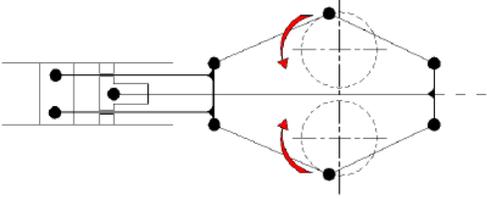
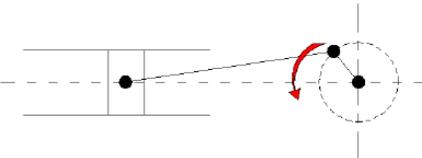
- Acoplamiento rígido

El acople rígido hace referencia al mecanismo que se utiliza para enlazar la acción del trabajo del sistema con el requerido desplazamiento o variación de volumen. En la tabla V. Se muestran algunas configuraciones de acople rígido.

Tabla V. Tipo de acoplamiento rígido

Manivela oscilante	
Plato cíclico	
Biela – manivela desplazada	
Yugo escocés	

Continuación de la tabla V.

Conductor róbico	
Biela - manivela	

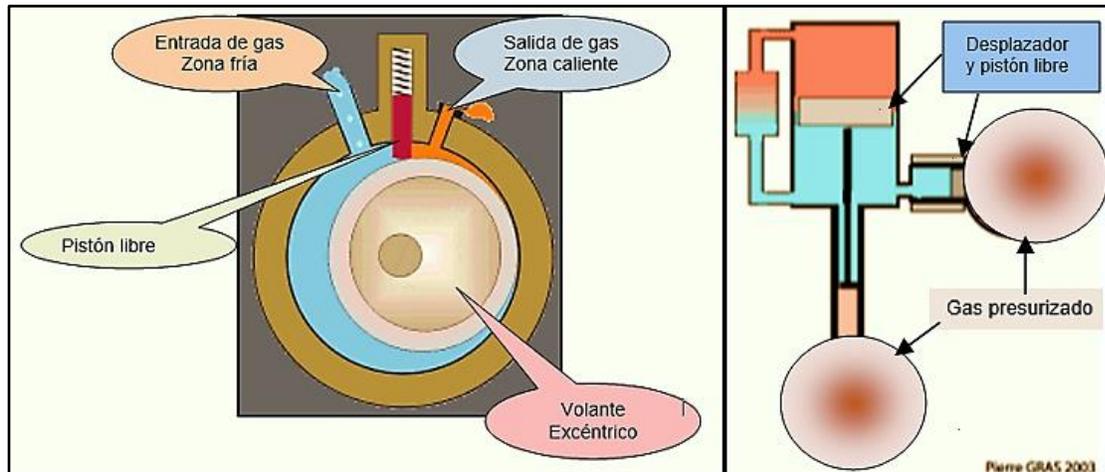
Fuente: elaboración propia.

- Acoplamiento mediante un gas

En este tipo de máquinas los pistones se acoplan mediante un gas que produce un efecto dinámico antes que con un enlace mecánico a partir del movimiento giratorio de un volante excéntrico accionado por la presión del gas que se divide en zona fría y caliente por medio de un pistón, un desplazador o un cilindro.

Los empalmes típicos son: pistón libre, desplazador libre y cilindro libre. En la figura 13 se muestra la conexión de un pistón libre.

Figura 13. Esquema de acoplamiento mediante un gas



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

- Acoplamiento mediante un líquido

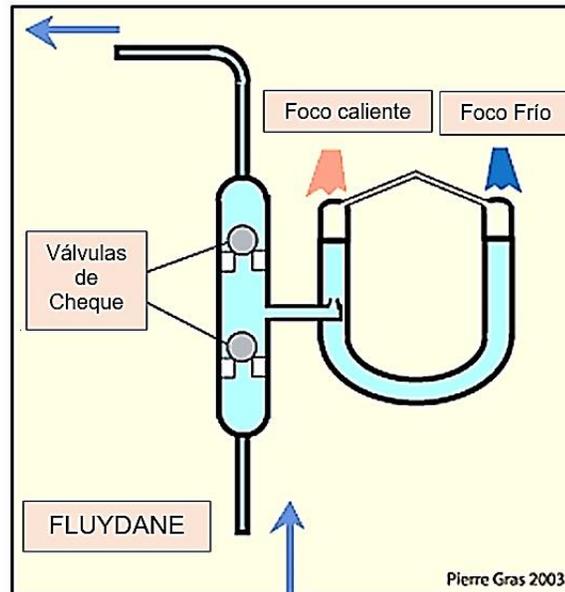
Dentro de esta clasificación se puede mencionar al motor Stirling tipo Fluydane, basado en una columna de agua en lugar de un pistón de potencia que ha permitido obtener motores que aprovechan el cambio de fase del líquido para alcanzar mayores presiones.

Este motor evapora una considerable masa de líquido en la zona caliente incrementando las variaciones de la presión muy por encima de lo que se obtiene con un motor seco que utiliza solamente gas como fluido de trabajo⁹.

En la figura 14 se representa el esquema de un motor Stirling acoplado mediante un líquido tipo Fluydane.

⁹ Motor Stirling. *Documentos*. <https://www.scribd.com/document/236172522/Motor-Stirling>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

Figura 14. Esquema de un motor Stirling acoplado mediante un líquido



Fuente: *Motor Stirling. Documentos*. <https://www.scribd.com/document/236172522/Motor-Stirling>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

1.3. Parámetros del funcionamiento de un motor Stirling

Al analizar los valores de potencia y eficiencia de un motor Stirling, se refieren algunos parámetros de interés que al asumirlos para un ciclo Stirling ideal y ponerlo en funcionamiento, estos no se cumplen a cabalidad bajo las condiciones admitidas lo que reduce la eficiencia del motor. Dichos parámetros se enlistan a continuación:

- La eficacia del regenerador es del 100 %.
- No hay pérdidas de presión.

- No hay volúmenes muertos debido a que todo el fluido de trabajo influye en cada fase.
- Cada fase es reversible internamente (es reversible porque hay paso del fluido en ambas direcciones).
- Las fases de traspaso de calor son completas.

1.3.1. Consecuencia del traspaso de calor en las fases de calentamiento y enfriamiento

La transmisión de calor es incompleta porque todo el fluido de trabajo no se encuentra a la misma temperatura debido a la oposición térmica que se produce en las paredes del cilindro caliente e incluso en el mismo gas.

La representación del ciclo teórico ideal es como se denota en el área $1 - 2 - 3 - 4$ en los diagramas $P - v$ y $T - s$, debido a la transferencia incompleta en la zona caliente se produce una disminución en la temperatura de calentamiento y, por ende, una menor entrega de presión y de trabajo como se indica en la fase $1' - 2'$.

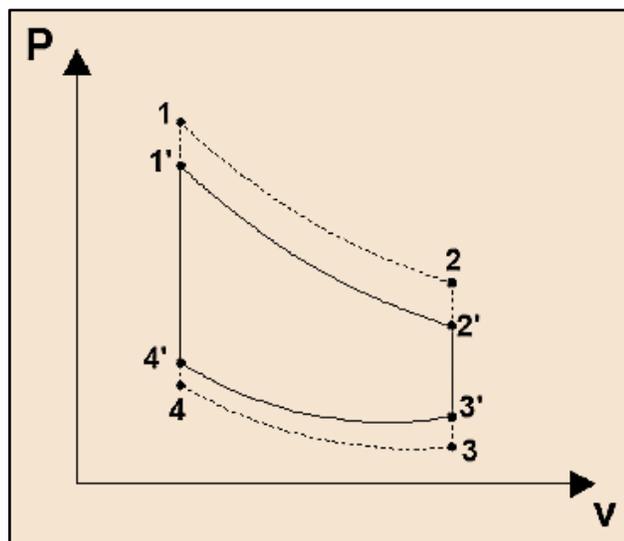
De la misma forma en la zona fría, la transmisión incompleta de calor da origen a una elevación de la temperatura de enfriamiento, requiriendo un trabajo mayor para la compresión del fluido de trabajo durante la fase $3' - 4'$.

En la figura 15, se observa que en la zona caliente la desviación de las condiciones ideales es mayor que en la zona fría.

Estos comportamientos dan como resultado una entrega menor de trabajo neto que se representa en el ciclo $1' - 2' - 3' - 4'$.

Este fenómeno se corrige agregando más calor desde el foco externo y aumentando las áreas de transmisión de calor por medio de calentadores y/o enfriadores tubulares, mas no se garantizan condiciones ideales en la transmisión de calor isotérmico.

Figura 15. **Rendimiento de la transmisión incompleta de calor**



Fuente: elaboración propia.

1.3.2. **Consecuencia de la transferencia de calor en el regenerador**

El propósito del regenerador es absorber el calor del fluido de trabajo para enfriarlo en su totalidad y luego entregar esa misma cantidad de energía caliente al gas frío para su recalentamiento.

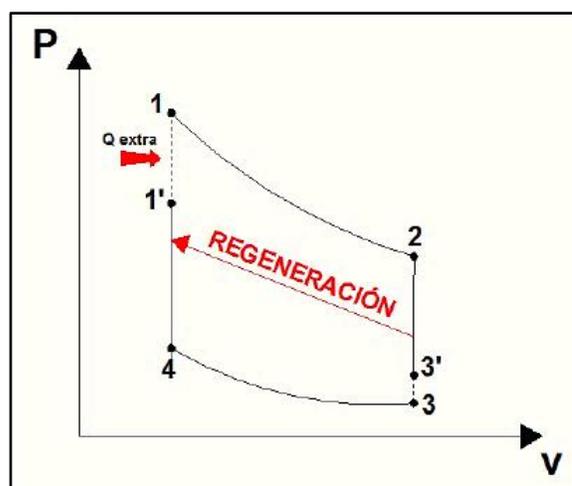
Regula la temperatura del fluido de trabajo de manera que el gas caliente entra en la zona caliente a una máxima temperatura posible y el gas frío entre a la zona fría a la temperatura más baja posible.

Cuando la temperatura del gas que llega a la zona caliente es inferior a la temperatura máxima T_H , se tiene una presión menor a la del ciclo ideal, la que se representa en el punto 1' de la figura 15.

De igual forma cuando la temperatura del gas en la zona fría es inferior a la temperatura mínima T_L , se obtiene una presión mayor a la que debería de existir, como se representa en el punto 3'.

El efecto de pérdida de presión se compensa por medio de calor extra en el tramo 1 – 1', lo que permite alcanzar la temperatura de trabajo máxima T_h , pero disminuye la eficiencia del ciclo.

Figura 16. **Consecuencia de la influencia del regenerador**



Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la tabla VI, con base en los cálculos de efectividad y eficiencia, se hace un planteamiento matemático donde se muestra que, a partir de una efectividad baja del regenerador, se ve afectada la eficiencia global de un motor Stirling.

Tabla VI. **Ecuaciones para calcular la eficiencia global de un motor Stirling**

Efectividad del regenerador	$\varepsilon = \frac{T_1' - T_L}{T_H - T_L}$	<ul style="list-style-type: none"> • ε = efectividad del regenerador. • T_1' = temperatura de calor extra, °K.
Nueva eficiencia con relación al trabajo neto y el calor entregado al ciclo	$\eta_\varepsilon = \frac{W_X}{Q_{ent}}$	<ul style="list-style-type: none"> • T_L = temperatura de cuerpo a baja temperatura, °K.
	$W_X = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \int_1^2 \frac{dV}{V} + m \cdot R \cdot T_3 \cdot \int_3^4 \frac{dV}{V}$	<ul style="list-style-type: none"> • T_H = temperatura de cuerpo a alta temperatura, °K. • η_ε = eficiencia global de un motor Stirling. • W_X = trabajo neto, KJ.
Trabajo neto	<p>Donde:</p> $W_X = W_{12} + W_{34}$ $W_X = \int_1^2 P \cdot dV + \int_3^4 P \cdot dV$ $= m \cdot R \cdot T_H \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + m \cdot R \cdot T_L \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$ $W_X = m \cdot R \cdot (T_H - T_L) \cdot \ln\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • Q_{entra} = calor transferido, KJ. • R = constante del gas, KJ/Kg*°K. • k = relación de calores específicos, C_p/C_v

Continuación de la tabla VI.

<p>Reemplazando, la relación de volúmenes r_v, y la relación de temperaturas ζ, se obtiene una nueva expresión para el trabajo neto</p>	<p>$R = C_P - C_V$, y que: $k = C_P / C_V$.</p> $r_v = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}}$ $\zeta = \frac{T_L}{T_H}$ $W_x = m \cdot C_V \cdot T_H \cdot (k - 1) \cdot (1 - \zeta) \cdot \ln(r_v)$	<ul style="list-style-type: none"> • r_v = relación de volúmenes, $V_{m\acute{a}x} / V_{m\acute{i}n}$. • ζ = relación de temperaturas, T_L / T_H. • m = masa, Kg. • C_v = calor específico a volumen constante, KJ/KG*K
<p>El calor que debe recibir el sistema</p>	$Q_{entra} = Q_{12} + Q_{1'1}$	<ul style="list-style-type: none"> • r_v = relación de volúmenes, $V_{m\acute{a}x} / V_{m\acute{i}n}$. • ζ = relación de temperaturas, T_L / T_H. • m = masa, Kg. • C_v = calor específico a volumen constante, KJ/KG*K.
<p>El calor que debe recibir durante el proceso isocórico</p>	$Q_{1'1} = m \cdot C_V \cdot (T_H - T_{1'})$	<ul style="list-style-type: none"> • r_v = relación de volúmenes, $V_{m\acute{a}x} / V_{m\acute{i}n}$.
<p>Lo que se obtiene al sumarle el calor recibido en el proceso isotérmico</p>	$Q_{entra} = m \cdot C_V \cdot (T_H - T_{1'}) + m \cdot R \cdot T_H \cdot \ln(r_v)$	<ul style="list-style-type: none"> • ζ = relación de temperaturas, T_L / T_H.
<p>Aplicando las equivalencias antes especificadas (r_v y ζ), se tiene:</p>	$Q_{entra} = m \cdot C_V \cdot T_H \cdot [(1 - \varepsilon) \cdot (1 - \zeta) + (k - 1) \cdot \ln(r_v)]$	<ul style="list-style-type: none"> • m = masa, Kg.
<p>Si reemplazamos las ecuaciones de la eficiencia teórica (η) y la eficiencia a partir de la efectividad (η_ε) en la ecuación del calor total que entra al sistema (Q_{entra}), se obtiene la eficiencia global de un motor Stirling</p>	$\eta_\varepsilon = \frac{(k - 1) \cdot (1 - \zeta) \cdot \ln(r_v)}{[(1 - \varepsilon) \cdot (1 - \zeta) + (k - 1) \cdot \ln(r_v)]}$	<ul style="list-style-type: none"> • C_v = calor específico a volumen constante, KJ/KG*K.

Fuente: elaboración propia.

Para alcanzar una alta eficiencia en los motores Stirling es importante mantener una condición hermética de la cámara. Aunque es difícil mantener esta condición por lo que se refleja una reducción en la eficiencia del motor.

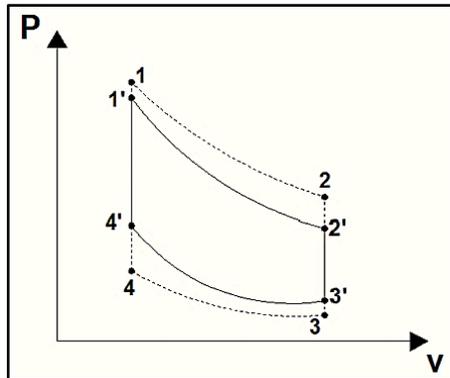
Normalmente existe una pérdida de masa y presión, en consecuencia, de la máxima temperatura alcanzada por el fluido de trabajo después del

calentamiento, generando entonces una menor cantidad de trabajo, durante el proceso $1' - 2'$.

Al finalizar el proceso de enfriamiento ingresa el gas e incrementa la presión, requiriendo mayor trabajo para la compresión del fluido, esta acción se muestra en el proceso $3' - 4'$.

Resultando entonces un menor trabajo neto, representado por el ciclo $1' - 2' - 3' - 4'$, difiriendo del ciclo teórico $1 - 2 - 3 - 4$.¹⁰

Figura 17. **Impacto de las fugas de fluido de trabajo**



Fuente: elaboración propia.

1.3.3. Impacto de los espacios muertos

Los espacios muertos ocasionan una disminución en el trabajo de salida de los motores Stirling debido a las pérdidas de presión que ocurren en presencia de los volúmenes vacíos, por lo que se hace necesario minimizarlos.

En el análisis del ciclo ideal se supone que el aire frío y caliente ocupan en su totalidad el espacio destinado para ellos; sin embargo, esto no se puede lograr.

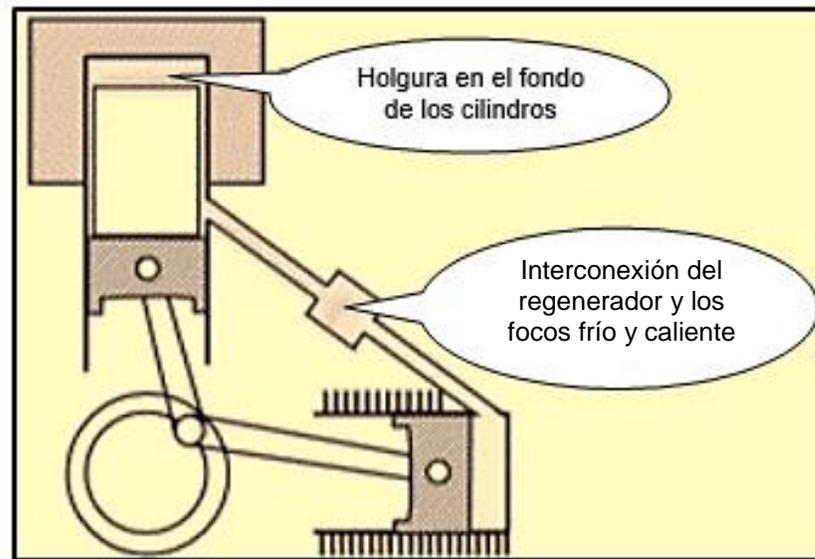
¹⁰ MUÑOZ DOMÍNGUEZ, Marta; ROVIRA DE ANTONIO, Antonio José. *Máquinas térmicas*. p. 185.

Cuando el ciclo se encuentra en la fase caliente, parte de aire frío estará en el lado caliente, ocasionando una pérdida de presión general. Por lo que se hace necesario reducir al mínimo los espacios muertos en el lado caliente, en lado frío y en el regenerador porque estos representan una masa que, en lugar de generar trabajo, lo consumen.

Los volúmenes muertos se presentan en la tubería de interconexión de los focos frío y caliente y en el interior del regenerador de temperatura cuando hay un exceso de tubería: es importante que estos sean lo más corto posible para evitar una pérdida excesiva de potencia. También, existen los espacios muertos en el fondo de los cilindros ya que deben tener una holgura para que los pistones no alcancen a impactar con dicho fondo, porque esto provocaría daños al mecanismo de traslación y rotación (biela manivela).

En la figura 18 se muestra una interconexión típica de un regenerador y los focos frío y caliente, así como, la holgura en el fondo de los cilindros.

Figura 18. **Representación de espacios muertos en un motor Stirling**



Fuente: *Biblioteca escolar*. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar27/HTML/articulo04.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

1.3.4. Impacto del desplazamiento del émbolo o pistón

Al analizar aspectos termodinámicos, se considera que el desplazamiento del émbolo es moderado; sin embargo, esta condición no se cumple en la práctica porque es una afirmación teórica para condiciones ideales.

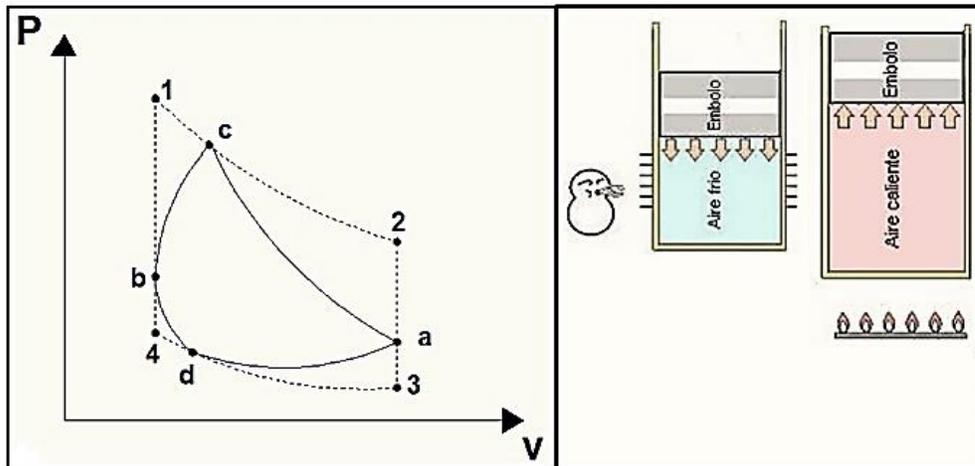
En la figura 19, se muestra cómo se reduce el área en un ciclo real del diagrama P – V en consecuencia del desplazamiento del émbolo.

Las zonas caliente y fría se encuentran alrededor de los puntos c y d, respectivamente.

Y los volúmenes mínimo y máximo se indican en los puntos a y b, respectivamente.

Se producirá un cambio en la forma del diagrama P – V según el mecanismo adoptado en el desplazamiento del émbolo para la generación del trabajo del motor Stirling.¹¹

Figura 19. Impacto del desplazamiento del émbolo



Fuente: elaboración propia.

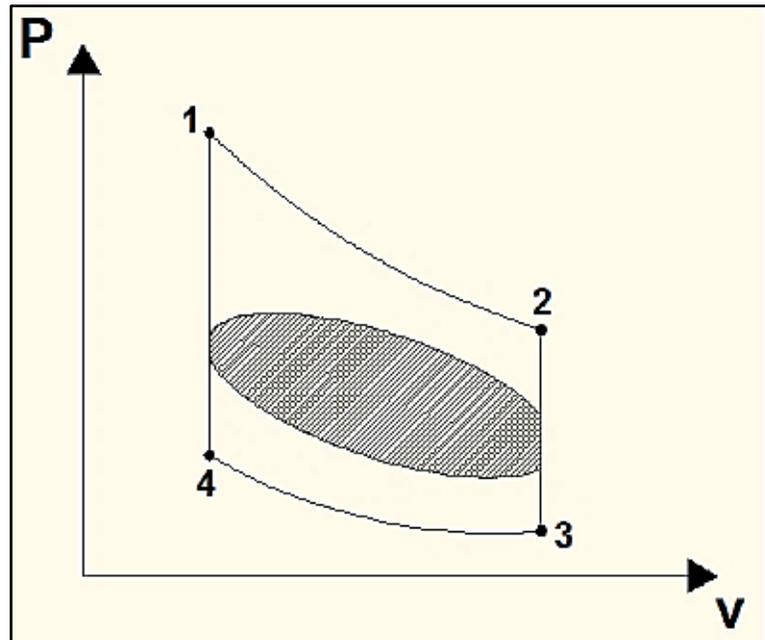
1.3.5. Consecuencias que se combinan

La combinación de consecuencias genera una desviación del caso ideal, que implican una disminución considerable en el trabajo neto del ciclo, que se representa en el área sombreada de la figura 20.

Si se analiza un motor real se encuentra que las consecuencias explicadas se interrelacionan de manera discrepante, tanto que, si se aumenta la proporción de transferencia de calor, los espacios muertos se reducen y aumenta la velocidad de operación; no obstante, esto aumentaría los desgastes por fricción.

¹¹ READER, Graham; HOOPER, Charles. *Stirling Engines*. p. 12.

Figura 20. **Consecuencias de las desviaciones en la ejecución del ciclo ideal**



Fuente: elaboración propia.

1.3.6. **Conversión de energía y eficiencia efectiva de un motor Stirling**

Con base en el estudio y análisis de las consecuencias descritas anteriormente, se puede asegurar que se producen pérdidas en el motor Stirling real, debido a la radiación térmica, convección y fricción que reducen la eficiencia teórica del ciclo η .

El proceso completo para la conversión de la potencia térmica eléctrica en potencia mecánicamente disponible y alcanzable del motor Stirling, produciendo las potencias y eficiencias parciales con la frecuencia (f) de revoluciones del motor dada, se calcula con las expresiones expuestas en la tabla VII.

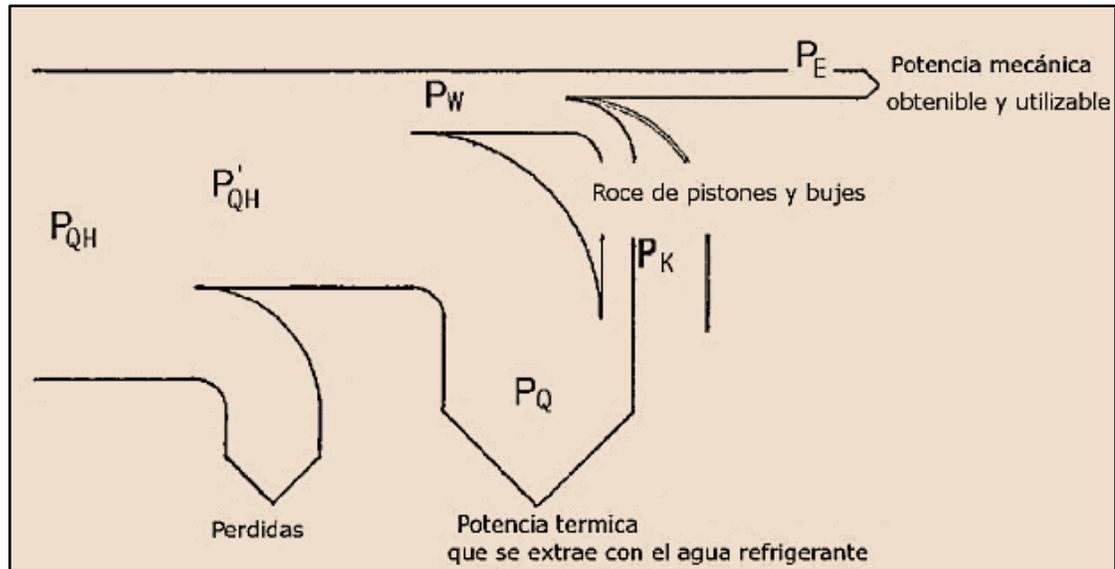
Tabla VII. **Potencia y eficiencia resultante de un proceso de conversión de potencia térmica eléctrica en potencia mecánica disponible**

Potencia eléctrica	térmica	$P_{QH} = U I$	<ul style="list-style-type: none"> • U = potencial eléctrico, V. • I = intensidad eléctrica, A. • Γ_{wv} = pérdidas de calor al ambiente. • $\Gamma_{th} = \eta$ = eficiencia teórica. • Γ_{mech} = pérdidas mecánicas de fricción (pistón y rodamientos)
Potencia absorbida por el gas de trabajo	térmica	$P'_{QH} = \eta_{wv} P_{QH} = f Q_{12}$	
Potencia aportada por el gas de trabajo	mecánica	$P_W = \eta_{th} P'_{QH} = f \oint p dV$	
Potencia obtenible y utilizable en el eje del motor	mecánica	$P_E = \eta_{mech} P_W$	
Eficiencia resultante de la potencia aplicada convertida en potencia mecánica obtenible y alcanzable	efectiva de la potencia eléctrica PQH	$\eta_{eff} = \frac{P_E}{P_{QH}} = \eta_{mech} \eta_{th} \eta_{wv}$	

Fuente: elaboración propia.

Al realizar un diagrama de flujo para el análisis de la potencia mecánica obtenible y utilizable a partir de las pérdidas en el motor Stirling real, queda como se muestra en la figura 21.

Figura 21. **Diagrama de flujo para el análisis de potencia mecánica obtenible y utilizable en un motor Stirling**



Fuente: elaboración propia.

1.4. Principios de radiación solar y concentradores parabólicos

“La energía solar es la energía que se obtiene de la captación de la luz y el calor emitidos por el sol por medio de concentradores”¹², como se muestra en la figura 22.

¹² COMENAR, José A.; GONZÁLEZ ROQUE, Carla; PÉREZ, Antonio; Colmenar, Santos. *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. p. 85.

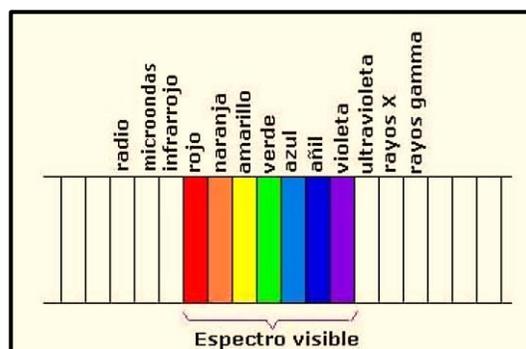
Figura 22. **Concentrador solar parabólico**



Fuente: *Concentrador solar*. <https://morguefile.com/search/morguefile/1/solar%20concentrador/pop>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. El sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro y sigue la ley de Planck, esta describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una temperatura definida con una temperatura aproximada a 6 000 °K La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultra violeta, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. **Distribución de la radiación solar**



Fuente: *Espectro visible*. <http://casanchi.com/did/er.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2017.

Mediante la radiación solar se transmite la energía del sol hacia el exterior. No toda la radiación solar alcanza la superficie de la tierra, ya que los gases de la atmosfera absorben las ondas ultravioleta más cortas.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la tierra es la irradiación, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado).

La radiación solar que alcanza la tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce a través de la absorción de la radiación, en dispositivos ópticos en forma de luz, calor y rayos ultravioleta. Esta es una energía renovable del grupo no contaminante, es energía limpia o energía verde. El único inconveniente es el reciclaje de los paneles fotovoltaicos (materiales semiconductores y el vidrio), grandes cantidades de materiales ferrosos y no ferrosos utilizados en las bases y anclaje de cada módulo; estos materiales son difíciles de reciclar hasta el día de hoy.

La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la medida de latitud. En buenas condiciones de irradiación en un día claro al medio día, el valor es de aproximadamente $1\ 000\ W/m^2$ en la superficie horizontal terrestre. Este valor depende de la ubicación geográfica, de la altura sobre el nivel del mar, de la nubosidad presente y de la irradiación solar disponible

1.4.1. Radiación solar

El sol se considera como una esfera de $1,39 \times 10^6$ km de diámetro, tiene una masa de 2×10^{30} Kg y se encuentra a una distancia media de 150×10^6 Km de la tierra.

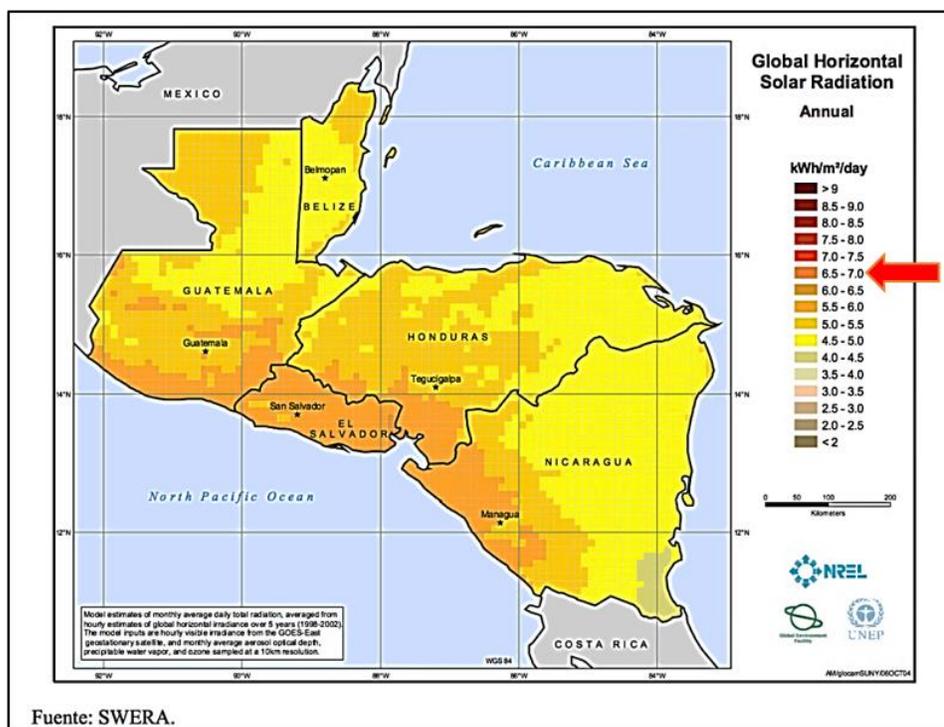
La superficie del sol es aproximadamente equivalente a un cuerpo negro tiene una temperatura efectiva sobre su superficie de $5\ 600\ ^\circ C$ y emite en promedio

para Centro América una cantidad de energía equivalente a 6 KWh de energía incidente al día por cada metro cuadrado.

La radiación solar medida fuera de la atmosfera en un plano perpendicular a la radiación incidente y a distancia media del sol se le denomina constante solar (I_0) y es igual a $1\,400\text{ W/m}^2$ ¹³.

En la figura 24 se muestra un mapa de la radiación global horizontal, promedio anual, escala de 10 km x 10 km, elaborado con el modelo SUNNY que permitirá conocer los valores de radiación directa promedio en Guatemala y esta equivale a $6,5\text{ KWh / m}^2 / \text{día}$.

Figura 24. Mapa de radiación directa del sol en Guatemala



Fuente: *Mapa de recurso solar en Guatemala*. <http://incyt.org/web/mapas-de-recurso-solar-en-guatemala/julio 2017>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

¹³ *El sol*. <http://edii.uclm.es/~arodenas/Solar/EI%20Sol%20y%20La%20Tierra.htm>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

1.4.2. Colectores solares

Los colectores solares son utilizados en el aprovechamiento de la energía solar térmica, reciben la luz del sol y la redireccionan a partir de una superficie reflectante un punto específico para generar calor.

Difieren de los paneles solares que están compuestos principalmente por material semiconductor, generalmente, silicio que se emplean para la transformación de la luz del sol en corriente eléctrica por medio de un efecto fotovoltaico.

Existen dos tipos de colectores solares:

- Estacionarios: no concentran una imagen, tiene una superficie reflectante cóncava y focaliza la radiación incidente en un área pequeña, que incrementa el flujo radiactivo.

Figura 25. **Colector solar estacionario**



Fuente: *Sistema fotocatali*. <http://noticias.masverdedigital.com/wp-content/uploads/2013/07/Sistema-fotocatali%CC%81tico-posee-una-serie-de-la%CC%81minas-de-aluminio-electro-pulido.jpg>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

- Concentran una imagen: tiene normalmente un área de absorción (área de imagen o área de la zona focal) cercana al área de intercepción, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 26. **Colector concentrador**



Fuente: *Concentrador*. <http://slideplayer.es/slide/11751890/>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

1.4.2.1. **Razón de concentración (CR)**

Es la razón entre el área de intercepción (A_{ac}) y el área de absorción (A_f) de un colector y es una propiedad relevante e intrínseca de cada uno. Puede ser definida como:

$$CR = \frac{A_{ac}}{A_f}$$

1.4.3. Colectores concentradores

Presentan ciertas ventajas y desventajas con respecto a los concentradores planos convencionales; estas se pueden consultar en la tabla VIII. Los colectores que entran en esta categoría son:

- Colectores cilíndrico-parabólicos (PTC)
- Disco parabólico (PDR)
- Helióstato

Tabla VIII. **Ventajas y desventajas de los colectores concentradores**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El flujo de trabajo llega a temperaturas mayores en un colector concentrador, tomando la misma superficie de colector de ambos. Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia termodinámica.• Dado que la superficie absorbente es pequeña (con respecto al área total del colector), ocupar superficies de absorción selectivas y ocupar zonas de vacío en ésta para disminuir pérdidas (y por lo tanto la eficiencia del colector) son alternativas económicamente viables.	<ul style="list-style-type: none">• Los colectores concentradores solo utilizan la radiación directa y no la difusa.• Es necesario implementar un sistema de seguimiento solar con los colectores.• El reflectante del colector puede perder sus propiedades con el tiempo y requiere mantenimiento periódico.

Fuente: elaboración propia.

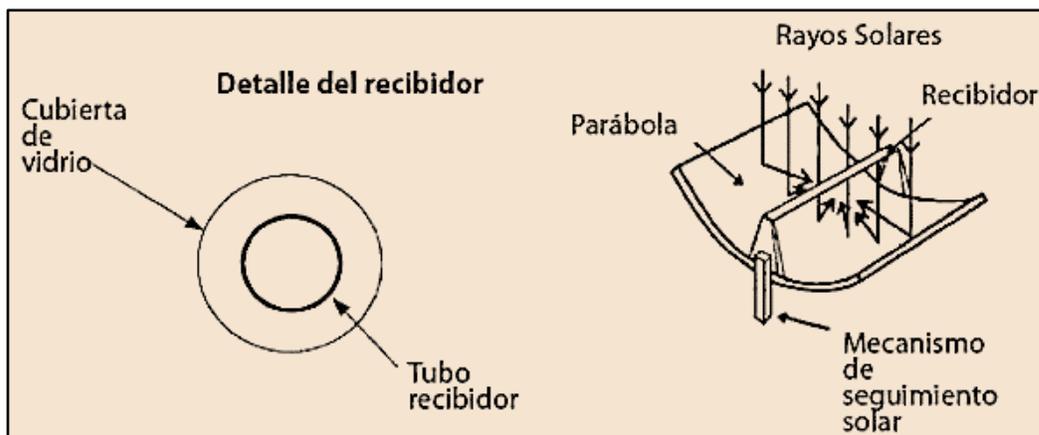
1.4.3.1. Colectores cilíndrico-parabólicos

Los colectores pueden alcanzar temperaturas de hasta 400 °C con una buena eficiencia termodinámica. Tienen aplicaciones tanto en generación de energía eléctrica como en calentamiento de agua.

Se construyen doblando una lámina de material reflectante con forma parabólica.

Un tubo metálico de color negro, recubierto con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas de calor, se debe colocar a lo largo de la línea focal como receptor, así como se muestra en la figura 27.

Figura 27. **Colector solar tipo PTC**



Fuente: *Termosolar*. <http://www.termosolar.com/2011/06/9-colectores-de-concentracion.html>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

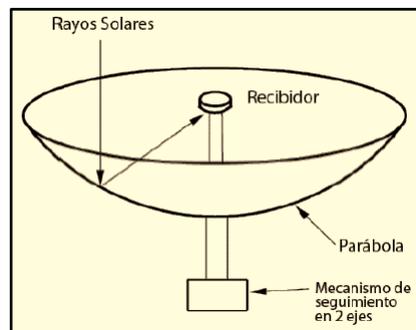
Cuando la parábola es orientada hacia el sol, los rayos paralelos incidentes en el colector son reflejados hacia el foco lineal. Es suficiente hacer seguimiento solar en un solo eje de rotación.

Este tipo de colectores no se ocupa, la mayoría de las veces, en forma individual, sino que en forma grupal conectando los tubos receptores entre ellos.

1.4.3.2. Disco parabólico

Se simboliza en la figura 28, cuando este colector es expuesto al sol, la radiación incidente se concentra en su foco. Por lo que se hace necesario seguir al sol en sus dos grados de libertad (altitud y azimut).

Figura 28. **Colector parabólico**



Fuente: *Termosolar*. <http://www.termosolar.com/2011/06/9-colectores-de-concentracion.html>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

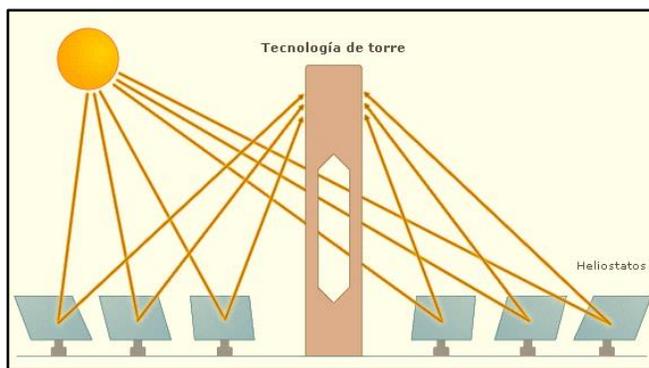
El receptor colocado en el foco absorbe la radiación solar y la traspassa en forma de calor a un fluido circulante. Los colectores parabólicos tienen ventajas importantes en comparación con otros colectores:

- Debido a que siempre están apuntando al sol, representa el sistema de concentración solar más eficiente.
- Tienen concentraciones entre 600 y 2 000 °C.
- El colector como módulo se puede ocupar de manera independiente o ser parte de un campo de colectores.

1.4.3.3. Helióstato

“Para obtener altos niveles de radiación de energía solar, es necesario disponer de varios espejos planos dispuestos en un campo con seguimiento solar de altitud – azimut y reflejando la radiación incidente en cada uno de ellos a un foco receptor común, como se muestra en la figura 29”¹⁴.

Figura 29. **Colectores tipo helióstato**



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

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

1.4.3.4. Análisis térmico en el receptor

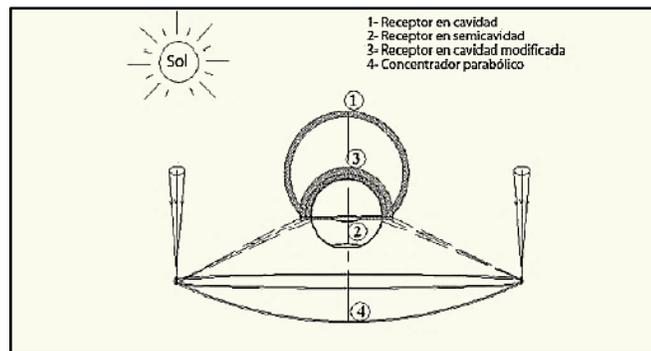
El receptor (o absorbente focal) recibe la radiación solar concentrada y la transforma en energía térmica para ser utilizada en procesos posteriores.

Su labor principal es absorber la máxima cantidad de radiación incidente y transferirla en forma de calor, con mínimas pérdidas, a un fluido de trabajo.

¹⁴ COMENAR, José A.; GONZÁLEZ ROQUE, Carla; PÉREZ, Antonio; COLMENAR, Santos. *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. p. 85.

Generalmente, es usado un receptor con forma de cavidad, donde la forma de la cavidad depende de la calidad del reflector. Para colectores que forman un foco volumétrico (a partir de una superficie cóncava parabólica) e imagen focal difusa (carecen de precisión y se extienden más allá de la distancia focal) es preferible usar receptores como los que se muestran en las figuras 30 y 31.

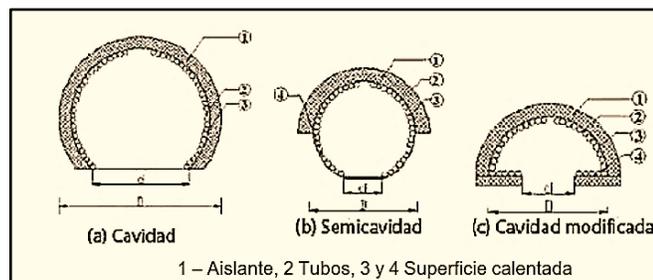
Figura 30. **Colector y receptores**



Fuente: *La energía solar*. <https://themorningstarg2.wordpress.com/author/cristinapons/>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Figura 31. **Receptores adecuados para uso en el colector**



Fuente: *La energía solar*. <https://themorningstarg2.wordpress.com/author/cristinapons/>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

1.4.4. Radiación incidente y temperatura en el foco

La temperatura que se concentra en el receptor es mucho más alta cuando mayor es el diámetro del colector y se tiene un reflectante de buena calidad; a mejor calidad del reflectante, menor puede ser el diámetro del colector para conseguir la misma concentración de energía.

Esta es una parte muy importante para analizar desde el punto de vista técnico y económico cuando se quiere construir cualquier tipo de concentrador solar.

2. TIPOS DE MOTORES STIRLING

2.1. Generalidades

Existen diversos tipos y variantes del motor a lo largo del mundo, a partir de la creación del primer motor Stirling en 1816. Varios con más éxito que otros o más complejos que otros, pero todos siguen un modelo inicial o al menos una derivación de este.

De los modelos inventados se puede resumir que existen tres principales arreglos que operan bajo el ciclo termodinámico Stirling.

Para los cuales se tienen parámetros iniciales de diseño para su construcción, estos tipos son: alfa, beta y gama.

2.2. Motor Stirling tipo alfa

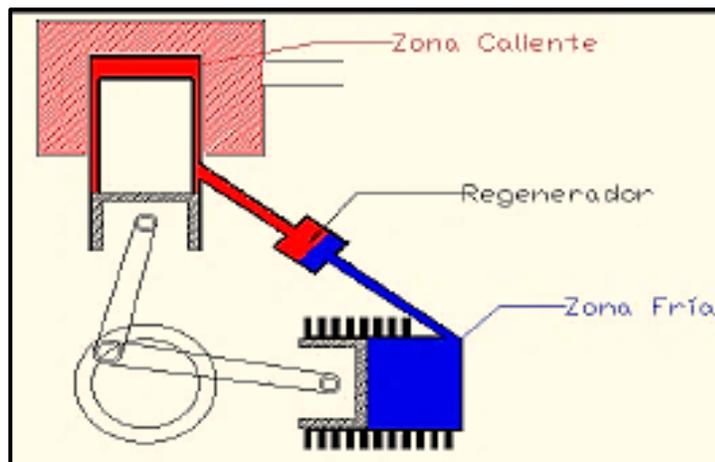
Fue diseñado por A. K. Rider, de Philadelphia, se constituye un cilindro caliente y otro frío, conectados a través de un regenerador. Los pistones de estos cilindros transmiten el movimiento por medio de bielas a un cigüeñal, con un desfase de 90° grados, de modo que el aire se desplaza de un cilindro al otro enfriándose y calentándose alternativamente formando un ciclo constante de trabajo.

Este motor entrega una alta potencia debido a su relación de compresión y por las dos bielas se montan en el mismo pasador del cigüeñal, lo que hace que el mecanismo de transmisión sea muy sencillo.

Pero, pueden resultar complicaciones técnicas en la zona caliente, debido a que algunos materiales no soportan las altas temperaturas y el trabajo continuo, degradándose y terminan fallando.

Lo que complica también el mantener el aire dentro del ciclo, porque es muy difícil sellar las partes móviles de esta zona.

Figura 32. **Diagrama del motor tipo alfa**

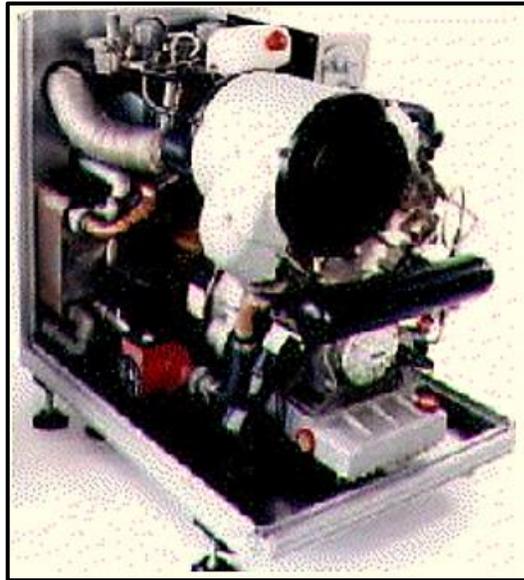


Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

2.2.1. **Motor Stirling tipo alfa para generación eléctrica solar**

Es un motor de los más utilizados y más eficientes, actualmente, es fabricado por una empresa sueca (SOLO Kleinmotoren GmbH), han logrado suministrar de 5 a 10 KW. En la figura 33 se muestra un ejemplo de estos motores.

Figura 33. **Stirling technology Solo Kleinmotoren**



Fuente: *Motor Stirling. Manufactura.* <http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/germany/new7.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

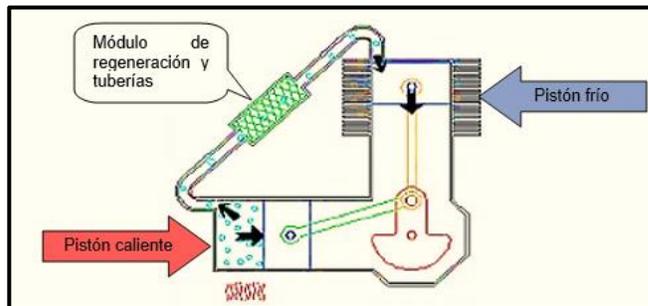
Otras compañías que desarrollan sistemas de microgeneración basados en motores Stirling son: Microgen (UK), SunMachine (Alemania), Stirling Systems (Rep. Checa), entre otros.

2.2.2. Fases de funcionamiento

- **Expansión:** en esta fase, la mayoría de aire en el sistema se encuentra en el cilindro del pistón caliente.

El aire se calienta, cambia su presión atmosférica y se expande, empujando el pistón caliente hacia abajo; fluye a través de la tubería hasta el cilindro frío, empujándolo hacia abajo también, como se muestra en la figura 34.

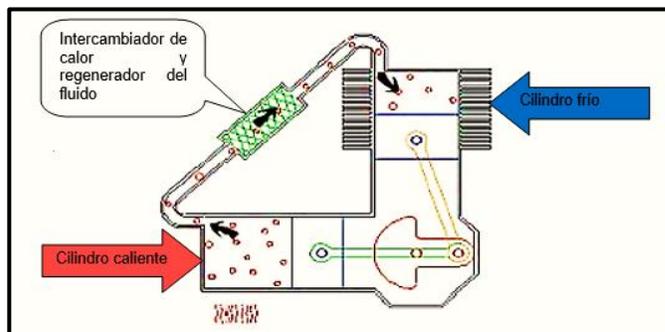
Figura 34. **Fase de expansión al motor Stirling tipo alfa**



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- **Transferencia:** en esta fase, el aire se ha expandido. La mayor parte del aire se encuentra todavía en la cámara del cilindro caliente. Pero el cigüeñal sigue girando los próximos 90°, y la transferencia de la mayoría del aire en la cámara del cilindro frío empuja nuevamente la mayoría del fluido a través del intercambiador de calor e ingresa de nuevo en la cámara del cilindro de pistón frío, como se indica en la figura 35.

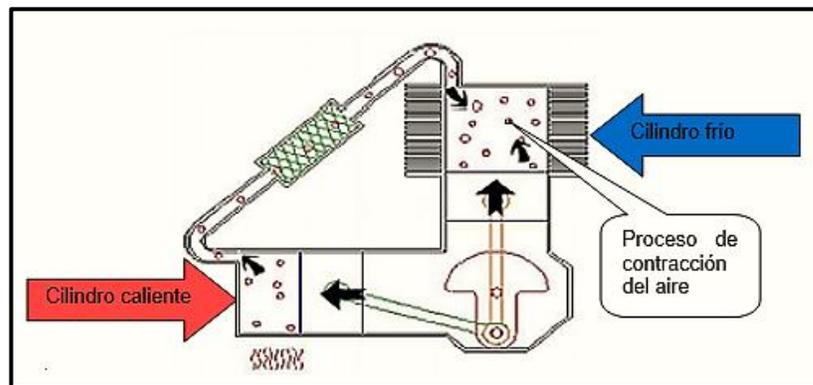
Figura 35. **Fase de transferencia del motor Stirling tipo alfa A**



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- Contracción: ahora la mayoría del aire de expansión se traslada hacia la cámara del cilindro de pistón frío. Se enfría y se contrae, como se muestra en la figura 36.

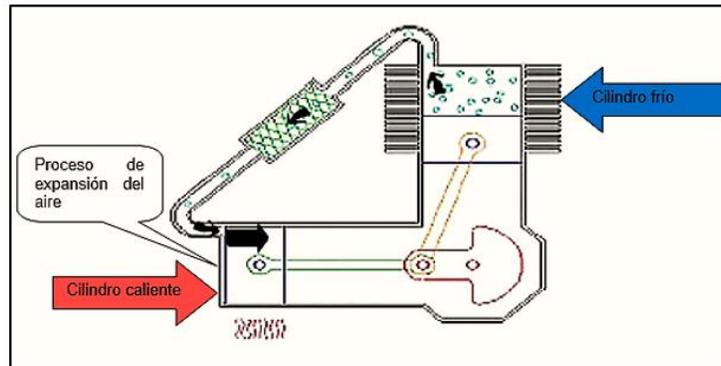
Figura 36. **Fase de contracción del motor Stirling tipo alfa**



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- Transferencia: el aire se enfría y el cigüeñal gira otros 90°. El aire se extrae de nuevo, por lo tanto, a través del intercambiador de calor ingresa a la cámara del cilindro de pistón caliente. Una vez ingresa, se calienta y vuelve a iniciar en la fase de expansión, como se observa en la figura 37.

Figura 37. **Fase de transferencia al motor Stirling tipo alfa B**



Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

2.2.3. **Motor Stirling tipo beta**

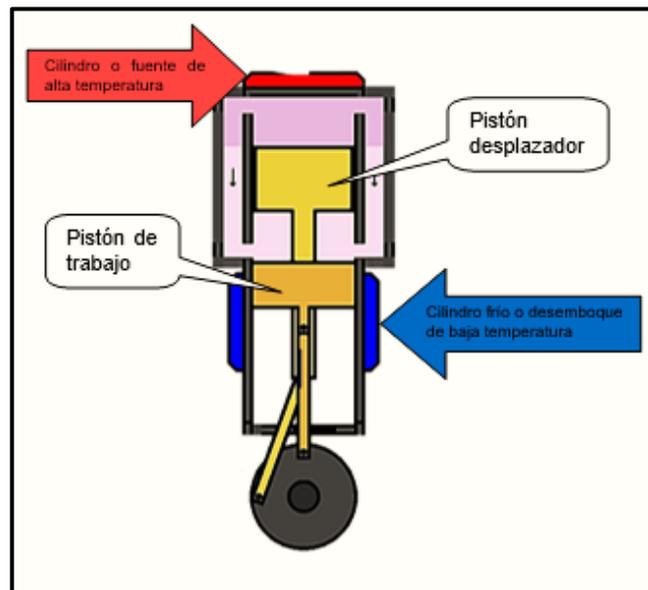
Fue originalmente diseñado por Robert Stirling. Incorpora en su diseño un desplazador del fluido de trabajo adicional al pistón de potencia.

Este diseño muestra que los dos pistones están anclados a la misma línea de acción, en donde el pistón desplazador está instalado cerca de la fuente de alta temperatura y el de trabajo cerca del desembogue de baja temperatura.

Los pistones se ubican en la misma línea de acción y se requiere únicamente de una cámara para contenerlos, haciéndolo más compacto; es posible obtener grandes relaciones de compresión debido a que el sellado es más fácil porque las barras de conexión salen de la carcasa del motor partiendo del mismo punto.

El principal problema que presenta este motor es la complejidad en los mecanismos ya que el eje que transmite la fuerza al desplazador entra al sistema a través del pistón de potencia.

Figura 38. Diagrama del motor Stirling tipo beta

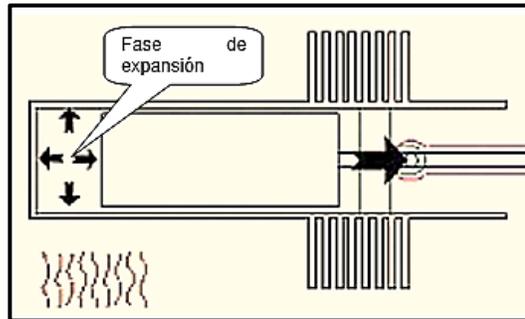


Fuente: *Motor Stirling*. <http://motorstirlingporsantiydauid.blogspot.com/2015/>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

2.2.3.1. Fases de funcionamiento

- **Expansión:** en esta fase, la mayor parte del aire en el sistema se ubica en el extremo caliente de la cámara del cilindro. El aire se calienta y se expande, lo que conduce al pistón hacia afuera, como se observa en la figura 39.

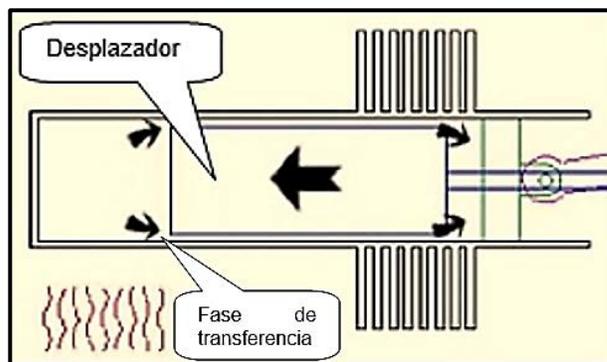
Figura 39. **Fase de expansión al motor Stirling tipo beta**



Fuente: Motor Stirling. *Monocilíndrico*. <http://almadeherrero.blogspot.com/2007/11/motor-stirling-monocilindrico.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- **Transferencia:** aquí el aire se ha expandido y la mayor parte del aire se encuentra en el extremo caliente de la cámara del cilindro. Lo que impulsa al volante del cigüeñal obligándolo a dar una vuelta; entonces, la mayor parte del aire se transfiere con el desplazador al extremo frío del cilindro, como se indica en la figura 40.

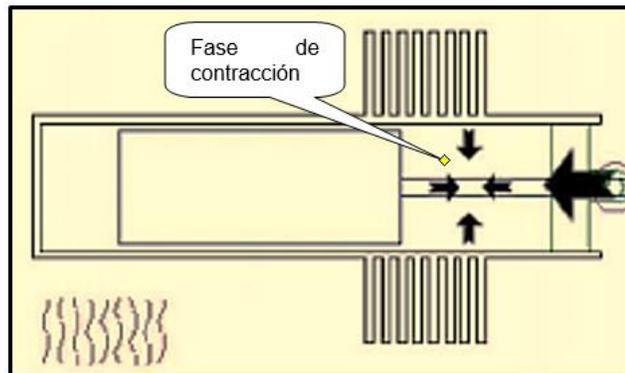
Figura 40. **Fase de transferencia al motor Stirling tipo beta**



Fuente: Motor Stirling. *Monocilíndrico*. <http://almadeherrero.blogspot.com/2007/11/motor-stirling-monocilindrico.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- Contracción: aquí la mayoría del aire de expansión se ha desplazado hacia el extremo frío. Este se contrae y el desplazador llega casi al final de su ciclo. Ver figura 41.

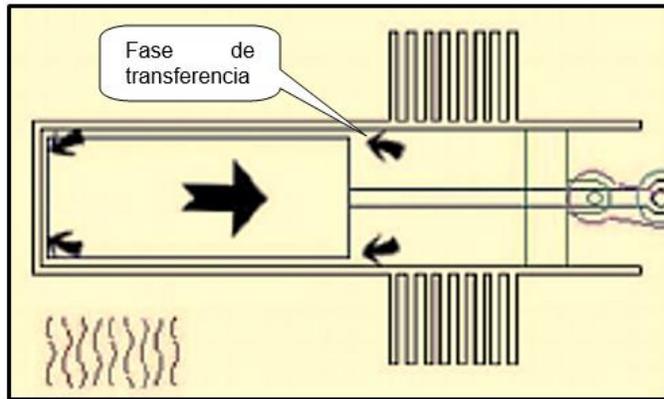
Figura 41. **Fase de contracción al motor Stirling tipo beta A**



Fuente: Motor Stirling. *Monocilíndrico*. <http://almadeherrero.blogspot.com/2007/11/motor-stirling-monocilindrico.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- Transferencia: el aire contraído todavía se encuentra cerca del extremo frío del cilindro. Impulsa el volante que hace girar la manivela un cuarto de vuelta, mueve el desplazador y este a su vez transfiere la mayor parte del aire de nuevo a la parte caliente del cilindro; en este punto el ciclo vuelve a iniciar. Ver figura 42.

Figura 42. **Fase de transferencia del motor Stirling tipo beta B**



Fuente: Motor Stirling. *Monocilíndrico*. <http://almadeherrero.blogspot.com/2007/11/motor-stirling-monocilindrico.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

2.2.4. Motor Stirling tipo gama

El tipo gama incorpora ideas de los dos anteriores; tiene las cámaras separadas para ambos pistones; se define perfectamente cuál pistón es el desplazador y cuál es el de potencia.

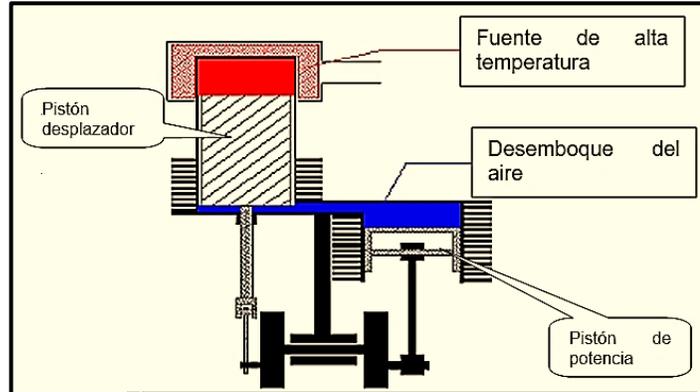
En la cámara designada al pistón desplazador se ubica la fuente de alta temperatura en un extremo y el desemboque del aire en el otro extremo (por lo general, la fuente de alta temperatura está más alejada del pistón de potencia que el desemboque), ver figura 43.

Por esta característica es posible diferenciar de mejor manera los espacios y condiciones en las que trabaja cada área.

El arreglo del motor Stirling tipo gama es mecánicamente más simple que los anteriores y es comúnmente utilizado para sistemas multicilindros.

También presenta un problema y es el de ofrecer una menor relación de compresión que los anteriores¹⁵.

Figura 43. **Diagrama del motor tipo gamma**



Fuente: *Tipos de motor Stirling*. <http://personales.able.es/jgros/gamma.htm>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

¹⁵ Stirling Engines. *For low temperature solar thermal electric power generation*. p. 32.

3. PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE CONSTRUCCIÓN

Toda la información que se expone a continuación es con base en el estudio y análisis de los capítulos anteriores en donde se describen las características de cada tipo de motor Stirling; se pretende abarcar todas las ventajas y desventajas que podrían presentarse a la hora de elaborar, acoplar e instalar un sistema de motor Stirling, independientemente, del tipo de motor que se seleccione.

3.1. Planteamiento de alternativas

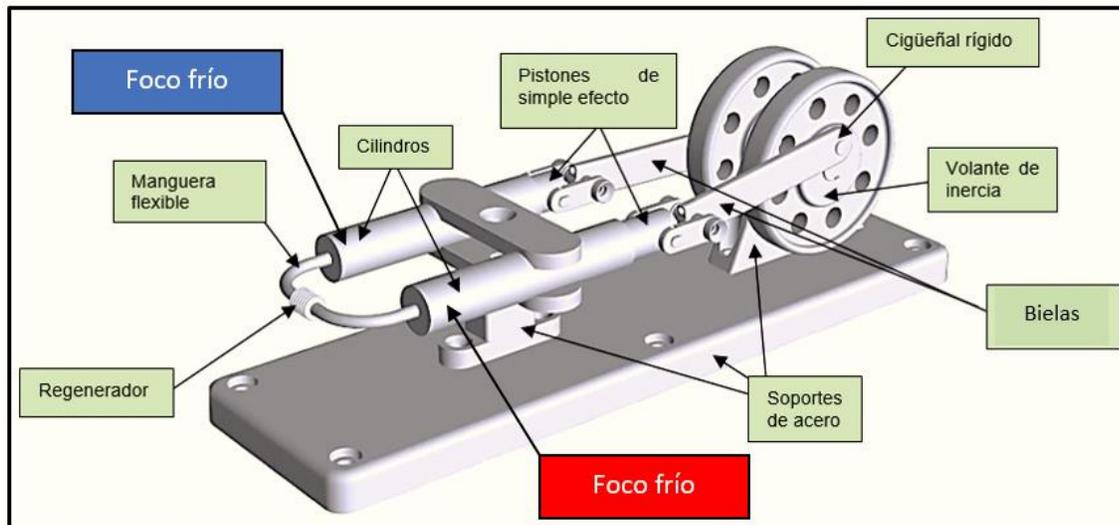
Cada alternativa tiene características termodinámicas propias debido a la forma como se acoplan sus elementos; en esta sección se busca seleccionar un modelo a construir con base en las características, ventajas y desventajas de cada alternativa; se proponen las siguientes:

- Alternativa 1: motor tipo alfa
- Alternativa 2: motor tipo beta
- Alternativa 3: motor tipo gama

3.1.1. Alternativa 1: motor tipo alfa

A continuación, se presenta la alternativa 1.

Figura 44. Configuración de la alternativa motor alfa



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.
Consulta: 4 de noviembre de 2017.

3.1.1.1. Características del motor tipo alfa

- Consta de pistones de simple efecto acoplados por un cigüeñal rígido que permite un desfase de 90° en el movimiento.
- Se plantea tener dos pistones de las mismas dimensiones construidos en vidrio, bronce, aluminio o acero.
- Cada pistón debe trabajar dentro de un cilindro también de vidrio, bronce, aluminio o acero con un ajuste de apriete de 0,1 mm entre el cilindro y el pistón.

- Cada cilindro tiene una zona de conexión para acoplar la manguera flexible, misma que conecta en su extremo al regenerador.
- El regenerador consiste en una malla de aluminio dentro de un contenedor cilíndrico de acero.
- El cigüeñal de acero tiene en su parte central un volante de inercia en el que se anclan las dos bielas que se encuentran separadas angularmente 90° entre sí.
- El soporte de acero permite ubicar a los dos cilindros en forma opuesta y con la separación correcta. También, permite soportar el peso del cigüeñal y el volante de inercia.
- Las bielas tienen una distancia entre los centros de los alojamientos de acople que es mayor a 3 veces la carrera del pistón.

3.1.1.2. Ventajas del motor tipo alfa

- Mantiene separados al foco frío del foco caliente.
- Los volúmenes muertos del fluido de trabajo se encuentran prioritariamente en el regenerador y en las mangueras.
- No requiere desplazador (el desplazador empuja el límite del fluido de trabajo proporcionalmente al peso del volumen del gas desalojado).
- Se tiene un bajo número de piezas diferentes ya que los dos pistones tienen la misma geometría, al igual que los dos cilindros.

- La holgura entre el cilindro y el pistón permite tener un excelente sellado.
- El cigüeñal con el volante de inercia en el centro permite ahorrar espacio y material de construcción.
- Por la forma del movimiento excéntrico de las bielas, se pueden alcanzar eficiencias mayores que las que se obtienen con motores tipo gamma.
- La sujeción de los cilindros permite modificar su cercanía al eje del cigüeñal y de esta manera se puede reducir el volumen muerto entre la cabeza del pistón y el fondo del cilindro.

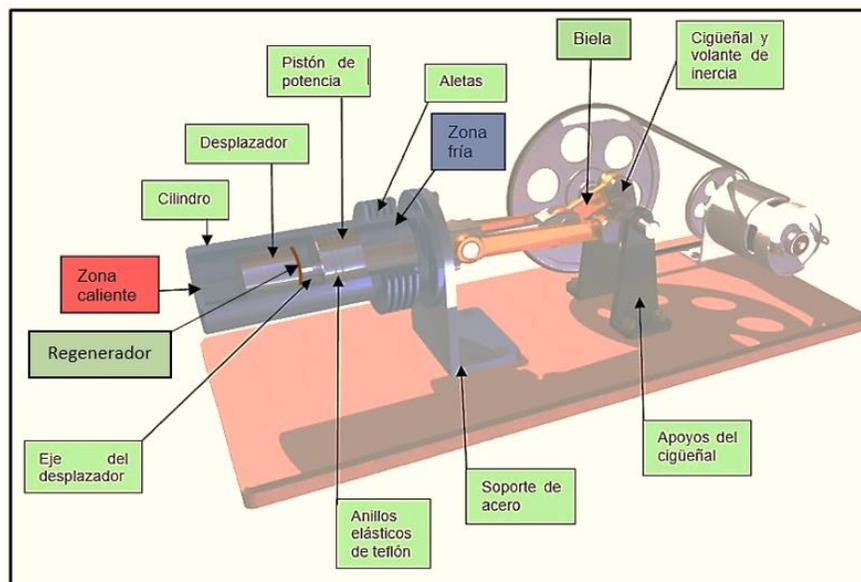
3.1.1.3. Desventajas del motor tipo alfa

- La construcción del cigüeñal con el volante de inercia en el centro es más complicada que la construcción de este, separado del volante de inercia.
- El soporte requiere un buen alineamiento entre los apoyos del cigüeñal.
- Para lograr una holgura muy pequeña es necesario utilizar un proceso más sofisticado como el mecanizado con control numérico computarizado (CNC).
- El método de sujeción de los cilindros es impreciso porque estos van anclados a un solo soporte de acero, el cual no sujeta toda la superficie de los cilindros a lo largo de su longitud.

3.1.2. Alternativa 2: motor tipo beta

A continuación, se presenta la alternativa 2.

Figura 45. Configuración de la alternativa motor beta



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

3.1.2.1. Características del motor tipo beta

- Utiliza un pistón de potencia de simple efecto y desplazador dentro del mismo cilindro, estos se encuentran acoplados por un cigüeñal que desfasa el movimiento de cada uno 90° .
- El pistón es fabricado en vidrio, bronce, aluminio o acero; consta de tres anillos elásticos de teflón.

- El pistón debe trabajar dentro del cilindro; también de vidrio, bronce, aluminio o acero; con una holgura diametral máxima de 0,1 mm entre cilindro y pistón.
- El pistón describe una trayectoria lineal dentro del cilindro. En la parte central del pistón existe un agujero pasante, mismo que es atravesado por un eje, parte del desplazador, conectado al cigüeñal. Además, el alojamiento de la biela del pistón de potencia se encuentra en una posición excéntrica en la parte superior del pistón como se observa en la figura 45.
- El desplazador sirve para trasladar el fluido de trabajo de la zona caliente a la zona fría y viceversa. Es un cilindro hueco construido de bronce, aluminio o acero y se acopla al cilindro con una holgura diametral de 3 mm. En una de sus caras debe tener un agujero centrado, mismo que aloja al eje que conecta el desplazador con el cigüeñal.
- El regenerador va acoplado al desplazador y es una fina lámina de aluminio de 0,5 mm de espesor. El regenerador es un intercambiador interno de calor que temporalmente almacena y sede calor para que de esta forma se lleve a cabo el ciclo.
- El cilindro es fabricado con bronce, aluminio o acero y en su parte superior existe un arreglo de aletas planas concéntricas, mismas que permiten evacuar el calor en la zona fría.
- El cigüeñal de acero tiene la configuración adecuada para generar el movimiento armónico del desplazador con el desfase de 90°. Tiene en uno de sus extremos el volante de inercia al cual se ancla un brazo excéntrico.

- El soporte de acero permite ubicar adecuadamente al motor y está formado por dos partes que se unen mediante el cigüeñal y el anclaje en el cilindro. Soporta el peso del motor y del cigüeñal.
- La biela mantiene una distancia entre los centros de los alojamientos de acople que es mayor a 3 veces la carrera del pistón.

3.1.2.2. Ventajas del motor tipo beta

- Los volúmenes muertos del fluido de trabajo se reducen al mínimo ya que el pistón de potencia y el desplazador se encuentran en un mismo cilindro.
- Si el cilindro es de aluminio permite tener una buena transferencia de calor en el foco frío y en el caliente. El regenerador también de aluminio cede y recibe calor con una relativa rapidez.
- La baja holgura entre el cilindro y el pistón en conjunto con los anillos de teflón en el pistón mantienen la presión dentro del cilindro.
- La combinación del volante en el cigüeñal permite reducir dimensiones del motor.
- La transferencia de calor desde la zona fría hacia el ambiente se realiza de manera más rápida por la utilización de aletas.
- La sujeción del cilindro al soporte permite modificar su distancia al cigüeñal y de esta manera se modifican volúmenes muertos del fluido de trabajo.

- La configuración del motor tipo beta permite alcanzar eficiencias mayores que en motores alfa y gamma ya que los volúmenes muertos son muy pequeños y la transferencia de calor más rápida y eficiente.

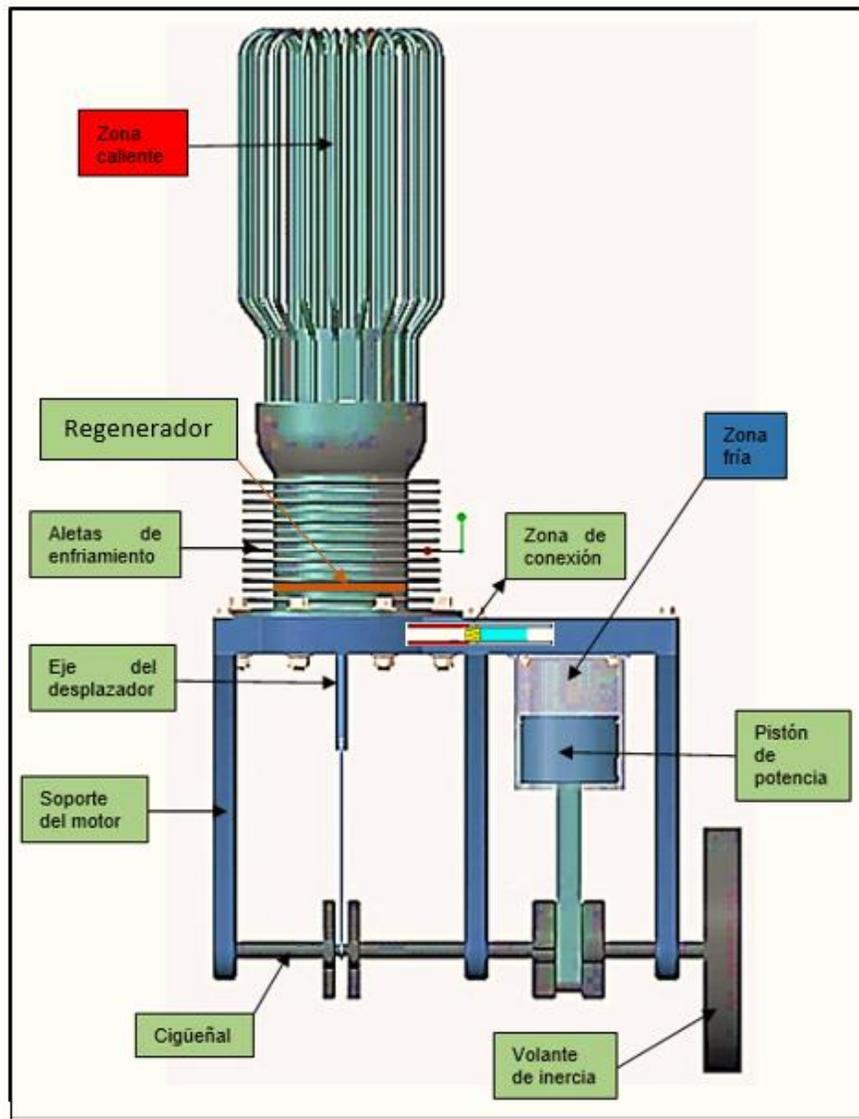
3.1.2.3. Desventajas del motor tipo beta

- La construcción del cigüeñal y volante de inercia como un solo elemento es más compleja, que hacerlos separados.
- Para la construcción de este motor se necesitan varias piezas: bielas de diferentes dimensiones, un pistón, un desplazador – regenerador, un apoyo con dos partes, entre otras.
- Los procesos para la fabricación de pistón, desplazador y anillos elásticos requieren alta precisión y un buen acabado superficial para así disminuir rozamientos y evitar fugas del fluido de trabajo.
- Existe gran desperdicio de material (bronce, aluminio o acero), pues la fabricación del motor implica los procesos con arranque de viruta, lo que aumenta el costo del motor.
- No existe una diferenciación clara entre la zona fría y la zona caliente porque ambas zonas están divididas únicamente por el regenerador y los pistones están montados en el mismo cilindro.
- Dificultad para acoplar el regenerador al desplazador.

3.1.3. Alternativa 3: motor tipo gamma

A continuación, se presenta la alternativa 3.

Figura 46. Configuración de la alternativa motor gamma



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

3.1.3.1. Características del motor tipo gamma

- Consta de un pistón de potencia y desplazador acoplados por un cigüeñal que desfasa su movimiento en 90°.
- El pistón de potencia y el desplazador se encuentran en cilindros diferentes cuyos ejes están paralelos.
- El pistón de potencia es de vidrio, bronce, aluminio, grafito o acero con tres anillos elásticos de teflón.
- El pistón debe tener una holgura diametral con el cilindro; también de vidrio, bronce, aluminio o acero, de 0,1 mm.
- El cilindro que aloja al pistón de potencia tiene en su parte superior una zona de conexión para acoplar una manguera o un tubo al cilindro donde está el desplazador – regenerador.
- El desplazador traslada el fluido de trabajo de la zona fría a la zona caliente y viceversa. Es un cilindro hueco de acero que guarda una holgura diametral máxima de 3 mm con el cilindro de aluminio donde se aloja; tiene un agujero central que permite acoplar un eje que lo conecta a su biela.
- El regenerador es una placa de aluminio de 0,5 mm de espesor que temporalmente almacena y cede calor para cumplir el ciclo y se encuentra alrededor del desplazador.

- El cilindro que contiene al desplazador se caracteriza por un arreglo de aletas que se ubica en su parte inferior.
- Para garantizar la hermeticidad del cilindro donde está el desplazador, se tiene una tapa con un agujero central pasante y un excéntrico. El primero sirve como guía para el eje del desplazador y el segundo para conectar la manguera con el cilindro del pistón de potencia.
- El soporte del motor se encuentra formado por dos elementos laterales de iguales dimensiones. Las zonas de alojamiento de los cilindros tienen las dimensiones necesarias para el acople.

3.1.3.2. Ventajas del motor tipo gamma

- Los volúmenes muertos están principalmente en: manguera y regenerador. Estos volúmenes muertos se pueden controlar fácilmente reduciendo las longitudes de la manguera y/o del regenerador.
- El cilindro donde se aloja el desplazador, por ser de aluminio, permite una rápida transferencia de calor sobre todo en el extremo frío aleteado. El regenerador de aluminio permite que la recepción y la entrega de calor se den con rapidez.
- Los anillos de teflón en el pistón de potencia generan un buen sello que impide fugas del fluido de trabajo.
- El cigüeñal con volante de inercia permite disminuir dimensiones del motor.

3.1.3.3. Desventajas del motor tipo gamma

- No existe una separación definida entre la zona fría y la zona caliente, esta dependerá de la forma como se acoplen los cilindros y del espacio que se quiera utilizar para el ensamble del sistema.
- La eficiencia de este motor es generalmente menor a la de los motores beta y alfa.
- La construcción del cigüeñal y el volante de inercia como un solo elemento es más compleja que al realizarla por separado.
- Se necesitan buenos procesos de fabricación para reducir el rozamiento y evitar las fugas del fluido de trabajo por causa de este fenómeno.
- Los costos del motor son altos debido al desperdicio del material en el vaciado de los cilindros ya que la fabricación implica procesos con arranque de viruta.
- La sujeción de los cilindros en los soportes de la base del motor es imprecisa.
- Este modelo está formado por varias piezas, lo que aumenta su peso, costos de diseño, de fabricación y ensamblaje.
- La tapa del cilindro del desplazador debe dar la hermeticidad necesaria para que el ciclo funcione. Esto implica utilizar buenos sellos en la guía del eje del desplazador.

- El regenerador es difícil de adherir al desplazador.

3.2. Selección de alternativa

Para la selección del diseño del prototipo se tomarán como base los siguientes criterios:

- Un planteamiento individual de las piezas y elementos principales que lo constituyen.
- La disponibilidad de los materiales que ofrece el mercado local y la eficiencia del proceso. Estos criterios principales, compuestos por los siguientes subcriterios:
 - Costo: el proceso de fabricación implica costos de desperdicio de material, mismo que representa pérdida de tiempo en la construcción e incremento de gastos.
 - Fácil construcción y ensamblaje: cada alternativa presenta diferente nivel de dificultad para construir sus elementos y su posterior ensamblaje.
 - Eficiencia: cuanto mayor sea la eficiencia del motor, menor será el requerimiento de calor; en este caso menor será el diámetro del colector solar parabólico.
 - Bajo peso: debe ser manejable y transportable.

- Adaptabilidad: de este criterio dependen los soportes y la forma como se adaptará el motor a la estructura base del colector solar parabólico.

El prototipo consta de cuatro componentes primordiales y varios elementos que corresponden a cada uno, como se muestra en la tabla IX y en la figura 47.

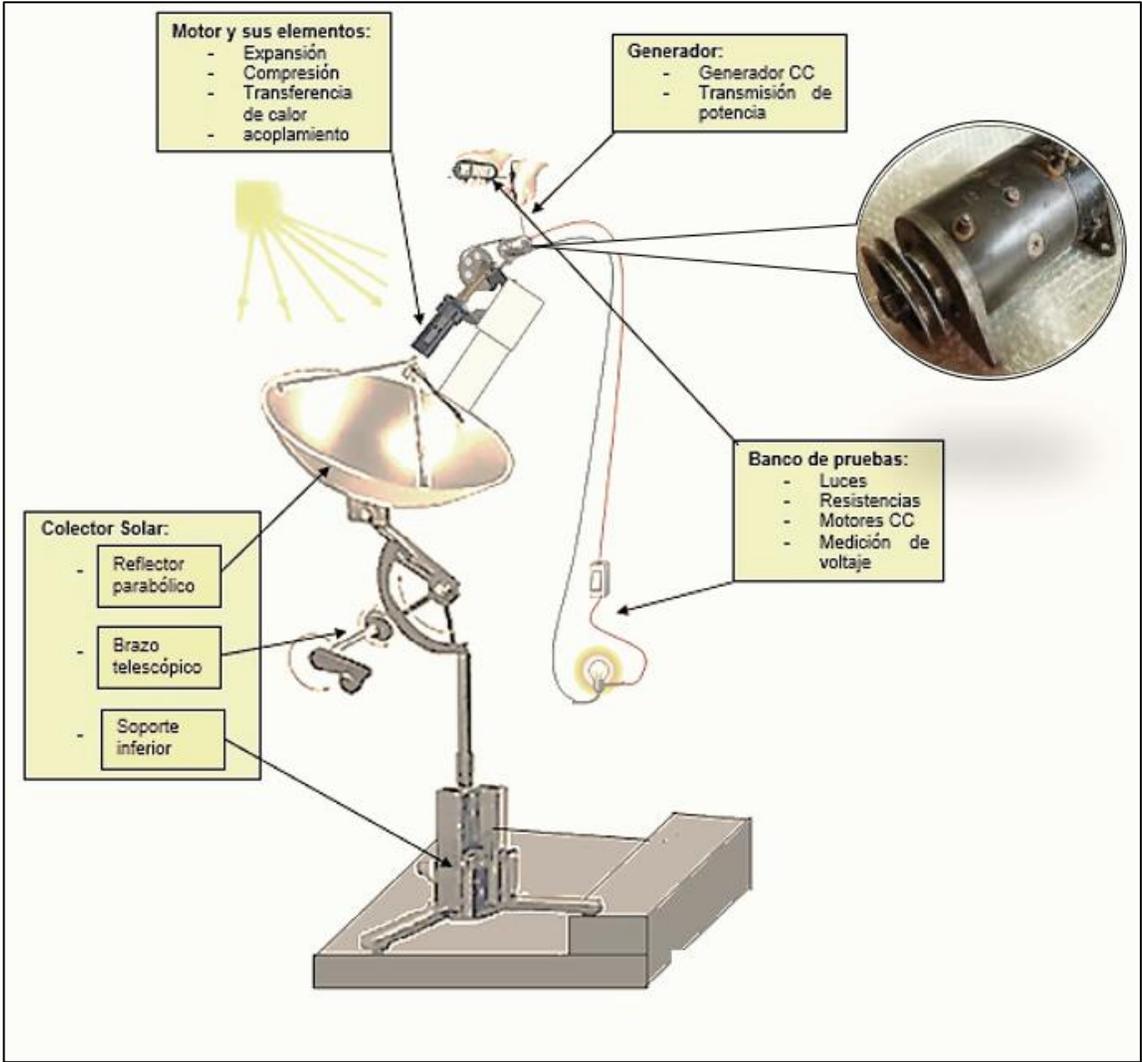
- Motor
- Generador
- Banco de pruebas
- Colector solar

Tabla IX. **Componentes que constituyen el prototipo**

Prototipo motor Stirling tipo alfa	
Motor	Elementos de expansión y compresión
	Elemento de transferencia de calor
	Elemento de acoplamiento
Generador	Generador CC
	Transmisión de potencia
Banco de pruebas	Luces
	Resistencias
	Motores eléctricos CC
Colector solar	Reflector parabólico
	Soporte inferior
	Brazo telescópico

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Componentes principales de un prototipo de motor Stirling tipo alfa



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

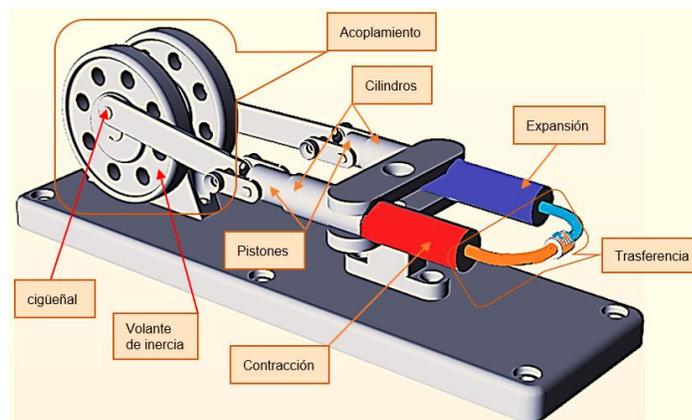
3.2.1. Motor

“El motor Stirling seleccionado es del tipo alfa, presenta un nivel medio de complejidad en la fabricación de sus partes, facilita el análisis y la comprensión del ciclo al mantener separados al foco frío del foco caliente, lo que permite visualizar por separado la transferencia de calor y la expansión, acoplados por medio de un mecanismo biela manivela”¹⁶.

El motor tipo alfa se compone de los siguientes módulos, como se muestra en la figura 48:

- Módulo de expansión y contracción
- Módulo de transferencia de calor
- Módulo de acoplamiento

Figura 48. Módulos del motor tipo alfa



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

¹⁶ Motor Stirling. *Motor tipo alfa*, sección 1.2.2.1. p. 14.

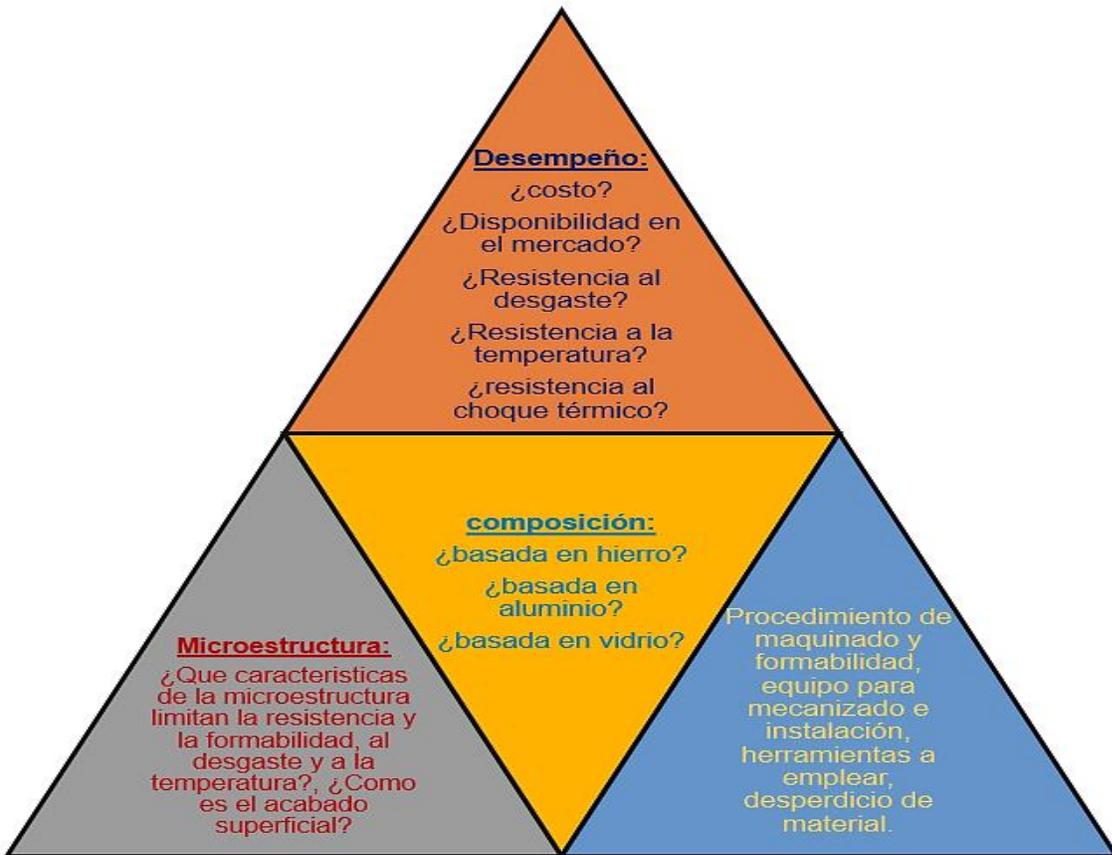
- Módulo de expansión y compresión: consta de cilindros, émbolos o pistones y anillos; estos elementos deben cumplir con las siguientes características:
 - Bajo coeficiente de fricción
 - Hermetismo
 - Resistencia al desgaste
 - Disponibilidad en el mercado local

En las tablas X, XI y XII se desarrolla el proceso de selección de materiales para la construcción de cada elemento del módulo de expansión. Utilizando la siguiente escala de criterios y ponderación:

- 1 muy desfavorable
- 2 desfavorable
- 3 regular
- 4 conveniente
- 5 muy conveniente

Los aspectos anteriores, se eligen con base en el tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales porque reflejará las diferentes disciplinas de esta ciencia en un solo diagrama que hace referencia a estructura, proceso, funcionamiento y propiedades de los materiales donde se analiza: desempeño, composición, microestructura y procedimiento de manufactura de los elementos con los materiales que se proponen; se toman en cuenta los aspectos que se muestran en la figura 49.

Figura 49. Tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales



Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

En la tabla XIII se indican los parámetros de selección del material para la elaboración de cilindros.

Tabla X. **Selección de material para cilindros**

TIPOS CILINDROS	Transparencia	Acabado Superficial	Cilindricidad	Resistencia Al Desgaste	Costo	Disponibilidad Mercado	Total
Cilindros de plástico	5	4	3	2	5	5	24
Cilindros de vidrio usados en jeringas	5	4	4	4	4	4	25
Cilindros de cuarzo usados en jeringas	5	5	5	5	1	2	23
Cilindros de aluminio usado en pistones neumáticos	1	4	4	4	2	5	20
Cilindros de acero usados en hidráulica	1	4	5	5	2	5	22

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

El material para la fabricación de cilindros se selecciona a partir de la tabla anterior sumando los criterios en consecuencia de su ponderación; vidrio y aluminio presentan un mejor acabado superficial después de mecanizados, mejor conservación de cilindridad, mayor resistencia al desgaste a altas temperaturas y disponibilidad en el mercado local.

En la tabla XI, se muestran los parámetros de selección del material para la manufactura del émbolo, considerando que el cilindro podría ser de vidrio o aluminio.

Tabla XI. Selección de material para embolo

TIPOS EMBOLOS	Transparencia	Acabado superficial	Cilindricidad	Resistencia al desgaste	Costo	Disponibilidad en el mercado	TOTAL
Émbolos de vidrio	5	4	4	4	4	4	25
Émbolos cerámicos	1	4	3	5	5	1	19
Émbolos aluminio	1	4	4	4	3	4	20
Émbolos de acero	1	4	4	5	3	4	21
Émbolos de plástico	4	3	3	3	5	5	23

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Según la tabla XI, el material para la fabricación de émbolos da como resultado, vidrio y aluminio; presenta un mejor acabado superficial después de mecanizados o moldeados, mejor conservación de cilindridad, mayor resistencia al desgaste a altas temperaturas y disponibilidad en el mercado local, con costos muy similares.

En la tabla XII se indican los parámetros de selección del material para la fabricación del sello del cilindro y el émbolo.

Tabla XII. **Selección de material para sello cilindro – embolo**

TIPOS ANILLOS	Transparencia	Bajo rozamiento respecto al vidrio	Acabado superficial	Resistencia al desgaste	Facilidad de construcción	TOTAL
Caucho	1	4	4	3	3	12
Grafito*	1	4	4	5	4	13
Metálicos	1	4	4	5	3	14
Teflón	1	4	4	5	3	14
Mercurio	1	5	5	5	1	16
SA(Sin anillo)	En necesario considerar la posibilidad de que el sistema no requiera de anillo.					
*Mientras el grafito no se humedezca, caso contrario la fricción se eleva.						

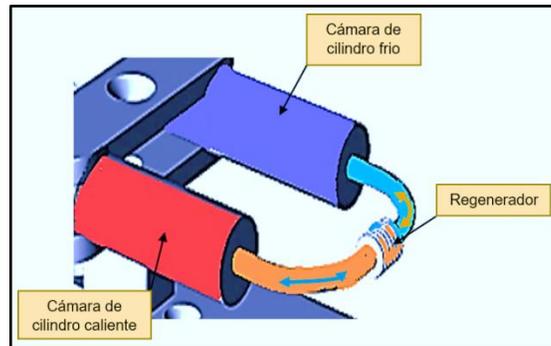
Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

La tabla anterior especifica la selección del material para la fabricación de sello en los cilindros - émbolos, el resultado de la ponderación indica que de acuerdo con los factores de construcción y desempeño durante su funcionamiento (pruebas de estanqueidad), rinden mejor los metálicos y de teflón que presenta bajo coeficiente de fricción en contacto con el vidrio, mejor acabado superficial, mayor resistencia al desgaste y facilidad de construcción.

Si fuese necesario que el sistema disponga de anillos para el sello mecánico, estos se fabricarán en teflón o metal.

- Módulo de transferencia de calor: mientras el cigüeñal sigue girando los próximos 90° la mayor parte de aire caliente se encuentra en la cámara del cilindro caliente y se traslada el de la cámara del cilindro frío, empujándolo a través del regenerador de aire, pasando por el cilindro caliente e ingresándolo nuevamente a la cámara del cilindro frío, como se muestra en la siguiente figura. Está compuesto de tubos de cobre y partículas de metal.

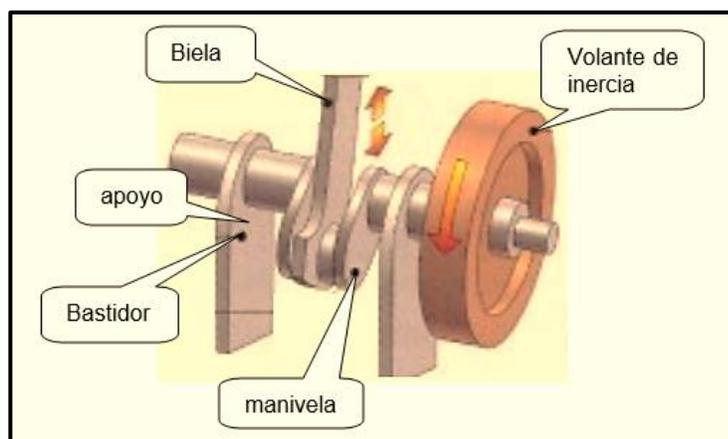
Figura 50. **Módulo de transferencia de calor**



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.
Consulta: 4 de noviembre de 2017.

- Módulo de acoplamiento: consta de un mecanismo biela - manivela, compuesto por los siguientes elementos: biela, manivela, apoyo, volante de inercia y bastidor.

Figura 51. **Módulo de acoplamiento**



Fuente: *Mecanismos*. http://www.aulatecnologia.com/BACHILLERATO/1_bg/APUNTES/mecanismos/imagenesmaquinas/ciguenal2.jpg. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

La selección del material para la construcción de sus partes se realiza con el mismo criterio y escala de los elementos anteriores, como se muestra en las tablas XIII-XVI.

Tabla XIII. Selección de material para biela

TIPOS DE BIELA	Baja Masa	Alta rigidez	Bajo Costo	Complejidad tecnológica	TOTAL
Tubular de acero	3	4	4	3	14
Tubular de cobre	3	4	3	4	14
Tubular de aluminio	4	3	3	3	13
Pletina de aluminio	4	4	2	2	12
Pletina de acero	3	4	2	2	11

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

De acuerdo con la tabla XIII, al sumar los valores de los criterios según su ponderación, el material para construir la biela debe ser tubular de acero, cobre o aluminio sólido, porque tienen baja masa y le restan peso al sistema adicionándole portabilidad; también, presentan alta rigidez y bajo costo de adquisición.

Tabla XIV. Selección de material para manivela

TIPOS DE MANIVELA	Baja Masa	Alta rigidez	Bajo Costo	Complejidad tecnológica	TOTAL
Disco de aluminio	2	5	4	2	13
Disco de bronce	2	5	2	2	11
Eje de acero	4	4	4	4	16
Eje de bronce	3	3	3	4	13

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Para la tabla XIV, el resultado de ponderación dice que es conveniente fabricar la manivela de un disco de acero, porque tiene mayor rigidez, bajo costo y menor complejidad tecnológica en el procedimiento para su manufactura y montaje.

Tabla XV. **Selección apoyos**

TIPOS DE APOYO	Capacidad de carga	Acabado superficial	Bajo Costo	Complejidad tecnológica	TOTAL
Rodamientos	5	5	1	1	15
Bocín de bronce	4	4	4	4	16
Bocín de acero	5	3	4	3	15

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

El resultado de la ponderación muestra que los rodamientos son los adecuados para la selección de apoyos, debido a su capacidad de carga, al acabado superficial, bajo costo de adquisición y la baja complejidad tecnológica para su montaje.

Tabla XVI. **Selección de la masa del volante de inercia**

TIPOS DE INERCIA	Alta Densidad	Bajo volumen	Bajo Costo	Complejidad tecnológica	TOTAL
Disco de plomo	5	5	2	2	14
Disco de aluminio	4	4	4	4	16
Masa y brazo variable	3	3	3	2	11

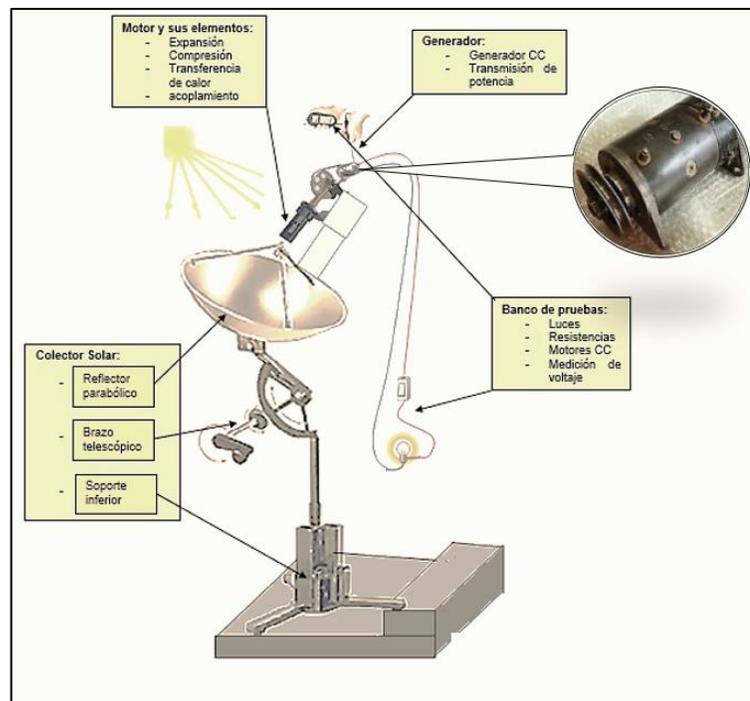
Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

El volante de inercia debe ser un disco de aluminio como se muestran en la tabla XVI, porque relaciona densidad y volumen lo que les dará un tamaño y peso acorde a los demás elementos instalados en el sistema, con costo y procedimiento de elaboración convenientes.

3.2.2. Generador

Consta del módulo generador y el módulo de transmisión y potencia. La selección del tipo de generador y la recopilación de sus partes se realiza con el mismo criterio y escalas de los elementos anteriores. Como se indica en las tablas XVII y XVIII.

Figura 52. **Generador**



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.

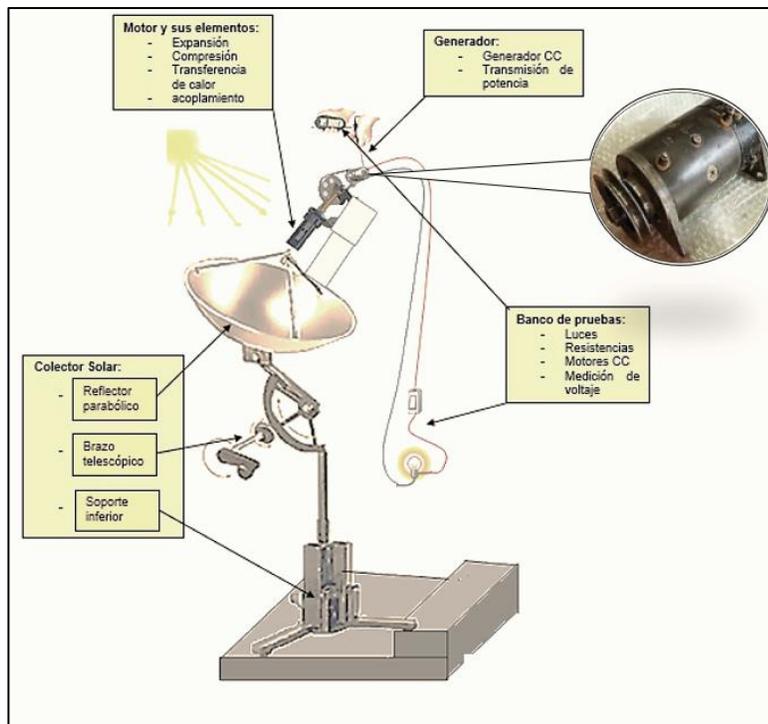
Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Tabla XVII. **Selección del generador de imanes permanentes**

TIPOS GENERADOR	Generación de Voltaje	Generación de Corriente	Revoluciones por minuto requeridas para generar	Bajo costo	TOTAL
Ferrita 6V	4	4	1	3	12
Ferrita 9V	4	4	2	2	12
Ferrita 12V Eólico	5	5	4	2	16

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Figura 53. **Selección del generador de imanes permanentes**



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

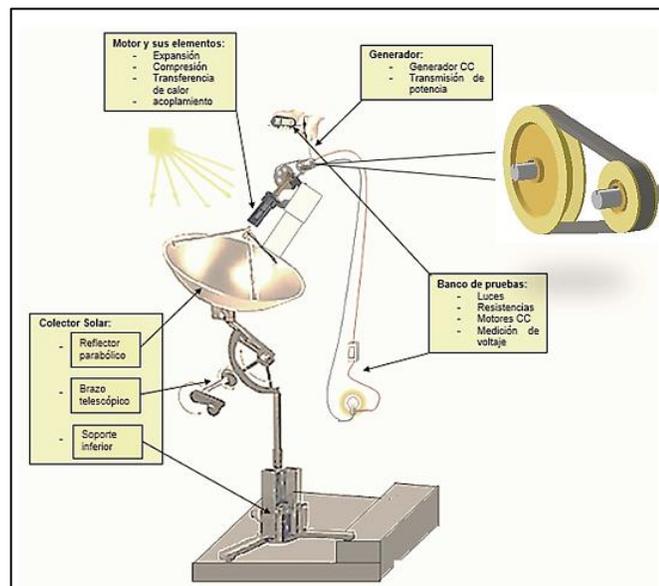
El generador de imanes permanentes debe ser del tipo ferrita de 12 V eólico, como se muestran en la tabla XVII, porque puede trabajar a bajas revoluciones generando suficiente voltaje a un bajo costo de adquisición.

Tabla XVIII. **Selección del mecanismo de transmisión de potencia**

TIPOS DE TRANSMISIÓN	Inercia	Deslizamiento	Bajo Costo	Complejidad tecnológica	TOTAL
Directa	3	2	2	3	10
Engranajes	2	1	2	2	7
Por banda plana	4	4	4	3	15
Por banda dentada	4	1	2	3	10

Fuente: *Introducción a la ciencia de ingeniería de los materiales*. <https://es.slideshare.net/anaya7101/1tema-i-introduccion-cienciaingriamateriales>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Figura 54. **Selección del mecanismo de transmisión de potencia**



Fuente: *Stirling Alpha Project – MCM*. <https://grabcad.com/library/stirling-alpha-project-mcm-1>.

Consulta: 4 de noviembre de 2017.

El mecanismo de transmisión de potencia debe ser por medio de una banda plana, como se muestran en la tabla XVIII, ya que esta permitirá una mejor inercia teniendo un bajo costo de adquisición y baja complejidad tecnológica para su instalación suavizando el acople entre el generador y el motor.

3.2.3. Banco de pruebas

Tiene como finalidad utilizar elementos definidos de carga que permitirán evaluar el desempeño del sistema energético, consta de los siguientes aparatos:

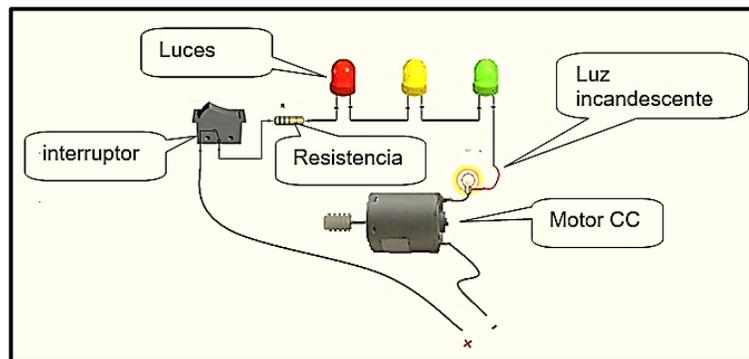
- Luces incandescentes: producen luz a partir del paso de corriente eléctrica a través de un filamento metálico. Aprovechan en iluminación solo un 5 % de la energía eléctrica que consumen, el 95 % restante se transforma en calor, sin aprovechamiento luminoso.

Son las de mayor consumo eléctrico, las más baratas y de menor tiempo de vida útil (alrededor de 1 000 horas).

- Luces led: son dispositivos semiconductores (diodos) que al polarizarlos de forma directa producen luz debido al paso de corriente eléctrica. Energéticamente, son más eficientes que las lámparas incandescentes, alcanzando regularmente hasta un 90 % de rendimiento. El equivalente a una bombilla se puede construir con una decena de led aproximadamente.
- Motores eléctricos CC: máquinas más utilizadas para transformar energía eléctrica en energía mecánica.

Los motores de corriente continua (CC) tienen un costo más elevado comparado con los de corriente alterna (CA), este tipo de motor se utiliza en casos especiales donde solo se cuenta con una fuente de corriente continua.

Figura 55. **Banco de pruebas**

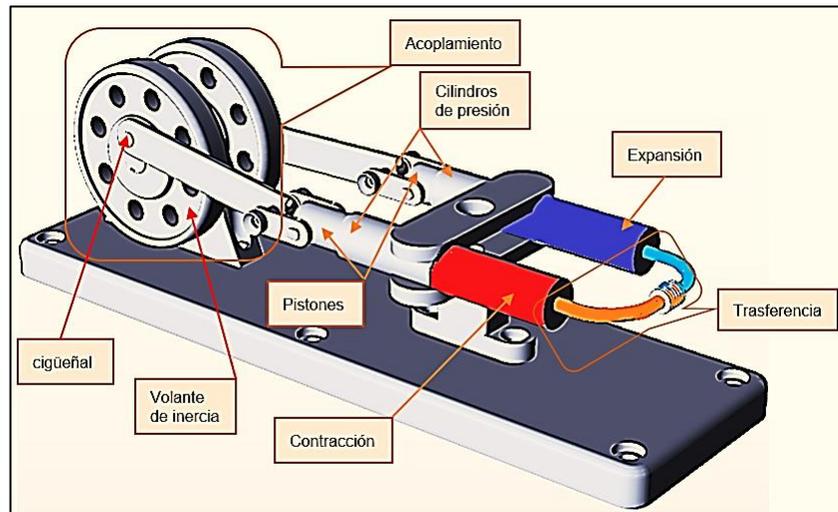


Fuente: elaboración propia.

4. DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL TIPO DE MOTOR SELECCIONADO

En este capítulo se analizará el diseño del tipo de motor seleccionado a partir de las partes que lo componen para tener un punto de partida para proceder con la propuesta del diseño de construcción del prototipo como tal; se realiza finalmente la descripción de las pruebas de funcionamiento.

Figura 56. **Diseño y dimensionamiento del motor Stirling tipo alfa**



Fuente: elaboración propia.

Para el diseño y dimensionamiento del motor Stirling tipo alfa, se establecen las características de construcción de sus elementos con base en los datos analizados y resultados obtenidos en las tablas X a la XVIII; de

manera que estas características se utilizaran para el dimensionamiento y montaje de los diferentes elementos que se enlistan en la tabla XIX.

Este será un diseño pensado para ser versátil y adaptable al funcionamiento por medio de la concentración de la luz solar como fuente de calor.

Se requiere de cilindros fabricados en un material que permita el sello entre los pistones para mantener la presión de trabajo con seguridad; tiene como únicas conexiones dentro y fuera del motor el proceso de calentamiento y enfriamiento del aire. Incluidas las conexiones eléctricas y la transmisión de potencia hacia el generador.

Tabla XIX. **Resumen de las características de construcción para el diseño de los elementos del sistema de generación Stirling tipo alfa**

Sistema	Modulo	Elementos del módulo	Material
Motor	Expansión y compresión	Cilindro	Vidrio o aluminio
		Émbolo	Vidrio o aluminio
		Sello	Teflón o metal
	Transferencia de calor	Regenerador de aire	Cobre y partículas de metal
	Acoplamiento	Biela	Acero, cobre o aluminio
		Manivela	Aluminio
		Apoyos	Rodamientos
		Volante de inercia	Aluminio
Bastidor		Aluminio	
Generador	Generador	Imanes permanentes	
	Transmisión de potencia	Banda plana	
Banco de pruebas	Luces	Incandescentes y led	
	Motores	6V o 9V de CC	

Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Análisis en el foco frío

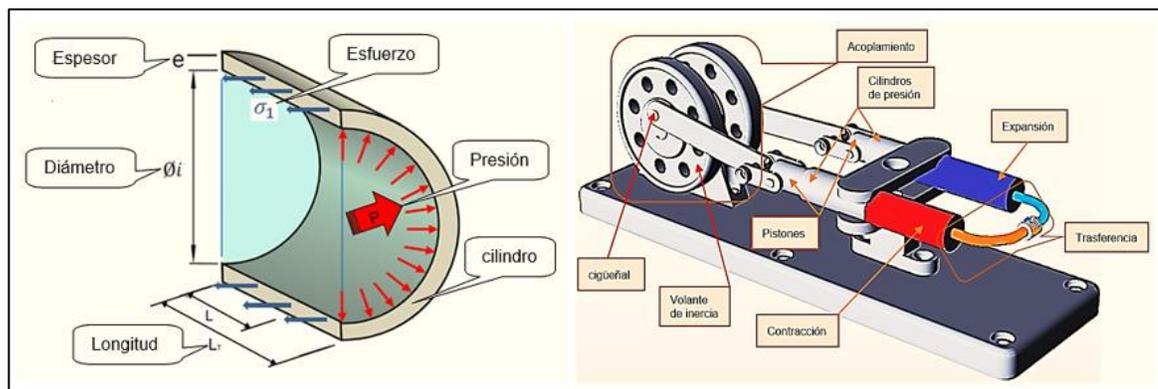
Este análisis es con base en la resistencia de los materiales utilizados para la construcción de los elementos y con base en la transferencia de calor del sistema. Los cuales se describen a continuación:

4.1.1.1. Cilindro de presión

La presión alcanzada en este tipo de cilindros es bastante baja, lo que permite alcanzar la resistencia necesaria con un espesor de pared delgado.

Sin embargo, si se desea conocer la resistencia necesaria para una operación más segura, esta se puede calcular asumiendo que el elemento se expone a la compresión máxima a una longitud L , medida desde el fondo del cilindro, considerando que la presión es soportada por las paredes del cilindro, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 57. Esquema de presión y esfuerzo en el cilindro



Fuente: elaboración propia.

Al realizar un diagnóstico estático se desarrolla la ecuación mostrada en la tabla XX, para determinar el espesor adecuado para la presión deseada.

“Se debe conocer la presión manométrica (según el Insivumeh de acuerdo con los promedios mensuales y anuales de presión atmosférica en milímetros de mercurio (mmHG); el último dato publicado fue en 2012 (640,4 mmHG))”¹⁷.

Tabla XX. **Ecuación de análisis estático para un cilindro a compresión**

Análisis estático de cilindros a compresión	$P * \varnothing_i * L = \sigma_i * (\varnothing_i + 2L_T) * e$	<ul style="list-style-type: none"> • P = presión manométrica en Guatemala. • \varnothing_i = diámetro interior del cilindro. • L = longitud a la que se alcanza la presión máxima. • σ_i = resistencia del material sometido a fatiga. • L_T = longitud total del cilindro. • e = espesor de pared del cilindro.
---	---	--

Fuente: elaboración propia.

Para valores de presión muy pequeños y diámetros pequeños, al desarrollar la ecuación mostrada en la tabla XX. Seguramente se obtendrá un valor del espesor de la pared del cilindro demasiado pequeño; sin embargo, este análisis se vuelve importante cuando se tienen presiones mayores y grandes diámetros de pistones. Por facilidad constructiva y para evitar

¹⁷ Insivumeh. *Presión atmosférica*. http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/estaciones/guatemala/Insivumeh/Presion_Atmosferica_Insivumeh.htm. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

deformaciones durante la manipulación del cilindro, se puede establecer un espesor de pared $e = 3$ mm tanto para el foco frío como para el foco caliente.

4.1.1.2. Pistón, 1

Cuando son presiones de valores bajos no se hace necesario el análisis de resistencia del pistón; más bien, aplicar los parámetros geométricos y criterios constructivos adecuados para este tipo de elementos.

El pistón es un componente de revolución que encierra al fluido de trabajo dentro del cilindro por medio de un movimiento oscilante hacia adentro y hacia afuera. Los pistones usados para generar trabajo con un gas como fluido de trabajo se encuentran en los motores de combustión interna de ciclo Otto y de ciclo diesel, extendiéndose más a motores de automóviles.

El diámetro del pistón debe ser ligeramente menor al diámetro interior del cilindro, presentando una holgura adecuada que permita el ingreso del pistón dentro del cilindro y también para adaptarse en caso de una sobre temperatura con respecto a la del cilindro y se trabe por dilatación.

4.1.2. Análisis en el foco caliente

En el foco caliente no es necesario realizar un análisis con base en la resistencia del material, tomando en cuenta que se tienen condiciones similares de presión a las del cilindro del foco frío.

4.1.2.1. Cilindro de presión

En la sección 4.1.1.1 se estableció a partir del análisis de resistencia a la presión del cilindro frío, que el espesor de pared será de 3 mm teniendo entonces las mismas condiciones de presión y esfuerzos en el cilindro caliente, se puede mantener este valor de 3 mm.

4.1.2.2. Pistón, 2

Este también es similar al del foco frío en cuanto a la resistencia a la presión y su geometría.

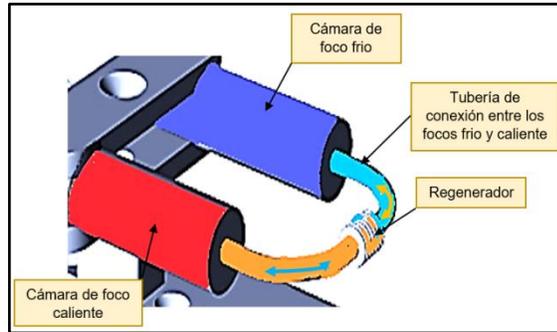
Pero se debe tomar en cuenta que aquí la temperatura de trabajo es mayor requiriendo entonces una holgura mayor entre el pistón y el diámetro interno del cilindro porque existe mayor dilatación del material.

El diámetro del pistón deberá ser ligeramente menor al diámetro interno del cilindro; presenta una holgura adecuada para lograr el ingreso del pistón dentro del cilindro evita quedarse trabado en presencia de un posible caso de sobre temperatura del pistón con respecto a la temperatura del cilindro.

4.1.3. Dimensionamiento de tubería de conexión entre foco frío y foco caliente

En la conexión del volumen frío con el volumen caliente es necesario utilizar tubería de cobre correctamente dimensionada para evitar pérdidas de presión excesivas que podrían reducir la potencia del motor e incluso impedir su funcionamiento.

Figura 58. **Tubería de conexión entre foco frío y foco caliente**



Fuente: elaboración propia.

Para el dimensionamiento de la tubería de conformidad con el texto Stirling Engine Design Manual de la National Aeronautics and Space Administration refiere la utilización del criterio mostrado en la ecuación que se plantea en la tabla XXI.

Tabla XXI. **Ecuación para el cálculo de pérdida de presión en la tubería de conexión del foco frío con el foco caliente**

<p>Pérdida de presión en la tubería de conexión del foco frío con el foco caliente, debido a su longitud y diámetro.</p>	$DP = \frac{2 \cdot f_{fr} \cdot GH^2 \cdot L_{tub}}{G1 \cdot \phi_i \cdot \rho_{gas}}$	<ul style="list-style-type: none"> • DP = pérdida de presión en la tubería [MPa]. • ffr = factor de fricción en la tubería. • GH = flujo másico del fluido de trabajo por unidad de área [g/s·cm²]. • Ltub = longitud de la tubería de conexión [cm]. • G1 = constante de conversión = 10⁷ [g/ (MPa · seg² · cm)]. • ϕ_i = diámetro interno de la tubería. • Pgas = densidad del fluido de trabajo a temperatura intermedia [g/cm³]
--	---	--

Fuente: elaboración propia.

El cigüeñal es un elemento mecánico empleado para transformar un movimiento lineal alternativo en movimiento rotacional.

Para esta transformación se requiere aplicar el principio del mecanismo biela – manivela. Se compone de un eje rectilíneo con codos excéntricos y contrapesos.

La biela es capaz de entregar la fuerza a una distancia x del eje de rotación del cigüeñal a partir de los codos excéntricos logrando un torque considerable que permite el movimiento rotacional.

El cigüeñal es equilibrado por los contrapesos para evitar vibraciones derivadas de un desbalance proveniente del motor o del sistema de transmisión de potencia.

Se alcanza un balance perfecto cuando el centro de gravedad coincide con el eje de rotación. El análisis del centro de gravedad se puede realizar manualmente o con la ayuda de algún software.

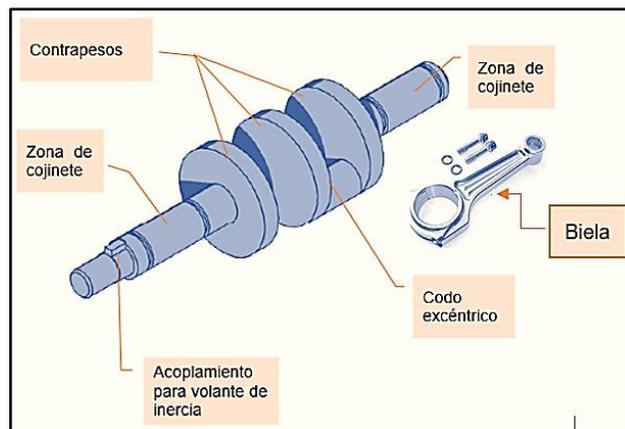
El diseño y el dimensionamiento de un cigüeñal se elabora con base en los requerimientos específicos de funcionamiento:

- Requiere codos separados angularmente a 90° .
- El eje de cada codo debe estar exactamente a una distancia equivalente a la mitad de la carrera total de la biela con respecto al eje del cigüeñal.
- En uno de sus extremos debe contar con un volante de inercia.

- Es necesario que el material seleccionado para su construcción cumpla con las dimensiones constructivas; dando la resistencia adecuada permitiendo su manufactura por los métodos de fabricación disponibles en el medio local.
- Es extremadamente importante que esté completamente balanceado.

En la figura 57 se muestra un esquema típico de un cigüeñal y la identificación de las partes que lo componen.

Figura 59. **Esquema típico de un cigüeñal y sus partes**



Fuente: elaboración propia.

4.1.4. **Diseño del volante de inercia**

El volante de inercia es un elemento mecánico que almacena energía cinética rotacional en un sistema; estabiliza de esta manera la velocidad de rotación del eje. Es decir, se encarga de conservar la rotación de velocidad de un eje a una velocidad casi constante, es utilizado generalmente para

aplicaciones en máquinas troqueladoras, prensas, motores, compresores alternativos y otras máquinas que trabajan con movimiento rotacional.

Figura 60. **Volante de inercia**



Fuente: *Piezas del motor*. <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1Zz6FNVXXXXbpXXq6xXFX00/Volante-de-inercia-de-la-rueda-DIY-piezas-del-motor-font-b-Stirling-b-font-la.jpg>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

En la presente aplicación de un volante de inercia, se requiere que este almacene la energía que el cigüeñal le entrega en la fase de generación de trabajo; devuelve una parte de esta energía para hacer girar el cigüeñal entregándole el trabajo necesario para continuar con el ciclo termodinámico.

4.2. Construcción del motor Stirling tipo alfa

Los elementos para un motor Stirling tipo alfa pueden ser fabricados en su mayor parte en talleres de máquinas y herramientas; algunos elementos como tornillos, chavetas, tubos, platinas de anclaje, entre otros, se pueden comprar en el mercado local.

A continuación, se describen los elementos más importantes para el montaje y la puesta en marcha de un motor Stirling tipo alfa.

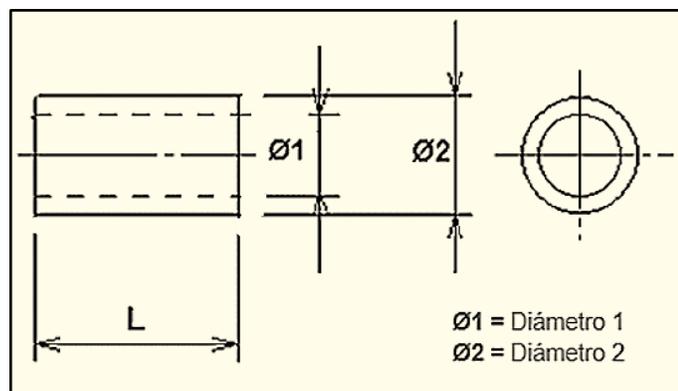
4.2.1. Cilindro de presión para el foco caliente

Para la construcción de este cilindro se deberá utilizar material de vidrio o aluminio, ya que estos presentarán un mejor acabado superficial después de mecanizados, mejor conservación de cilindridad y mayor resistencia al desgaste a altas temperaturas.

Es importante tomar en cuenta el espesor, la longitud y el diámetro interior del cilindro; estas medidas deben ser correspondientes y acordes a la carrera de desplazamiento y deslizamiento del pistón dentro del cilindro.

No se requieren diseños complejos de construcción; en la figura 61 se propone un diseño simple y funcional, que también podría adaptarse a partir de una jeringa de vidrio.

Figura 61. **Diseño de cilindro de presión para el foco caliente**



Fuente: elaboración propia.

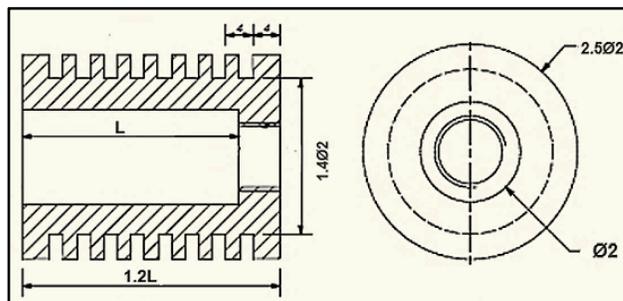
4.2.2. Cilindro de presión para el foco frío

Las características de este cilindro deben ser iguales a las del cilindro de presión para el foco caliente, aquí también se necesita un buen acabado superficial después del mecanizado, conservación de cilindridad y resistencia al desgaste por fricción. El cilindro deberá ser de vidrio o aluminio.

En motores que operan a temperaturas elevadas, podría hacerse necesario el uso de disipadores de calor, estos se podrán acoplar concéntricamente al cilindro del foco frío y foco caliente en forma de aletas.

En la figura 62 se muestra un diseño simple y fácil de adaptar al cilindro propuesto en la figura 61.

Figura 62. **Diseño de disipador de calor para cilindros de presión**



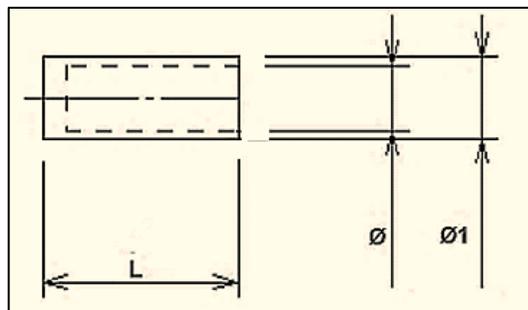
Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Pistón, 3

Deberá fabricarse en material de vidrio o aluminio, es importante aplicar criterios geométricos y criterios constructivos adecuados, ya que este elemento encerrará el fluido de trabajo dentro de los cilindros.

Recuérdese también que el diámetro de este debe ser ligeramente menor al diámetro interno del cilindro para evitar atoramientos por dilatación del material debido a los choques térmicos que podrían presentarse durante la operación del sistema. Su manufactura puede realizarse a partir del diseño que se presenta en la figura 63.

Figura 63. **Diseño de pistón**



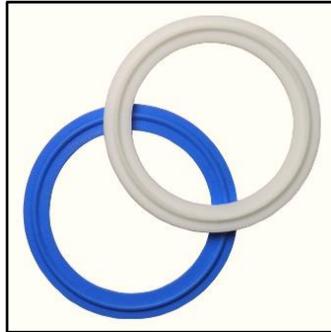
Fuente: elaboración propia.

4.2.4. **Anillos elásticos de teflón**

Representan bajo coeficiente de fricción en contacto con el vidrio y el aluminio; también, mejor acabado superficial comparado con otros materiales, fácil construcción y gran resistencia al desgaste.

No siempre se hace necesario su uso, dependerá del nivel de estanqueidad que se alcance en el sistema.

Figura 64. **Anillos elásticos de teflón**



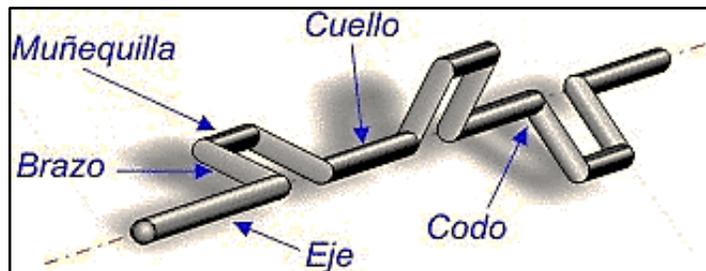
Fuente: *Anillos de teflón*. https://www.google.com.gt/search?q=anillos+de+teflon&rlz=1C1CHZL_esGT691GT691&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=VqhPqfm-qbJIDM%253A%252CAJur-OZGJRBpNM%252C_&usg=__oTYC7wt1_jyD8_j5k9KmAbz7GY%3D&sa=X&ved=0ahUKEwi_qND5qtHaAhWC0FMKHUSeAL4Q9QEIMTAF#imgdii=ZyGCOuE5pfug2M:&imgrc=P_XLDRX520Y7RM:. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.5. Eje

Su principal función es soportar los componentes en rotación y movimiento axial, por medio del cual el motor lleva a cabo su trabajo adecuadamente. Debe poseer gran resistencia a las variaciones térmicas y movimiento axial.

Es importante que la longitud del eje sea lo más corta posible, con esto se minimizan las deflexiones en el material y se facilita la correcta alineación de los elementos que se van a soportar en él.

Figura 65. **Eje para soporte de componentes del motor**

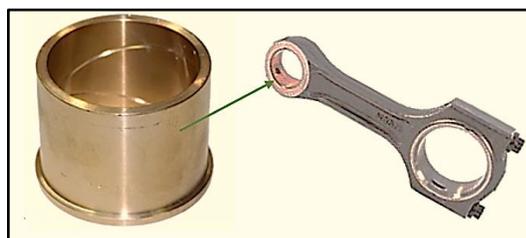


Fuente: *Operadores*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/operadores/imagenes/ope_ciguenal01.gif. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.6. **Buje de biela**

Cojinete de metal que permite el ajuste del perno del pistón con la biela; se debe construir a partir de un material sólido de bronce grafitado; debe estar correctamente centrado, refrentado y cilindrado tanto en el exterior como en el interior. Para dar el acabado final se requiere el uso de lijas con granulometría fina que permitan un acabado tipo espejo, como se muestra en la figura 60.

Figura 66. **Buje para biela**



Fuente: *Repuestos para tractor*. <https://static.aastatic.com.ar/media/clasificados/Repuestos/Repuestos%20para%20Tractores/m/buje-de-punta-de-eje-para-tractor-fiat-780r-60r-2016-3-9-19-19-10-0.jpg>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.7. Buje para el soporte del cigüeñal

Este ajusta el soporte del cigüeñal con un extremo de la biela, generalmente, se construye de bronce grafitado y debe cumplir con las correctas medidas de alineación.

Para el mecanizado final se hace necesario el uso de lijas con granulometría fina que permitan un acabado superficial tipo espejo, sin rayones ni excesos de material en los bordes. En la figura 67 se muestra un buje de cigüeñal con las características recién expuestas.

Figura 67. Buje para soporte de cigüeñal



Fuente: *Cigüeñal*. <http://www.dieselstore.com.ve/shop/141-214-thickbox/bujes-biela-international-dt466.jpg> Cigüeñal. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Transforma el movimiento rotacional en movimiento lineal alternativo por medio de un mecanismo biela – manivela, debe ser fabricado en acero SAE 1045 o similar.

Es importante que las zonas de apoyo e instalación de cojinetes y codos excéntricos cuenten con un buen acabado superficial para evitar desgastes por fricción y vibraciones excesivas en el sistema.

Este también debe permitir en uno de sus extremos el acople de un volante de inercia y en el otro extremo el acople de un mecanismo de transmisión de potencia, como se muestra en la figura 68.

La manufactura de este elemento se lleva a cabo por medio de procedimientos de torneado, bajo estrictos procedimientos de medición, hasta obtener las dimensiones y formas requeridas para el diseño.

Figura 68. **Cigüeñal**



Fuente: *Cigüeñal*. <http://www.dieselstore.com.ve/shop/141-214-thickbox/bujes-biela-international-dt466.jpg>Cigüeñal. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.8. volante de inercia

Este elemento debe ser construido a partir de una placa de aluminio o acero SAE 1045, por medio de operaciones de mecanizado en el torno y en el taladro, hasta obtener el diámetro y espesor requeridos.

Es necesario balancear el volante de inercia, realizando perforaciones de diferentes diámetros y distancias medidas del centro de la pieza; además, un corte tangencial a la circunferencia para obtener una forma similar a la que se muestra en la figura 69.

Figura 69. **Volante de inercia**



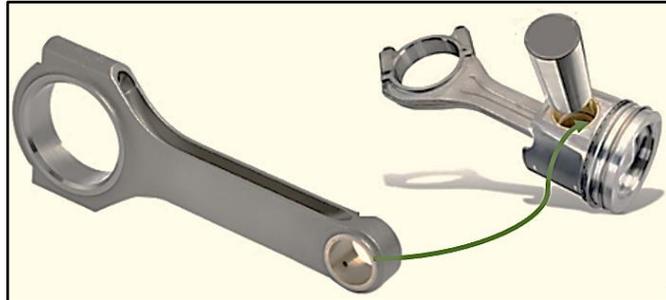
Fuente: *Volante de inercia de la rueda*. <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1Zz6FNVXXXXbpXpXXq6xXFXXX0/Volante-de-inercia-de-la-rueda-DIY-piezas-del-motor-font-b-Stirling-b-font-la.jpg>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.9. Biela

Se necesitan dos bielas en el sistema del motor Stirling tipo alfa, deberán construirse de un eje rectangular o cilíndrico que permita realizar en un extremo la conexión del pistón para introducirlo en el cilindro, y en el otro, la conexión con el cigüeñal, convirtiendo el movimiento circular del eje del cigüeñal en movimiento axial alternativo.

De forma general, una biela se representa como el esquema que se muestra en la figura 70.

Figura 70. **Esquema general de una biela**



Fuente: *Biela*. <http://www.hurricanerods.com/upfile/product/Forged-H-Beam-6.250-Chevy-SBC-350-400-Connecting-Rod.png>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.10. Soporte para el cigüeñal

Utilizar tubo cuadrado de aluminio, una placa cuadrada de aluminio, fijar los tubos a la placa y en el otro extremo de los tubos acoplar los rodamientos para sujetar el eje del cigüeñal.

La altura del soporte debe ser adecuada para el correcto acoplamiento de los pistones y cilindros por medio del mecanismo biela – manivela, permitiendo una apropiada alineación de todos los componentes, verificando su correcta posición vertical y horizontal con la ayuda de un nivel de burbuja.

Figura 71. **Esquema de soporte para cigüeñal**



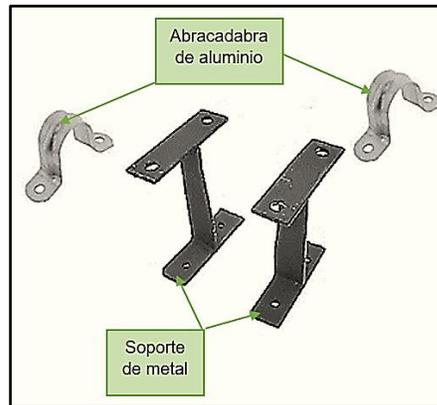
Fuente: *Biela*. <http://www.hurricanerods.com/upfile/product/Forged-H-Beam-6.250-Chevy-SBC-350-400-Connecting-Rod.png>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

4.2.11. Soporte superior (foco caliente)

Ayudará a posicionar correctamente el cilindro del foco caliente, debe ser construido utilizando metal tipo pletina y abrazadera de metal o aluminio, que permita la correcta sujeción del cilindro.

Debe estar anclado a la misma placa del soporte del cigüeñal, lo que permitirá mayor solidez y mejor sujeción de todo el sistema que evita vibraciones y desequilibrios que podrían afectar el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 72. **Soporte superior**

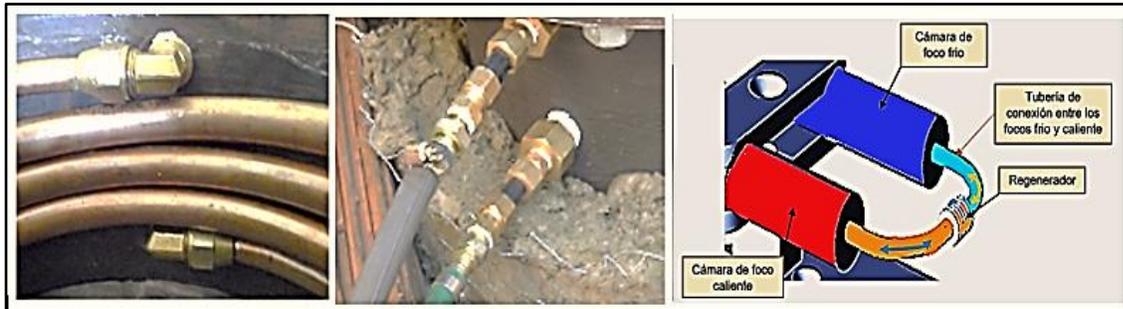


Fuente: elaboración propia.

4.2.12. Conexión entre los focos caliente y frío

Se deben hacer las conexiones con tubería de cobre y tubería de plástico para alta presión y altas temperaturas para evitar fugas en las conexiones, verificar que los conectores estén completamente ensamblados, colocar abrazaderas ajustables para asegurar cada conexión, sujetar las tuberías a la estructura del sistema.

Figura 73. **Interconexión de los focos frío y caliente**



Fuente: elaboración propia.

4.2.13. **Ensamble del motor Stirling del tipo seleccionado**

A continuación, en la tabla XXII se desarrolla una tabla de instrucciones para el acople de un motor Stirling tipo alfa, las que se dividen en una serie de pasos que permitirán un montaje sencillo y menos complicado.

Los motores Stirling deben ser montados cuidadosamente para obtener un funcionamiento sin dificultades, verificar la correcta estanqueidad de los cilindros, buena movilidad y bajo coeficiente de fricción entre las piezas móviles y un anclaje sólido y resistente de las piezas fijas.

Tabla XXII. **Acople de un motor Stirling tipo alfa**

Núm.	Descripción
1	Ajustar el buje de biela y la biela al eje que conecta el pistón, verificando que tenga suficiente movilidad.
2	Unir el cilindro del foco frío y el soporte superior mediante tornillos y abrazaderas de metal.
3	Instalar los rodamientos del cigüeñal y acoplarlos a los soportes del cigüeñal mediante el uso de pegamento para rodamientos.
4	Acoplar al cigüeñal los pistones de los focos frío y caliente, previamente unidos a las bielas. Tomar en cuenta que se debe insertar primero el pistón en el cilindro para hacer la instalación en el cigüeñal.
5	Colocar el cilindro del foco caliente sobre el soporte superior, insertándole el pistón y anclarlo al cigüeñal.
6	Acoplar y asegurar el volante de inercia al cigüeñal.
7	Conectar la tubería necesaria para la interconexión entre los focos frío y caliente.
8	Acoplar el generador de imanes permanentes a la placa base del motor Stirling.
9	Instalar los elementos de transmisión de potencia entre el motor y el generador.
10	Conectar por medio de una banda plana el mecanismo de transmisión de potencia y el generador de imanes permanentes.
11	Instalar el banco de pruebas del sistema de generación.

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se mostraron los pasos para el montaje de un motor Stirling tipo alfa, a los que se les debe complementar comprobando la correcta alineación de los ejes que conectan los pistones de los focos frío y caliente para que no exista demasiada fricción que pueda impedir su funcionamiento, si el cigüeñal tiene demasiado juego entre los acoples de los bujes o si estos lo están frenando, entre otros.

Finalizado el procedimiento de acople de todos los elementos, se debe dedicar el tiempo necesario para comprobar tranquilamente y de forma ordenada todos los posibles errores cometidos; generalmente, se tendrán dos tipos de causas comunes que podrían impedir el funcionamiento apropiado del motor:

- Falta de estanqueidad en los cilindros de compresión y expansión
- Excesiva fricción entre los elementos móviles del sistema
- Baja intensidad de inercia

4.3. Pruebas y modificaciones del motor Stirling del tipo seleccionado

Cuando se realizan modificaciones o construcciones nuevas de algún sistema electromecánico se hace necesario realizar una serie de pruebas previo a la puesta en marcha inicial.

Para el caso de un motor Stirling tipo alfa, también, se requiere hacer un análisis y revisión de los elementos clave para su correcto funcionamiento ya que este opera a partir de una fuente de calor externa; por lo que se debe calentar el foco caliente hasta una temperatura de prueba de (150 °C) para experimentar su funcionamiento.

Para la puesta en marcha de un motor Stirling tipo alfa, se deberán seguir los pasos que se describen en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. **Prueba de funcionamiento del motor Stirling**

Núm.	Descripción
1	Colocar el motor Stirling tipo alfa alineado correctamente en el plano horizontal y vertical sobre una superficie plana.
2	Colocar un mechero de alcohol de modo que haga elevar la temperatura en el foco caliente, monitorear la temperatura con la ayuda de un termómetro.
3	Considerar un tiempo prudencial para que la temperatura en las paredes del cilindro caliente alcance los 150 °C.
4	Aplicar un pequeño impulso haciendo girar el volante de inercia en sentido antihorario (contrario al movimiento de las agujas del reloj), esto para vencer el rozamiento inicial y la condición estática de los pistones.

Fuente: elaboración propia.

La prueba que se describe en la tabla XXIII permite comprobar y analizar el funcionamiento del motor de manera individual haciendo notar posibles errores que eviten el funcionamiento eficaz del motor.

Si se presentan inconvenientes en el funcionamiento, estos deberán ser resueltos y consecutivamente proceder a ensamblar el motor con el concentrador solar.

Considerando que podrían presentarse resultados insatisfactorios durante la puesta a punto del motor Stirling tipo alfa, se ha desarrollado la tabla XXIV en donde se plantea una serie de problemas y causas comunes que impiden el funcionamiento óptimo del motor y sus posibles soluciones.

Tabla XXIV. Problemas y causas comunes de inmovilidad del motor Stirling y sus posibles soluciones

Problema	Causa	Solución
Fugas y fricciones excesivas en el foco caliente	Existe demasiada holgura entre el pistón y el cilindro y no se produce el sello requerido.	Instalar pistón que disponga de un diámetro exterior correspondiente al diámetro interior del cilindro con una tolerancia de (- 0,1 mm). Instalar anillos de teflón en el pistón para ayudar al sello mecánico y evitar el exceso de fricción.
Falta de inercia	El motor no es capaz de mantener el ciclo de giro después de alcanzar la temperatura de prueba (150 °C) y darle el impulso inicial al volante de inercia.	Instalar un volante de mayor peso.

Continuación de la tabla XXIV.

Alta fricción	Bujes del cigüeñal producen mucho rozamiento.	Lijar los bujes disminuyendo su diámetro exterior o interior según sea el caso, hasta que tengan una holgura adecuada que les permita girar libremente y sin rozamiento excesivo.
Fugas en la tubería de conexión de los cilindros	Deformación o mala aplicación de soldadura en las juntas.	Verificar el estado de las juntas y volver a realizar el procedimiento de soldadura.

Fuente: elaboración propia.

La tabla de problemas y causas comunes de inmovilidad del motor Stirling y sus posibles soluciones es una útil herramienta para la puesta a punto del motor que permitirá resultados óptimos en el funcionamiento del motor y de todos sus elementos.

5. DIMENSIONAMIENTO, DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL COLECTOR SOLAR PARABÓLICO

El colector solar se encarga de captar los rayos del sol convirtiendo la energía solar en energía térmica. Se propone un colector solar del tipo disco parabólico, cuando la luz del sol se percibe por medio de este colector, la radiación incidente se refleja hacia su foco.

5.1. Diseño y dimensionamiento del colector solar parabólico

Se describe el diseño de un colector solar parabólico que se compone de 2 partes fundamentales:

- Reflector parabólico: consta de una superficie reflexiva del tipo paraboloides de revolución. El tamaño de un concentrador parabólico depende de la potencia nominal como de la energía que se desea generar en un periodo de tiempo de acuerdo con las condiciones de radiación solar y rendimiento de los elementos que lo construyen.
- Los discos parabólicos se construyen con secciones que aproximen la geometría del paraboloides, la base reflexiva se consigue por medio de espejos de vidrio o de material reflectante como láminas de acero inoxidable tipo espejo.
- Estructura soporte y mecanismos: tiene como función principal soportar el colector parabólico y motor Stirling tipo alfa.

- Debe disponer un mecanismo de seguimiento solar de dos grados de libertad (en dos ejes) que permita ajustar la superficie del reflector hacia la dirección del sol. Los dos tipos de montaje empleados son:
 - Seguimiento en acimut – elevación: el movimiento se realiza en dos ejes, vertical y horizontal.
 - Seguimiento polar: la velocidad en uno de sus ejes es a velocidad constante y en el otro sigue las variaciones estacionales del sol.

El montaje del mecanismo de seguimiento en acimut – elevación es más fácil de construir, pero el de seguimiento polar es más fácil de controlar.

5.2. Diámetro requerido de la parábola del reflector

Para este diseño es necesario conocer valores de radiación directa promedio.

El término radiación solar se refiere al promedio diario de irradiancia que incide sobre una superficie plana por cada metro cuadrado, sus dimensionales se expresan en vatio / hora / por metro cuadrado [Wh/m²].

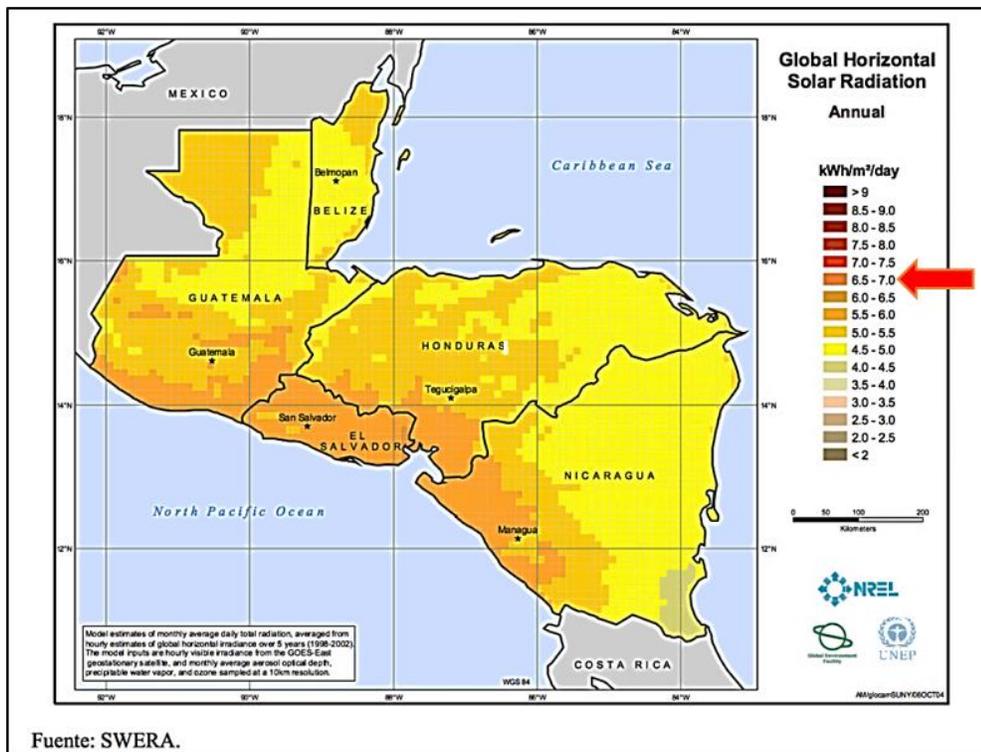
Los mapas solares existentes para Guatemala se basan en modelos y datos proporcionados por satélites, pues no se cuenta con suficientes estaciones meteorológicas para construir un mapa solar detallado con mediciones directas.

La estimación de potencial solar en la región y creador de principales proyectos de este ramo es SWERA (*solar and wind energy resource assessment*) y facilita el acceso a información y datos de energía renovable para usuarios de todo el mundo.

Se conocen dos conjuntos de datos de recurso solar para Guatemala generados por el proyecto SWERA: uno elaborado por NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable) en Estados Unidos; otro elaborado por la Universidad Estatal de New York (SUNY).

En la figura 74 se muestra un mapa de la radiación global horizontal, promedio anual, escala de 10 km x 10 km, elaborado con el modelo SUNNY que permitirá conocer los valores de radiación directa promedio en Guatemala.

Figura 74. **Mapa de radiación directa del sol en Guatemala**



Fuente: *Mapa de recurso solar en Guatemala*. <http://incyt.org/web/mapas-de-recurso-solar-en-guatemala/>, julio 2017. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

De acuerdo con el mapa de la figura anterior se afirma que la radiación directa promedio en Guatemala es de 6,5 KWh / m² / día.

Para el dimensionamiento del reflector parabólico se establecerá la radiación directa instantánea en lugar de la radiación promedio, a partir de la ecuación que se describe en la tabla XXV.

Tabla XXV. **Ecuación de radiación directa instantánea del sol**

Radiación directa instantánea	$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \cdot \left(\frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \frac{\pi \cdot \omega_s}{180} \cos(\omega_s)} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> • r_d = relación de la radiación horaria con respecto a la radiación diaria total. • I_d = radiación incidente instantánea [W/m²]. • H_d = relación diaria total [Wh/m²/día]. • ω = ángulo horario [°]. • $\omega = 15 \cdot (Hh - 12)$. • ω_s = ángulo horario del ocaso [°]. • $\cos(\omega_s) = -\tan \varnothing \cdot \tan \delta$. • \varnothing = latitud [°]. • δ = declinación [°]. • $\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284+N}{365} \right)$.
-------------------------------	--	--

Fuente: elaboración propia.

Con los valores y las ecuaciones matemáticas expresadas en la tabla anterior es posible calcular la radiación instantánea del sol.

En las tablas XXVI y XXVII se muestran las ecuaciones para el cálculo de la radiación que se refleja desde el colector, del valor de calor que absorbe el foco caliente y el diámetro de la parábola respectivamente.

Tabla XXVI. **Ecuaciones de la radiación que se refleja, valor del calor captado y el diámetro de la parábola**

Radiación que se refleja	$Q_{refl} = \bar{I}_0 \cdot \rho \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varnothing_p^2}{4} \right) \cdot g$	<ul style="list-style-type: none"> • \bar{I}_0 = radiación promedio [W/m²]. • ρ = reflectividad de la superficie del reflector solar parabólico. • $\rho = 0,77$ para un acero inoxidable típico pulido. • \varnothing_p = diámetro de la parábola [m]. • g = eficiencia geométrica, depende de la precisión que se obtiene a partir de la construcción y de las sombras que se generan en la zona de reflexión. Para este caso se asume una eficiencia geométrica de 0,60
--------------------------	--	--

Fuente: elaboración propia.

El valor que se encuentra con la ecuación anterior es el calor que se refleja hacia el foco, pero este no es captado en su totalidad por el foco, ya que el material del colector tiene un factor de absortividad en su superficie debido a la emisividad del material.

Un acero inoxidable típico pulido tipo espejo presenta el mismo factor de emisividad y absortividad equivalente a $\epsilon = 0,1$; por lo que se procede a calcular el valor del calor que absorbe el foco a partir de la ecuación mostrada en la tabla XXVII.

Tabla XXVII. **Ecuación para calcular el calor que absorbe el foco caliente**

<p>Calor que se capta en el foco caliente</p>	$Q_{rad} = \varepsilon \cdot Q_{refl}$ $Q_{rad} = \varepsilon \cdot \bar{I}_0 \cdot \rho \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varnothing_p^2}{4} \right) \cdot g$	<ul style="list-style-type: none"> • Q_{rad} = es el valor de calor de radiación que se capta en el foco caliente. • ε = factor de emisividad y absorptividad del acero inoxidable típico pulido tipo espejo. • \bar{I}_0 = radiación promedio [W/m²]. • ρ = reflectividad de la superficie del reflector solar parabólico. • $\rho = 0,77$ para un acero inoxidable típico pulido. • \varnothing_p = diámetro de la parábola [m].
---	--	--

Fuente: elaboración propia.

Absortividad es la medida de la cantidad de luz absorbida por una superficie, definida como la unidad de absorbancia por unidad de concentración por unidad de longitud de la trayectoria de luz.

La emisividad de una superficie depende de factores como su temperatura, el acabado superficial, el ángulo de emisión y la longitud de onda de la fuente de iluminación.

Con la finalización del desarrollo de las ecuaciones descritas en las tablas anteriores se procederá a calcular el diámetro de la parábola, que se muestra en la tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. **Cálculo del diámetro de la parábola**

Diámetro de la parábola	$\varnothing_p = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{rad}}{\varepsilon \cdot \bar{I}_0 \cdot \rho \cdot \pi \cdot g}}$	<ul style="list-style-type: none"> • \varnothing_p = diámetro de la parábola [m]. • Q_{rad} = es el valor de calor de radiación que se capta en el foco caliente.
-------------------------	---	---

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior permite el cálculo del diámetro de una parábola a partir de la cantidad de calor de radiación que emite el material de construcción de esta.

Adicional a la medida del diámetro de una parábola también es importante conocer y calcular su profundidad y distancia focal.

Para expresar la ecuación de una parábola, primero se debe establecer la distancia focal, luego, expresar su ecuación en función de esta distancia.

La ecuación de la parábola se describe en la tabla XXIX.

Tabla XXIX. **Ecuación de una parábola**

Ecuación de una parábola	$x^2 = 4 \cdot p \cdot y$	<ul style="list-style-type: none"> • x = diámetro de la parábola dividido para 2. • y = altura de la parábola para cada diámetro. • p = distancia focal
Altura de la parábola	$h_{\varnothing} = \frac{\varnothing_p^2}{16 \cdot p}$	<ul style="list-style-type: none"> • h_{\varnothing} = altura para cada diámetro de la parábola [mm]. • \varnothing_p = diámetro de la parábola [mm]. • p = distancia focal de la parábola [mm].

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra la ecuación de la parábola asumiendo que el sistema de referencia se encuentra en el punto más bajo de la parábola, donde p es la distancia focal, reconociendo que el reflector parabólico es una superficie en el espacio, donde x corresponde al diámetro de la parábola dividido para 2 y que la altura de la parábola para cada diámetro se representa con y . Finalmente, se expresa la ecuación para definir la altura correspondiente a cada diámetro de la parábola.

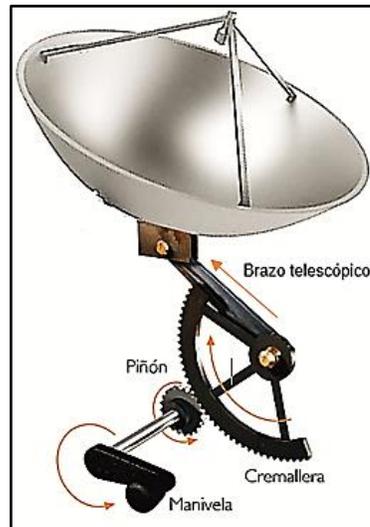
5.3. Diseño y dimensionamiento del soporte inferior

El soporte inferior se encarga de orientar al reflector hacia la posición del sol reflejando correctamente los rayos hacia el foco caliente.

El giro en este soporte se realiza por medio de un mecanismo piñón – cremallera circular y una manivela conectada al eje del piñón, como se muestra en la figura 75.

Para posicionar el colector en la dirección deseada basta con hacer girar la manivela y ajustar el ángulo requerido.

Figura 75. **Esquema de soporte inferior**



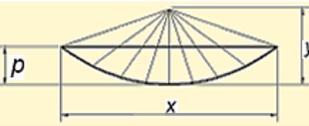
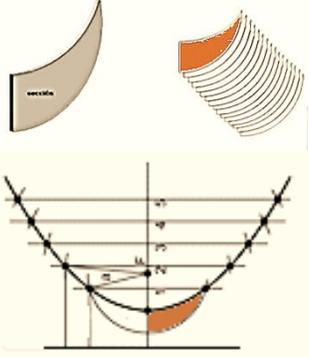
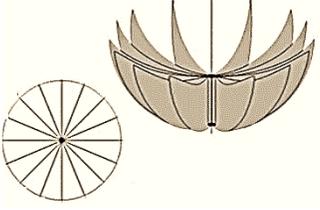
Fuente: elaboración propia.

La parte básica del soporte es la cremallera principal y el piñón, que permite posicionar el concentrador a la altura e inclinación requerida de forma segura y estable.

5.4. Construcción del colector solar parabólico

El proceso de construcción del colector solar parabólico se rige a partir de la forma geométrica de la parábola, en la tabla XXX se describe el procedimiento que facilitará su construcción.

Tabla XXX. Descripción de construcción de un reflector solar parabólico

Núm.	Descripción	Detalle
1	Elaborar un molde en dos dimensiones a partir de la ecuación de una parábola. Para mayor facilidad, construir plantillas del molde en láminas de cartón de 5 mm de espesor, estas servirán durante el proceso de construcción para marcar y cortar cada pieza que conformará la superficie parabólica.	$x^2 = 4 \cdot p \cdot y$ 
2	Se asume un valor para la distancia focal, y se resuelve la ecuación agregando valores a x, desde el punto 0, y se transmiten los valores a un plano cartesiano, que generará la plantilla requerida para cortar las piezas del molde. Se aconseja cortar por lo menos 12 piezas para facilitar el corte y ensamble de las piezas para la superficie parabólica.	
4	Construir un soporte para la unión y acople de todas las aristas en el interior y exterior del molde.	
5	Teniendo el molde preparado, se procede a cortar las plantillas de la superficie plana, luego, deberán pegarse al molde.	
6	Teniendo lista la superficie plana se procede a agregar la superficie reflectante, ya sea una lámina de acero inoxidable o bien secciones de espejos de vidrio.	

Continuación de la tabla XXX.

7	El reflector solar quedará listo para acoplarlo al soporte inferior y, luego, realizar las pruebas respectivas de funcionamiento.	
---	---	---

Fuente: elaboración propia.

En las tablas anteriores se describió el proceso para el cálculo, diseño y construcción de un colector solar parabólico, que está compuesto por varias secciones de placas que formarán la superficie parabólica reflectante.

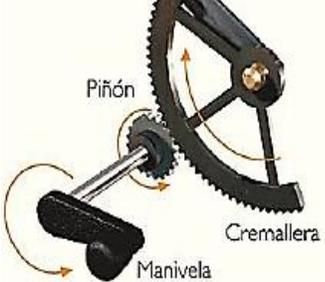
5.5. Construcción del soporte inferior giratorio

El diseño para este soporte se basa en un mecanismo piñón – cremallera circular; a continuación, en la tabla XXXI se desarrolla el procedimiento para su montaje y puesta en funcionamiento.

Tabla XXXI. **Montaje y puesta en funcionamiento del soporte inferior**

Núm.	Descripción	Detalle
1	El soporte inferior se construye con un chasis de tubos cuadrados de metal, con una base en forma de trípode y un tubo vertical.	

Continuación de la tabla XXXI.

2	El mecanismo de giro se construye con un mecanismo piñón – cremallera circular, conectando una manivela al eje del piñón para hacer posible el giro y ajuste del colector.	
3	Acoplar por medio de proceso de soldadura la base trípode al mecanismo piñón – cremallera circular. Verificar que estos elementos queden alineados correctamente tanto en el plano vertical como horizontal.	

Fuente: elaboración propia.

5.6. Construcción del brazo telescópico

El brazo telescópico es parte del soporte inferior; este se encarga de posicionar el reflector solar a partir del movimiento giratorio de la cremallera circular a una altura y un ángulo determinado.

Utilizar un tubo cuadrado de acero o aluminio, siguiendo los pasos que se describen en la tabla XXXII.

Tabla XXXII. Pasos para la construcción del brazo telescópico

Núm.	Descripción	Detalle
1	Cortar un tubo cuadrado con medidas de longitud y distancia entre caras acordes al tamaño del diámetro del reflector parabólico y a la base del soporte inferior.	
2	En uno de sus extremos elaborar un agujero pasado entre sus dos caras opuestas, que permita anclar la base posterior del reflector por medio de un pasador.	
3	Cortar las caras adyacentes de la perforación anterior.	
4	En el otro extremo del tubo soldar una tuerca que permita anclar el brazo con la cremallera circular.	
5	Elaborar un eje pasador de acero, refrentar y cilindrar a un diámetro equivalente al agujero realizado.	 
6	Cortar el eje a una longitud equivalente a 1,5 veces la distancia entre caras del tubo cuadrado.	
7	Realizar una perforación para instalar un seguro tipo chaveta que permitirá fijar el pasador que acopla el brazo con el reflector.	
8	Proceder con el ensamblaje del colector solar.	

Fuente: elaboración propia.

5.7. Prueba de funcionamiento del colector solar parabólico

El aspecto más importante para verificar en el funcionamiento del colector es la temperatura que se alcanza en el foco caliente del motor Stirling a partir de la radiación incidente sobre la superficie del colector solar parabólico que se refleja hacia el cilindro caliente.

A continuación, se enlistan los elementos y herramientas que se requieren para realizar la medición de temperatura generada por el colector solar:

- Termómetro digital
- Termocupla
- Foco caliente del motor Stirling
- Colector solar expuesto a la luz del sol

5.7.1. Descripción de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico

Las mediciones deberán realizarse en un día con cielo despejado, preferiblemente entre las 11:00 y las 14:00 horas, durante 60 minutos, con intervalos de 2 minutos; el valor de cada medición deberá anotarse en una tabla que nos permitirá generar un valor promedio de la temperatura obtenida.

En la tabla XXXIII se describe el procedimiento para el desarrollo de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico.

Tabla XXXIII. **Procedimiento para el desarrollo de la prueba de funcionamiento a un colector solar parabólico**

Núm.	Descripción	Detalle
1	Ensamblar el motor Stirling en el soporte del colector solar.	
2	Instalar una termocupla en el foco caliente del motor Stirling y conectarla a un termómetro digital.	
3	Situarse el sistema motor Stirling tipo alfa y el colector solar parabólico en un sitio que permita captar la luz solar en su totalidad.	
4	Realizar las mediciones de temperatura en el foco caliente con intervalos de 2 minutos y anotar los valores obtenidos.	

Fuente: elaboración propia

5.7.2. Resultados de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico

Los resultados de cada medición durante la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico deberán registrarse con el apoyo de una tabla que permita anotar cada intervalo de medición y su correspondiente valor de temperatura.

Finalmente, calcular el promedio de temperatura durante el tiempo de prueba de funcionamiento del colector solar parabólico.

Los resultados serán satisfactorios si el foco caliente alcanza la temperatura requerida para hacer funcionar el sistema y completar el ciclo de trabajo.

Nota: de acuerdo con la descripción de la prueba de funcionamiento del motor Stirling en la tabla XXIII, la temperatura deberá ser como mínimo 150 °C.

Tabla XXXIV. Registro de valores de temperatura acorde a intervalos definidos de la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico

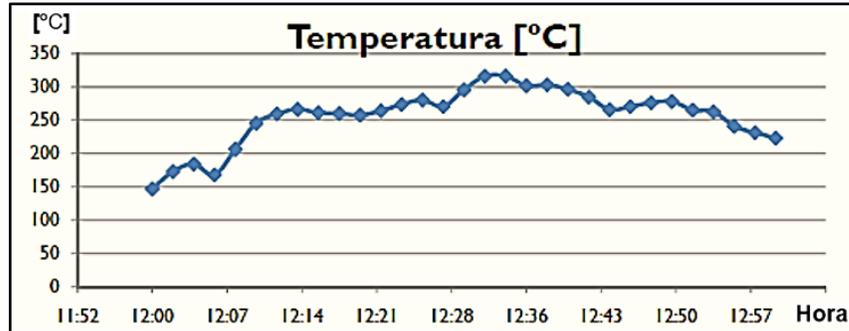
Hora	Temperatura del foco caliente [°C]
12:00	X1
12:02	X2
.	.
.	.
.	.
13:00	X30
Promedio	El valor obtenido deberá ser como mínimo 150 °C.

Fuente: elaboración propia.

A partir de la tabla anterior, se podrá generar un gráfico que mostrará el comportamiento de la temperatura en el foco caliente durante el periodo de tiempo considerado para la prueba de funcionamiento del colector solar parabólico.

En la figura 76 se muestra un ejemplo del comportamiento de la temperatura del foco caliente vs tiempo.

Figura 76. **Comportamiento de la temperatura en el foco caliente vs tiempo**



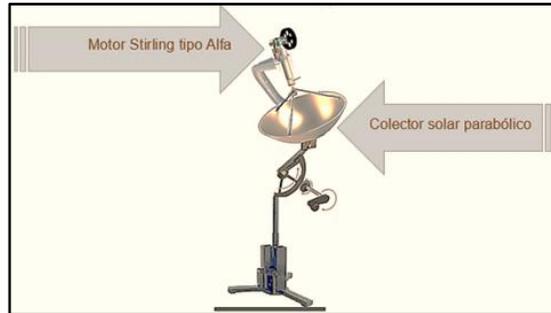
Fuente: elaboración propia.

La grafica anterior muestra en el eje Y la temperatura alcanzada en el foco caliente y en el eje X el intervalo de tiempo entre cada medición; muestra el gráfico del comportamiento de la temperatura durante el tiempo de prueba.

5.8. Prueba de funcionamiento del sistema motor Stirling solar

El sistema motor Stirling solar está compuesto por un motor tipo alfa y el colector solar parabólico, cada uno con sus elementos correspondientes, como se aprecia en la figura 77.

Figura 77. **Sistema motor Stirling solar**



Fuente: elaboración propia.

Se comprobará su funcionamiento desarrollando la secuencia de pasos que se muestra en la tabla XXXV.

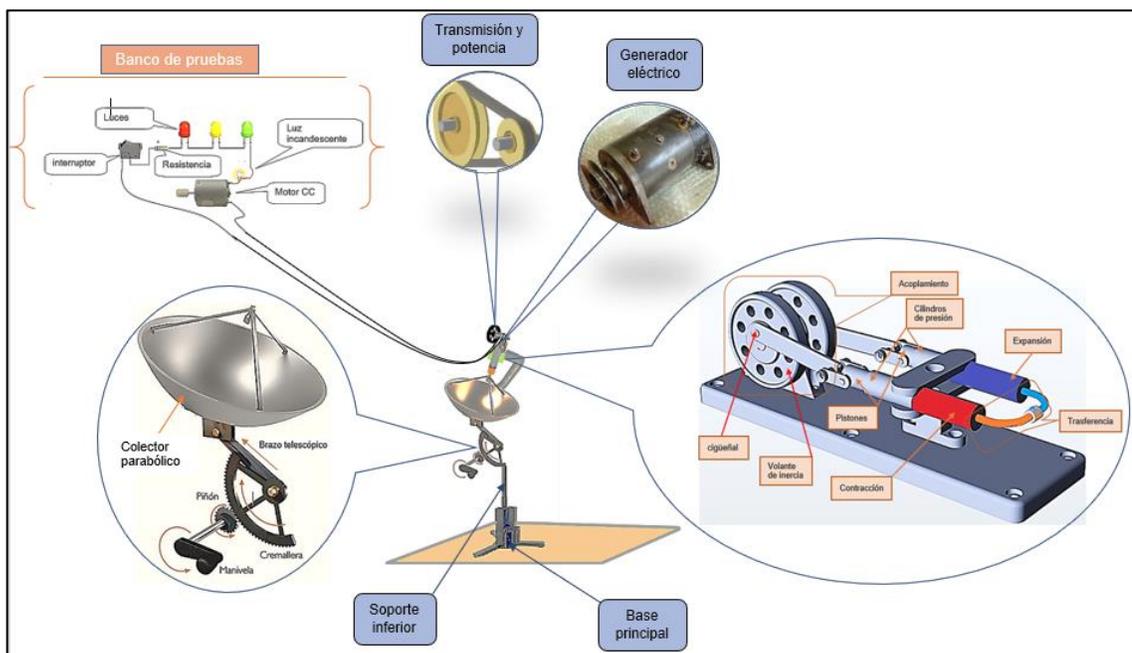
Tabla XXXV. **Proceso para comprobar el funcionamiento del sistema motor Stirling solar**

Núm.	Descripción	Detalle
1	Situar el conjunto motor Stirling alfa y el colector solar parabólico sobre una superficie plana apuntando hacia la posición del sol.	
2	Colocar termocuplas en los focos frío y caliente, conectadas a un termómetro digital.	
3	Esperar durante un intervalo de tiempo adecuado hasta que la temperatura en el foco caliente alcance los 150 °C, asegurando que la temperatura en el fluido de trabajo (aire) llegue a la temperatura de trabajo.	
4	Aplicar un pequeño impulso al volante de inercia en sentido contrario a las agujas del reloj, para la excitación inicial del ciclo del motor.	
5	Elaborar una tabla y registrar los valores de temperatura en el foco caliente y el foco frío, así mismo, las revoluciones alcanzadas (rpm).	

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el mayor número de rpm en el motor Stirling se deberá verificar que el sistema se encuentre alineado en los planos horizontal y vertical, y sobre una superficie uniforme, que permita disminuir el rozamiento a vencer dentro de los cilindros del motor. A continuación, se presenta un ejemplo del diseño final del sistema de un motor solar Stirling y se muestra a detalle cada uno de sus módulos; se señalan los elementos principales de cada módulo.

Figura 78. **Ejemplo de diseño de un prototipo de un sistema de motor solar Stirling para la generación de energía eléctrica**



Fuente: elaboración propia.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se desarrollan los resultados y el análisis del modelo propuesto, las conclusiones y las recomendaciones que se entrelazan entre sí validando la información teórica y las propuestas generadas durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

En los capítulos del 1 al 5 se estudian y analizan los diferentes tipos de motores Stirling; permite cuestionar y proponer nuevas configuraciones para futuras investigaciones orientadas a mejorar o implementar nuevos sistemas de motores Stirling solares variando el tipo de motor o bien el tipo de colector solar.

6.1. Modelo propuesto

Se propuso un motor Stirling tipo alfa, que representa un nivel medio de complejidad en la manufactura, instalación y acoplamiento de sus partes. Este modelo opera a partir de un mecanismo biela – manivela que dispone el foco caliente y el foco frío separados uno del otro.

Permitirá observar la transferencia de calor y la expansión del fluido de trabajo por separado; facilita el análisis y la comprensión del ciclo de trabajo.

El motor Stirling tipo alfa propuesto en este trabajo se compone de los siguientes elementos:

- Módulo de expansión y contracción
- Módulo de transferencia de calor

- Módulo de acoplamiento
- Módulo de colector solar y generación de energía eléctrica

6.2. Resultados y análisis

En el capítulo 2 se desarrollaron las generalidades de los motores Stirling; se analizan sus fases de funcionamiento. Seguidamente, en el capítulo 3 se plantearon las alternativas para la selección del diseño, a partir del estudio y análisis de la configuración de cada motor; describen sus características y se enlistan sus ventajas y desventajas de construcción y funcionamiento.

Después de analizar y comparar cada alternativa, se elaboró un planteamiento individual de las piezas y elementos que constituyen su construcción; se toman en cuenta la disponibilidad de los materiales del mercado local.

Se hicieron comparaciones de costo de materia prima, costo de desperdicio de materiales durante los procesos de fabricación, nivel de complejidad en la construcción y ensamblaje de cada elemento, eficiencia del tipo de motor en cuestión, volumen y peso del sistema y la adaptabilidad con el colector solar parabólico.

Se obtuvo como resultado de selección el motor Stirling tipo alfa, que se muestra en el sistema compuesto de la figura 76, se procedió con la propuesta de un modelo descriptivo de los módulos que lo componen, las características de construcción y el desempeño que deben cumplir cada uno de los elementos, como se enlistan en la tabla XXXVI.

Finalmente, se analizó el funcionamiento de los colectores solares, sus características de construcción y funcionamiento a partir del desarrollo de las

ecuaciones para el cálculo del diámetro requerido a partir de los valores de radiación directa del sol y la radiación que se refleja; se seleccionó uno del tipo reflector parabólico, que consta de un soporte inferior que permite posicionar el reflector solar apuntando hacia la posición del sol.

Tabla XXXVI. **Elementos, características de construcción y desempeño de un sistema de motor Stirling solar tipo alfa**

Módulo	Componentes	Características
Expansión y compresión	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindro • Émbolo • Anillos 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo coeficiente de fricción • Hermetismo • Resistencia al desgaste • Disponibilidad en el mercado
Transferencia de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería de cobre • Regenerador de calor 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a altas temperaturas • Resistencia a los cambios bruscos de temperatura
Acoplamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Biela • Manivela • Apoyo • Volante de inercia • Bastidor 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja masa • Portabilidad • Rigidez • Bajo costo de adquisición • Bajo nivel de complejidad para su manufactura • Buen acabado superficial
Colector solar	<ul style="list-style-type: none"> • Reflector parabólico • Soporte inferior 	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie reflexiva tipo espejo • Rigidez • Portabilidad • Adaptabilidad
Generación de corriente continua CC	<ul style="list-style-type: none"> • Generador de imanes permanentes • Transmisión de potencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaz de funcionar a diferentes velocidades de rotación • Sistema de transmisión de potencia silencioso y confiable • Fácil de instalar • Vida útil de larga duración

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se plantea un ejemplo simplificado del diseño de los sistemas principales de un motor térmico solar Stirling, se aplican los siguientes conceptos e hipótesis básicas.

- El aire en el interior del motor se comporta como un gas perfecto
- El regenerador de aire se considera perfecto

Este tipo de motores se opera normalmente con el menor gradiente de temperatura posible y su presión interna es igual a la presión ambiente.

Se realizan los cálculos de las variables fundamentales de la tabla XXXVII.

Tabla XXXVII. **Variables principales de un sistema de motor térmico solar Stirling acoplado a un colector solar para la generación de energía eléctrica**

Variable	Nombre de la variable
TH	Temperatura máxima del fluido de trabajo
TL	Temperatura mínima del fluido de trabajo
η teórica	Eficiencia teórica del ciclo
V	Volumen medio interno
m	Masa del fluido de trabajo
V máx.	Volumen máximo del motor
V min	Volumen mínimo del motor
WNETO	Trabajo neto
Qentra	Calor suministrado al ciclo
η térmica	Eficiencia térmica
P máx.	Presión máxima
P min	Presión mínima
Variable	Nombre de la variable
F máx.	Fuerza máxima
F min	Fuerza mínima
F útil	Fuerza utilizable
Pmec	Potencia mecánica teórica
Putil	Potencia mecánica útil
T	Torque en el eje del motor
Pelec	Potencia eléctrica instantánea
Eelec	Energía eléctrica mensual
rd	Relación de radiación horaria vrs radiación diaria total
Qrefl	Radiación que se refleja
Qrad	Valor del calor de radiación que se capta en el foco caliente
Φ p	Diámetro de la parábola
$h\Phi$	Altura de la parábola

Fuente: elaboración propia.

Los volúmenes medio, máximo y mínimo se definen a partir de la geometría del motor. Tomar en cuenta que el volumen máximo ocurre cuando el pistón de trabajo se desplaza en toda la longitud de su carrera y el volumen mínimo en la situación opuesta. Durante el ciclo de trabajo se pasa por los volúmenes máximo y mínimo una vez y por los volúmenes medios dos veces. También, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El volumen mínimo ocurre a temperatura mínima.
- Cuan más pequeña es la diferencia de volumen la diferencia de presión aumenta.

6.3. Memoria de cálculo

Se analiza un caso concreto, los cilindros del motor tienen un diámetro de 3 cm, una altura de 3 cm, el fluido de trabajo es aire. El regenerador ocupa la mitad del volumen interno. El volumen desplazado es una variable.

Se suponen los siguientes valores:

- Temperatura máxima $T_H = 150^\circ \text{C} = 423,15 \text{ K}$
- Temperatura mínima (temperatura ambiente) $T_L = 33^\circ \text{C} = 306,15 \text{ K}$
- Velocidad del motor 600 rpm

El pistón de trabajo tiene 2,95 cm de diámetro y 2 cm de carrera. El nuevo volumen medio ocurre a la mitad de la carrera.

Realizando los cálculos se generan los siguientes resultados:

- Eficiencia teórica del ciclo:

$$\eta_{teórica} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{306,15}{423,15} = 0,28 \%$$

- El volumen medio interno:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{h}{2} + \pi \cdot \phi^2 \cdot \frac{L}{2} = \pi \cdot 1,5^2 \cdot \frac{3}{2} + \pi \cdot 2,95^2 \cdot \frac{2}{2} = 38 \text{ cm}^3 = 0,000038 \text{ m}^3$$

- Masa del fluido de trabajo aplicando la ecuación de estado de gases perfectos:

- Donde: $p_{amb} = 1 * 10^5$ y $T_L = 33^\circ \text{ C} = 306,15 \text{ K}$

$$m = \frac{p_{amb} \times V_{Medio}}{R \times T_L} = \frac{100\,000 \times 0,000038}{287 \times 306,15} = 0,043 \text{ gramos}$$

- Volumen máximo del motor:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{h}{2} + \pi \cdot \phi^2 \cdot L_{total} = \pi \cdot 1,5^2 \cdot \frac{3}{2} + \pi \cdot 2,95^2 \cdot 2 = 65 \text{ cm}^3 = 0,000065 \text{ m}^3$$

- Volumen mínimo del motor:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{h}{2} + \pi \cdot \phi^2 \cdot L_{Minima} = \pi \cdot 1,5^2 \cdot \frac{3}{2} + \pi \cdot 2,95^2 \cdot 0 = 11 \text{ cm}^3 = 0,000011 \text{ m}^3$$

- Trabajo neto:

Sabiendo que R es el constante particular del aire y equivale a $0,827 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{K}$, se tiene entonces:

$$\begin{aligned}
 W_{neto} &= R \times (T_H - T_L) \times \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \\
 &= 0,287 \times (423,15 - 306,15) \times \ln \frac{0,000065}{0,000011} = 59,7 \text{ KJ/Kg}
 \end{aligned}$$

- Calor suministrado al ciclo:

$$Q_{entra} = R \times T_H \times \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} = 0,287 \times 423,15 \times \ln \frac{0,000065}{0,000011} = 215,7 \text{ KJ/Kg}$$

- Eficiencia térmica del ciclo:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entra}} = \frac{65}{234,7} = 0,28 = 28 \%$$

- Presión máxima del sistema

$$p_{max} = \frac{m \times R \times T_H}{v_{min}} = \frac{0,000043 \times 287 \times 423,15}{0,000011} = 474,736 \text{ Pa}$$

- Presión mínima del sistema

$$p_{max} = \frac{m \times R \times T_L}{v_{max}} = \frac{0,000043 \times 287 \times 306,15}{0,000065} = 58,126 \text{ Pa}$$

Convirtiendo los valores de presión a fuerza, se tiene lo siguiente:

- Fuerza máxima (se produce cuando el pistón sale):

$$F_{m\acute{a}x} = \pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 (p_{m\acute{a}x} - p_{amb}) = \pi \times \left(\frac{2,95}{2}\right)^2 \times (474\,736 - 100\,000) = 256 \text{ N}$$

- Fuerza mínima (se produce cuando el pistón entra):

$$F_{min} = \pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 (p_{amb} - p_{min}) = \pi \times \left(\frac{2,95}{2}\right)^2 \times (100,000 - 58,126) = 28,6 \text{ N}$$

De acuerdo con la teoría del cálculo de motores, es conveniente y razonable suponer que debido a la presión ambiente se podría presentar un diferencial de fuerza igual a 5 Newton/cm de carrera ascendente y descendente, respectivamente, en la carrera de los pistones.

Para este ejemplo, con un motor que gira a 600 rpm y tiene una carrera de 2 cm, el diferencial de fuerza corresponde a 20 N.

- A continuación, se deduce la fuerza útil del motor:

$$F_{\acute{u}til} = F_{max} + F_{min} - dF = 256 + 29 - 20 = 265 \text{ N}$$

- Potencia mecánica del motor:

$$P = \frac{F \times Vel}{60} = \frac{265 \times 600}{60} = 2\,650\, W$$

Los motores Stirling presentan distintas pérdidas en el proceso de funcionamiento, entre las más importantes se pueden mencionar:

- Pérdidas por volúmenes muertos.
- Rozamiento debido a la viscosidad del fluido de trabajo.
- Rozamiento mecánico de los pistones con las paredes del cilindro y los elementos de transmisión (bielas, cigüeñal, bujes, entre otros).
- Pérdidas por transmisión térmica.

Aplicando entonces el rendimiento calculado para este motor (28 %), tenemos que la potencia mecánica final del motor es igual a la potencia calculada multiplicada por el rendimiento:

- Potencia útil del motor Stirling calculado.

$$P_{util} = P \times \eta = 2\,650 \times 0,28 = 742\, W$$

Al calcular el torque en el eje del motor, se obtiene el siguiente valor:

- Torque en el eje del motor

$$T = \frac{P}{\frac{\pi}{30} \times RPM} = \frac{742}{\frac{\pi}{30} \times 600} = 11,8\, N \times m$$

Según los resultados de torque y potencia mecánica del motor ejemplificado, este es competente para adaptarlo a un generador de características similares a las que se muestran en la ficha técnica de la figura siguiente.

Figura 79. **Ficha técnica de un generador de imanes permanentes**

Modelo	Ne-600P	
Potencia nominal(W)	600 W	
Potencia máxima(W)	636W	
Tensión nominal(V)	12/24/48V	
Girada clasificada velocidad(R/M)	600r/m	
Peso neto top(Kg)	6.3KG	
Corriente de salida	AC	
Par de arranque	0.52Nm	
Generador	3 Fase de imán permanenteGenerador síncrono	
Clase de aislamiento:	F	
Vida útil:	Más 20 años	
Rodamiento	HRBOPara su orden	
Material del eje	Acero inoxidable	
Material de Shell	Aleación de aluminio	
Material de imán permanente	Tierra rara NdFeB	
Grado de protección	IP54	
Lubricación	Grasa de lubricación	
Temperatura de trabajo	-40°C-80 °C	

Fuente: *Generador permanente*. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/600w-low-rpm-generator-permanent-magnet-alternator-for-wind-turbine-60537560100.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Con base en lo anterior, se puede afirmar que el diseño del prototipo de motor Stirling acoplado a un concentrador solar es apto para la generación de 600 watts de potencia eléctrica instantánea. Considerando 6 horas diarias de irradiancia solar y temperatura indicadas en este ejemplo, el sistema puede entregar energía eléctrica equivalente a 3,6 KWh/día, lo mismo que decir 108 KWh/mes.

- Relación de la radiación horaria con respecto a la radiación diaria total:

De acuerdo con los datos anotados en la sección 1,4 de este trabajo de investigación:

- I_d : radiación incidente instantánea = $1\,000\text{ W/m}^2$.
- $H_d = \bar{I}_0$: relación diaria total de radiación solar promedio en Guatemala = $6\,500\text{ Wh/m}^2/\text{día}$.

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{1\,000}{6\,500} = 0,154$$

- Radiación que se refleja:

De acuerdo con los datos anotados en la sección 1.4. y la tabla XXVI de este trabajo de investigación:

- $H_d = \bar{I}_0$: relación diaria total de radiación solar promedio en Guatemala = $6\,500\text{ Wh/m}^2/\text{día}$, $\rho = 0,7$ y $g = 0,6$. Se asume $\phi_p = 0,9\text{m}$.

$$Q_{refl} = \bar{I}_0 \times \rho \times \left(\frac{\pi \times \phi_p^2}{4} \right) \times g = 6\,500 \times 0,77 \times \left(\frac{3,1416 \times 0,9}{4} \right) \times 0,6 = 1\,910 \frac{W}{m^2}$$

- Valor del calor de radiación que se capta en el foco caliente:

De acuerdo con la tabla XXVII para un acero inoxidable tipo espejo, $\varepsilon = 0,1$

$$Q_{rad} = \varepsilon \times Q_{refl} = 0,1 \times 1\,910 = 191\text{ W/m}^2$$

- Diámetro de la parábola:

$$\phi_p = \sqrt{\frac{4 \times Q_{rad}}{\varepsilon \times \bar{I}_0 \times \rho \times \pi \times g}} = \sqrt{\frac{4 \times 191}{0,1 \times 6\,500 \times 0,77 \times 3,1416 \times 0,6}} = 0,9 \text{ m}$$

- Altura de la parábola:

Según la teoría de la parábola, dice que su diámetro (ϕ_p) equivale a 4 veces la distancia focal (p). Entonces para la siguiente ecuación se tiene:

- $p = 0,225\text{m}$

$$h_\phi = \frac{\phi_p^2}{16 \times p} = \frac{0,9^2}{16 \times 0,225} = 0,225\text{m}$$

Tabla XXXVIII. **Resultado de variables principales de un sistema de motor térmico solar Stirling acoplado a un colector solar para la generación de energía eléctrica**

Variable	Nombre de la variable	Resultado
TH	Temperatura máxima del fluido de trabajo	423,15 °K
TL	Temperatura mínima del fluido de trabajo	306,15 °K
η teórica	Eficiencia teórica del ciclo	28%
V	Volumen medio interno	0,000038 m ³
m	Masa del fluido de trabajo	0,043 grs
V máx.	Volumen máximo del motor	0,000065 m ³
V min	Volumen mínimo del motor	0,000011 m ³
WNETO	Trabajo neto	59,7 K*J/Kg
Qentra	Calor suministrado al ciclo	215,7 K*J/Kg
η térmica	Eficiencia térmica	28 %
P máx.	Presión máxima	474,736 Pa

Continuación de la tabla XXXVIII.

P min	Presión mínima	58,219 Pa
F máx.	Fuerza máxima	256 N
F min	Fuerza mínima	28,6 N
F útil	Fuerza utilizable	265 N
Pmec	Potencia mecánica teórica	2,650 W
Putil	Potencia mecánica útil	742 W
T	Torque en el eje del motor	11,8 N - m
Pelec	Potencia eléctrica instantánea	600 W
Eelec	Energía eléctrica mensual	108 K*Wh/mes
rd	Relación de radiación horaria vrs radiación diaria total	0,154
Qrefl	Radiación que se refleja	1,910 W/m ²
Qrad	Valor del calor de radiación que se capta en el foco caliente	191 W/m ²
Φp	Diámetro de la parábola	0,9 m
hΦ	Altura de la parábola	0,225 m

Fuente: elaboración propia.

6.4. Cuantificación del prototipo de motor Stirling solar para la generación de energía eléctrica

“Según Infinia una entidad consultora de ingeniería especializada en sostenibilidad urbana el motor Stirling es el motor térmico más eficiente que existe, y el motor que ellos fabrican tiene un 24 % de rendimiento sobre la energía solar que recibe, el diámetro del concentrador solar es de 4,2 m y produce 3,5 KW de electricidad e indican que su precio actual es de 20 000,00 US\$ (Q 142 000,00)”¹⁸.

“Existen otras entidades investigadoras tales como GYROSCOPE.COM el cual es un sitio web dedicado a proyectos giroscópicos educacionales, existen

¹⁸ *El sorprendente motor Stirling.* <http://miqueridopinwino.blogspot.com/2010/12/el-sorprendente-motor-stirling-de.html>. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

desde 1999 y actualmente tienen un nuevo motor Stirling solar de disco parabólico que cuenta con un disipador de calor de latón y se puede conectar a cualquier trípode de cámara fotográfica convencional. Este motor ensamblado con un espejo parabólico de 18 pulgadas de diámetro y listo para funcionar lo ofrecen a un precio de 362,99 US\$ (Q 2 585,00)¹⁹.

A continuación, se presenta un presupuesto de construcción, del prototipo diseñado en este trabajo de investigación, que permite tener una idea de cuánto dinero se necesita para la implementación práctica de este proyecto.

En la tabla XXXIX se presenta el costo de elementos necesarios para la construcción del motor (ejes, tubos, láminas, electrodos, entre otros).

¹⁹ Gyroscope. https://www.gyroscope.com/d.asp?product=KS18_ASS_DISH#changeurrency. Consulta: 4 de noviembre de 2017.

Tabla XXXIX. **Presupuesto general para la construcción de prototipo de motor solar Stirling**

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica						
Análisis de funcionamiento y diseño de construcción de un prototipo de motor térmico Stirling para la conversión de energía solar en energía eléctrica						
Análisis de costos y presupuesto por renglones de trabajo						
Guatemala, agosto de 2018						
Renglón: 1 construcción de prototipo de motor solar Stirling						
Actividad:	1.01	motor solar Stirling	Cantidad:	1,00	Unidad	
Descripción de maquinaria y equipo						
I	Descripción		Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo directo
					Total con Iva	Q -
					Total SIN Iva	Q -
Descripción de combustible y lubricantes						
II	Descripción		Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo directo
	Combustible		1,00	global	Q 3,200,00	Q 3 200,00
					Total con Iva	Q 3 200,00
					Total sin Iva	Q 2 857,14
Descripción de transporte y flete						
III	Descripción		Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo directo
	Transporte		1,00	mes	Q 2 300,00	Q 2 300,00
					Total con Iva	Q 2 300,00
					Total sin Iva	Q 2 053,57
Descripción de materiales						
IV	Descripción		Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo directo
	Barra cuadrada de acero 2,5 x 2,5 cm		1	Unidades	Q 36,00	Q 36,00
	Barra rectangular de acero 2,0 x 2,0 x 50 cm		1	Unidades	Q 152,00	Q 152,00
	Barra rectangular de acero 2,0 x 2,0 x 20cm		3	Unidades	Q 60,00	Q 180,00
	Soporte de hule para soporte inferior		3	Unidades	Q 25,00	Q 75,00
	Cremallera mecánica para ventana de automóvil con manecilla		1	Unidades	Q 250,00	Q 250,00
	Eje de acero SAE 1045, 10 x 200 mm		1	Unidades	Q 96,00	Q 96,00
	Ejes de acero SAE 1045, 6 x 150 mm		2	Unidades	Q 105,00	Q 210,00
	Chaveta 3 x 10 mm		2	Unidades	Q 16,00	Q 32,00
	Barra sólida aluminio 15 x 40 mm		1	Unidades	Q 158,00	Q 158,00
	Jeringas de vidrio 10 x 50 mm		2	Unidades	Q 850,00	Q 1 700,00
	Abrazaderas de metal tipo "C"		4	Unidades	Q 15,00	Q 60,00
	Juego de tornillos, arandelas y tuercas de diferentes medidas		1	Unidades	Q 450,00	Q 450,00
	Ficha de acero al carbón 50 x 10 mm		1	Unidades	Q 45,00	Q 45,00
	Barra de aluminio, 50 x 30 mm		1	Unidades	Q 180,00	Q 180,00
	Piezas perfil "C" de acero al carbono, 50 x 50 x 20		4	Unidades	Q 30,00	Q 120,00
	Placa de acero al carbono, 10 x 150 x 250 mm		1	Unidades	Q 212,00	Q 212,00
	Varillas de electrodo 60-13 x 3/32"		14	Unidades	Q 3,00	Q 42,00
	Juego de seguros circulares para diámetros exteriores de 10mm		1	Unidades	Q 70,00	Q 70,00
	Barra angular de acero al carbono 1/2" x 1/2" x 12'		2	Unidades	Q 63,00	Q 126,00

Continuación de la tabla XXXIX.

	Lámina acero inoxidable pulida tipo espejo 1/16" x 4' x 8'	1	Unidades	Q 975,00	Q 975,00
	Tubo Hg cedula 20, 1-1/2" x 30"	1	Unidades	Q 154,00	Q 154,00
	Tubo acero al carbono cedula 20, 1/2" x 10"	1	Unidades	Q 48,00	Q 48,00
	Remaches de aluminio, 1/8" x 3*8"	150	Unidades	Q 2,50	Q 375,00
Componentes especiales					
	Luces led de colores de alta luminosidad	4	Unidades	Q 12,00	Q 48,00
	Generador de imanes permanentes 12V	1	Unidades	Q 975,00	Q 975,00
	Motor de CC 9V	1	Unidades	Q 50,00	Q 50,00
	Interruptor normalmente abierto	1	Unidades	Q 9,00	Q 9,00
	Metros de cable paralelo calibre 20	5	Unidades	Q 8,00	Q 40,00
				Total con Iva	Q 6 868,00
				Total sin Iva	Q 6 132,14
Descripción de mano de obra					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo directo
V	Fabricación cilindros de pistón de foco caliente y foco frío	2,00	Global	Q 95,00	Q 190,00
	Fabricación pistones para cilindro frío y cilindro caliente	2,00	Global	Q 60,00	Q 120,00
	Fabricación bielas	2,00	Global	Q 70,00	Q 140,00
	Fabricación de eje cigüeñal	1,00	Global	Q 425,00	Q 425,00
	Fabricación volante de inercia	1,00	Global	Q 75,00	Q 75,00
	Fabricación poleas para transmisión con banda plana	2,00	Global	Q 80,00	Q 160,00
	Fabricación y soldadura de soporte cigüeñal	2,00	Global	Q 140,00	Q 280,00
	Fabricación de estructura para soporte de concentrador parabólico	1,00	Global	Q 380,00	Q 380,00
	Doblado de tubo base para anclaje de soporte del concentrador parabólico	1,00	Global	Q 50,00	Q 50,00
	Corte de placas de acero inoxidable para superficie reflectora del concentrador solar	12,00	Global	Q 45,00	Q 540,00
					TOTAL
Integración del costo					
VI	Herramienta (5 % mano de obra (-) Iva)			Q 18,00	
	Costo directo (materiales + mano de obra + maquinaria+ herramientas)			Q 13 520,86	
	Costo indirecto			Q 2 028,13	
	Subtotal del renglón			Q 15 548,99	
	Utilidad			Q 219,60	
	Costo total			Q 21 768,59	
	Costo unitario			Q 21 768,59	

Fuente: elaboración propia.

En el presupuesto anteriormente descrito se realizó el análisis correspondiente a la fabricación de todos los elementos especiales que necesita el motor para su funcionamiento más eficiente, claro está que las partes que sufren desgaste dependen de la operación y mantenimiento.

Finalmente se toma en cuenta el presupuesto para la compra de componentes especiales que se requieren en el montaje del sistema de generación y para la realización de pruebas.

En el presupuesto los costos indirectos incluyen los rubros de timbres de ingeniería, planificación y servicios profesionales. En el presente modelo no se tomaron los impuestos que genera la construcción del prototipo.

El presupuesto para la compra de componentes especiales está incluido en el costo total de la fabricación del motor Stirling.

De acuerdo con los resultados de las tablas anteriores, para la construcción de un prototipo de motor Stirling tipo alfa acoplado a un concentrador solar de 90 cm de diámetro es necesario hacer una inversión económica de: Q 21 768,59 (US\$ 2 910,68).

CONCLUSIONES

1. El motor Stirling tipo alfa es adecuado para la construcción de un prototipo porque presenta un nivel medio de complejidad en la fabricación de sus partes; facilita la comprensión del ciclo de trabajo al disponer separadas la zona fría y la zona caliente; permite visualizar por separado las fases de expansión, transferencia y compresión.
2. Según el análisis realizado en el presente documento el costo de un prototipo de motor Stirling asciende a la cantidad de Q 21 768,59 (US\$ 2 910,68).
3. El ciclo de trabajo de un motor Stirling se consigue por medio de las fases de expansión, transferencia y compresión de un fluido de trabajo que puede ser: aire, helio, hidrógeno o nitrógeno; son más eficientes los de helio y nitrógeno.
4. El concentrador solar más fácil de acoplar con un sistema de motor Stirling es el de tipo parabólico, es fácil de diseñar y los materiales para su construcción se pueden adquirir sin dificultad en el mercado local.
5. La potencia mecánica y eléctrica del sistema de generación Stirling solar se ve directamente afectada por la alteración de temperatura de radiación solar a partir de los cambios climáticos, los cuales inciden en el valor de concentración solar; produce cambios en la presión de los cilindros disminuyendo o aumentando las RPM del eje del motor.

RECOMENDACIONES

1. Para la construcción de un motor Stirling se recomienda utilizar materiales adecuados para la fabricación de sus componentes, especialmente los de la zona fría y caliente para que permitan un desempeño óptimo en las fases de expansión, transferencia y compresión.
2. Utilizar fluidos de trabajo que permitan optimizar el valor de eficiencia, como el helio y nitrógeno, ya que estos facilitan el ciclo de trabajo y presentan menor resistencia en las fases de expansión, transferencia y compresión.
3. Utilizar láminas de acero inoxidable tipo espejo como material reflectante para la construcción del concentrador solar parabólico, ya que estas permitirán mejorar la eficiencia del prototipo propuesto a partir de la captación de energía solar térmica.
4. Para obtener valores estables de presión, RPM y potencia mecánica - eléctrica, a partir de la temperatura de trabajo se recomienda consultar el mapa de irradiación solar en Guatemala, para verificar que lugares son los menos afectados por los cambios climáticos y cuales tienen mayor disponibilidad de radiación solar durante todo el año.
5. En la construcción de un prototipo de motor Stirling se recomienda seguir un modelo de costos que permita controlar la inversión para la construcción e implementación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ FLORES, Jesús Andrés. *Maquinas térmicas motoras 1*. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2004. 300 p.
2. CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinámica. Tomo I*. 2a ed. México: McGaw-Hill, 1996. 581 p.
3. *Ciclo Stirling con energía solar*. [En línea]. <<https://image.slidesharecdn.com/ciclo-stirling-con-energia-solar-1227320496997241-9/95/ciclo-stirling-con-energia-solar-37-728.jpg?cb=1227291784>>. [Consulta: 11 de octubre de 2017].
4. GONZÁLEZ, José A. C.; PÉREZ, Roque C.; SANTOS, Antonio C. *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson Educación, S. A., 2009. 288 p.
5. *Julio de 2017, el mes más caluroso del año*. [En línea]. <<http://www.informador.com.mx/tecnologia/2017/734932/6/el-mes-de-julio2017-el-mas-caluroso-de-los-ultimos-137-anos.htm>>. [Consulta: 4 de septiembre de 2017].
6. *Motor-Stirling*. [En línea]. <<https://www.scribd.com/document/236172522/Motor-Stirling>>. [Consulta: 11 de octubre de 2017].

7. MUÑOZ DOMÍNGUEZ; Marta; ROVIRA DE ANTONIO, Antonio José. *Máquinas térmicas*. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2014. 676 p.
8. National Geographic. *Medio ambiente: la capa de ozono se recupera con altibajos*. [En línea]. <<http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/la-capa-de-ozono-se-recupera-con-altibajos>>. [Consulta: 11 de octubre de 2017].
9. READER, Graham; HOOPER, Charles. *Stirling engines; E &F.N. Spon.* Londres: McGaw-Hill, 1983. 339 p.
10. RODRÍGUEZ BECERRA, Manuel; MANCE, Henry. *Cambio climático: lo que está en juego*. [En línea]. <<http://library.fes.de/pdf-files/bueros/kolumbien/07216.pdf>>. [Consulta: 4 de septiembre de 2017].
11. ROSS, Andy. *Making Stirling engines*. 3a ed. San Diego, California: Live Steam, 1993. 68 p.
12. URQUIA LUS, Sebastián. *Energía renovable práctica*. Madrid, España: Pamiela, 2003. 183 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Planos descriptivos**

- Elevación y sección
- Detalles de cilindro y calentador
- Detalle de volante y manivela
- Detalle de soporte de pistón y cilindro
- Detalle de pistón frío y caliente
- Detalle de eje motriz y biela
- Detalle de empaques
- Colector solar parabólico

Fuente: elaboración propia.

