

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO INNOVADOR DE UN MOTOR STIRLING DIDÁCTICO DE DESPLAZADOR ROTATIVO**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

##### **AUTORES:**

**Fierro Ramos Esteban Santiago**

(estesanto2000@hotmail.com)

**Montalvo Márquez Francisco Javier**

(fj-2m@hotmail.com)

**DIRECTOR: Ing. Miguel Darío Ortega López, MSc.**

(miguel.ortega@epn.edu.ec)

**Quito, junio 2014**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Esteban Santiago Fierro Ramos y Francisco Javier Montalvo Márquez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, ala Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Esteban Santiago Fierro Ramos**

---

**Francisco Javier Montalvo Márquez**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Esteban Santiago Fierro Ramos y Francisco Javier Montalvo Márquez, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Miguel Darío Ortega López, MCs.**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a mi esposa, mi hijo, mis padres, mis hermanos y todas aquellas personas que estuvieron presentes y ofrecieron su apoyo para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Al Ingeniero Miguel Ortega, quien cumplió su rol fundamental de director de tesis y amigo y gracias a sus consejos y guía fue posible culminar con este proyecto.

Al Ingeniero Ángel Portilla, profesores y trabajadores de la Facultad y la Institución, quienes con su experiencia y conocimientos ayudaron en el desarrollo del proyecto.

**Esteban Santiago Fierro Ramos**

A Dios, mis padres, mis hermanas, mi abuelita, mi tía Genny, a Carla, quienes han sido un pilar fundamental para poder cumplir esta etapa en mi vida.

Al Ingeniero Miguel Ortega, director de este proyecto quien con sus acertados y pertinentes consejos ha hecho posible el desarrollo del mismo.

Al Ing. Ángel Portilla y a los trabajadores de la Facultad por su colaboración en el proyecto.

A todos los compañeros y amigos quienes han brindado su apoyo en el transcurso de mi carrera universitaria.

**Francisco Javier Montalvo Márquez**

## **DEDICATORIA**

A Dios, mi esposa, mi hijo, mis padres, mis hermanos, mis abuelos, familiares y amigos, con quienes he compartido los momentos más emotivos de mi vida.

**Esteban Santiago Fierro Ramos**

A Dios y a mis Padres

**Francisco Javier Montalvo Márquez**

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIV
NOMENCLATURA .....	XIX
RESUMEN .....	XXVI
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO .....	1
1.1. INTRUDUCCIÓN .....	1
1.2. MOTOR STIRLING, SU CICLO IDEAL Y REAL .....	2
1.2.1. CICLO TERMODINÁMICO DE STIRLING IDEAL.....	2
1.2.2. CICLO TERMODINÁMICO DE STIRLING REAL.....	4
1.3. CLASIFICACIÓN DEL MOTOR STIRLING.....	6
1.4. MOTORES STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO.....	9
1.4.1. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA.....	9
1.4.2. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO.....	12
1.5. ANÁLISIS MATEMÁTICO.....	15
1.5.1. MOVIMIENTO DEL PISTÓN Y CIGÜEÑAL.....	15
1.5.2. EFECTO DE LOS ESPACIOS MUERTOS.....	16
1.5.2.1. Efecto de volúmenes muertos en el motor Stirling tipo Beta.....	16
1.5.2.2. Efecto de volúmenes muertos en un motor Stirling Rotativo.....	21
1.5.3. EFECTO DE EFICIENCIA DEL REGENERADOR.....	25

1.5.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS MATEMÁTICO.....	29
1.5.4.1. Motor Stirling tipo Beta.....	29
1.5.4.2. Motor Stirling de Desplazador Rotativo.....	32
1.5.4.3 Variación Del Ángulo De Apertura .....	41
1.5.5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN EN EL INTERIOR DEL MOTOR.....	44
CAPÍTULO 2: ALTERNATIVAS Y MODELO SELECCIONADO .....	48
2.1 ALTERNATIVAS.....	48
2.1.1 MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO CON LOS FOCOS CALIENTE Y FRÍO EN EL CILINDRO Y DISPOSICIÓN HORIZONTAL.....	48
2.1.2. MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO CON LOS FOCOS CALIENTE Y FRÍO EN EL CILINDRO Y DISPOSICIÓN VERTICAL.....	49
2.1.3. MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO HORIZONTAL CON LOS FOCOS CALIENTE Y FRÍO EN PLACAS CONDUCTORAS EN LAS BASES DEL CILINDRO.....	51
2.2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....	52
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO .....	53
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	53
3.2 POTENCIA REQUERIDA PARA EL CICLO STIRLING.....	54
3.2.1 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA EL CICLO STIRLING. ....	54
3.2.1.1 Fluido de trabajo. ....	55
3.2.1.2 Revoluciones por minuto del motor.....	55
3.2.1.3 Temperatura del fluido caliente.....	55
3.2.1.4 Temperatura del fluido frío. ....	55

3.2.1.5 Volumen de fluido desplazado. ....	55
3.2.1.6 Variación del volumen en el pistón.....	55
3.2.1.7 Volúmenes Muertos. ....	55
3.2.1.8 Masa de aire en el motor. ....	55
3.2.1.9 Eficiencia del regenerador.....	56
3.2.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA EL CICLO STIRLING.....	56
3.3 COEFICIENTE DE CONVECCIÓN TEÓRICO EN EL MOTOR STIRLING. ....	60
3.3.1 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN. ....	60
3.3.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN. ....	61
3.4 CÁLCULO DEL ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR. ....	63
3.5 SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	64
3.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESPLAZADOR.....	64
3.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE AIRE .....	65
3.8 DIMENSIONAMIENTO LA PLACA SUPERIOR.....	66
3.9 DIMENSIONAMIENTO DEL CIGÜEÑAL .....	67
3.10 CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL.....	70
3.11 VOLTAJE DE FUNCIONAMIENTO.....	78
CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN Y RESULTADOS.....	79
4.1 OPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN 1 DE 3.....	79
4.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	79
4.1.2 BASE DEL MOTOR.....	80
4.1.2.1 Placa Conductora.....	81
4.1.2.2 Lámina de Material Aislante.....	82

4.1.2.3 Regenerador .....	84
4.1.3 CÁMARA DE AIRE .....	84
4.1.4 TOMA DE AIRE .....	86
4.1.5 DESPLAZADOR .....	86
4.1.6 TAPA SUPERIOR .....	89
4.1.6.1 Placa conductora de calor .....	89
4.1.6.2 Material aislante .....	90
4.1.7 CIGÜEÑAL .....	90
4.1.8 MONTAJE .....	91
4.1.9 RESULTADOS .....	92
4.2 OPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN 2 DE 3 .....	93
4.2.1 BASE DEL MOTOR .....	93
4.2.2 CÁMARA DE AIRE .....	94
4.2.3 TOMA DE AIRE .....	94
4.2.4 DESPLAZADOR .....	95
4.2.5 TAPA SUPERIOR .....	95
4.2.6 CIGÜEÑAL .....	96
4.2.7 MONTAJE .....	97
4.2.8 RESULTADOS .....	97
4.3 OPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN 3 DE 3 .....	98
4.3.1 CÁLCULOS PREVIOS .....	99
4.3.1.1 Altura del desplazador .....	99
4.3.1.2 Altura de la cámara de aire .....	99
4.3.1.3 Diámetro de la cámara de aire .....	99
4.3.1.4 Lados de la placa superior .....	100
4.3.1.5 Longitud del cigüeñal .....	100

4.3.2 BASE DEL MOTOR.....	100
4.3.3 CÁMARA DE AIRE.....	104
4.3.4 TOMA DE AIRE.....	104
4.3.5 DESPLAZADOR.....	105
4.3.6 TAPA SUPERIOR .....	107
4.3.7 CIGÜEÑAL .....	108
4.3.8 ENSAMBLE FINAL.....	109
4.4 DIAGRAMA DE OPERACIONES DE LA CONSTRUCCIÓN .....	111
4.5 COSTOS.....	112
4.6 RESULTADOS .....	113
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
CONCLUSIONES .....	114
RECOMENDACIONES.....	117
BIBLIOGRAFÍA .....	119
ANEXOS.....	121
ANEXO 1 TABLAS DE RESULTADOS TERMODINÁMICOS DE CADA TIPO DE MOTOR STIRLING ANALIZADO EN LA SECCIÓN 1.5.....	122
ANEXO 2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO. ....	143
ANEXO 3 ESPECIFICACIONES DEL POLIURETANO DE EXPANSIÓN RÁPIDA BISON .....	150
ANEXO 4 HOJA DE PROCESOS DEL MAQUINADO DE LA BASE DEL EJE	151
ANEXO 5 HOJA DE PROCESOS DE LA PLACA SUPERIOR DEL MOTOR STIRLING .....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1

Tabla 1-1 Datos para el motor Stirling tipo beta. ....	29
Tabla 1-2 Resultados obtenidos para el motor Stirling tipo Beta.....	30
Tabla 1-3 Resultados Termodinámicos obtenidos en el motor Stirling Tipo Beta.	31
Tabla 1-4 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [90°]. ....	32
Tabla1-5Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [90°]. ....	33
Tabla 1-6 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo .....	34
Tabla 1-7 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [90°]. ....	36
Tabla1-8 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [120°]. ....	38
Tabla1-9Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo .....	39
Tabla1-10 Casos de variación de ángulo de las secciones del foco caliente, foco frío y regenerador .....	41
Tabla 1-11 Parámetros utilizados para el análisis .....	42
Tabla 1-12 Resultados del análisis de la variación de ángulo de apertura.....	42

### CAPÍTULO 3

Tabla 3-1 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [120°]. ...	56
Tabla3-2 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [120°]. ....	57

Tabla3-3 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo .....	58
Tabla 3-4 Propiedades del aire a presión de una atmósfera. ....	60
Tabla3-5 Datos para determinar el coeficiente de convección por Transferencia de Calor. ....	61
Tabla3-6 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor en base al ángulo de giro. ....	62
Tabla 3-7 Resultado del coeficiente de convección promedio.....	63
Tabla 3-8 Dimensiones del desplazador .....	65
Tabla 3-9 Dimensiones de la cámara de aire .....	66
Tabla 3-10 Dimensiones de la placa superior .....	67
Tabla 3-11 Radio del cigüeñal en función de la longitud de la biela.....	69
Tabla 3-12 Dimensiones del cigüeñal .....	70
Tabla 3-13 Parámetros para calcular el calor perdido .....	76
Tabla 3-14 Resultados del pérdidas de calor en el motor. ....	77
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Tabla 4-1 Lista de materiales conductores.....	81
Tabla 4-2 Lista de materiales aislantes .....	83
Tabla 4-3 Densidades de los materiales para el desplazador.....	87
Tabla 4-4 Poliuretano de expansión rápida.....	88
Tabla 4-5 Parámetros para el dimensionamiento del motor Stirling .....	99
Tabla 4-6 Selección de materiales para la base del motor.....	101

Tabla 4-7 Materiales para la base del motor Stirling. ....	102
Tabla 4-8 Proporciones de componentes de la base del motor Stirling. ....	102
Tabla 4-9 Materiales para la cámara de aire del motor Stirling. ....	104
Tabla 4-10 Materiales para la toma de aire del motor Stirling. ....	105
Tabla 4-11 Materiales para el desplazador del motor Stirling.....	106
Tabla 4-12 Materiales para la tapa superior del motor Stirling. ....	107
Tabla 4-13 Materiales para el pistón del motor Stirling. ....	108
Tabla 4-14 Diagrama de operaciones de la construcción del motor Stirling.....	111
Tabla4-15 Precio de los materiales necesarios para el motor Stirling de desplazador rotativo .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1-1 Proceso de compresión isotérmica .....	2
Figura 1-2 Proceso de calentamiento isocórico.....	3
Figura 1-3 Proceso de expansión isotérmica. ....	3
Figura 1-4 Proceso de enfriamiento isocórico. ....	4
Figura 1-5 Ciclo ideal de un motor Stirling. ....	4
Figura 1-6 Ciclo de Stirling real (1'-2'-3'-4') sobrepuesto al ideal (1-2-3-4). ....	6
Figura 1-7 Clasificación general de los motores Stirling.....	8
Figura 1-8 Compresión Isotérmica en un motor Stirling tipo Beta. ....	10
Figura 1-9 Calentamiento Isocórico de un motor Stirling tipo Beta.....	11
Figura 1-10 Expansión Isotérmica en un motor Stirling tipo Beta.....	11
Figura 1-11 Enfriamiento Isocórico de un motor Stirling tipo Beta.....	12
Figura1-12 Ciclo termodinámico en una cámara circular y forma del desplazador.....	13
Figura 1-13 Ciclo que debe cumplir un desplazador rotativo.....	14
Figura 1-14 Influencia del movimiento del pistón en la variación del volumen. ....	15
Figura 1-15 Descomposición del diferencial de entropía.....	20
Figura 1-16 Condiciones Iniciales del funcionamiento del Motor Stirling Rotativo.22	22
Figura 1-17 División del volumen desplazado en un número finito de partes. ....	24
Figura 1-18 Efectividad del regenerador .....	26

Figura 1-19 Diagrama Presión – Ángulo de giro del Cigüeñal ( $P - \phi$ ) del motor Stirling tipo Beta. ....	31
Figura 1-20 Diagrama Presión vs Volumen ( $P-V$ ) del Motor Stirling tipo Beta. ....	31
Figura 1-21 Diagrama Temperatura vs Entropía ( $T - S$ ) del Motor Stirling tipo Beta. ....	32
Figura 1-22 Diagrama Presión – Ángulo ( $P - \phi$ ) de giro del Cigüeñal del motor Stirling de Desplazador Rotativo .....	34
Figura 1-23 Diagrama Presión vs Volumen ( $P-V$ ) del Motor Desplazador Rotativo .....	35
Figura 1-24 Diagrama Temperatura-Entropía ( $T - S$ ) del Motor Stirling de Desplazador Rotativo. ....	35
Figura 1-25 Presión vs Ángulo de giro ( $P - \phi$ ) del motor Stirling de desplazador rotativo con $120^\circ$ .....	39
Figura 1-26 Presión vs Volumen ( $P - \phi$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ ) .....	40
Figura 1-27 Temperatuta vs Entropía ( $T-S$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ ) .....	40
Figura 1-28 Variación del Trabajo neto en función del ángulo de abertura .....	43
Figura 1-29 Variación de la eficiencia del motor en función del ángulo de abertura .....	43
Figura 1-30 Perfiles de velocidades del aire cuando es desplazado, considerando que el flujo sea laminar .....	44
Figura 1-31 Simplificación del problema de transferencia de calor .....	45
 CAPÍTULO 2	
Figura 2-1 Motor Stirling DR con disposición horizontal y los focos en el cilindro.	48

Figura 2-2 Motor Stirling DR con disposición vertical y los focos en el cilindro. ...	49
Figura 2-3 Motor Stirling DR horizontal y placas conductoras en las bases como focos. ....	51
CAPÍTULO 3	
Figura 3-1 Modelo de Motor a diseñar .....	54
Figura 3-2 Presión vs Ángulo de giro ( $P - \phi$ ) del motor Stirling de desplazador rotativo con $120^\circ$ .....	58
Figura 3-3 Presión vs Volumen ( $P - V$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ ) .....	59
Figura 3-4 Temperatuta vs Entropía ( $T-S$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ ).....	59
Figura 3-5 Área de trasferencia de calor. ....	63
Figura 3-6 Disposición de la resistencia eléctrica en el área de transferencia de calor.....	64
Figura 3-7 Dimensiones consideradas para determinar la medida del largo y ancho de la placa inferior. ....	66
Figura 3-8 Esquema biela – cigüeñal .....	69
Figura 3-9 Consideración para la resistencia eléctrica.....	71
Figura 3-10 Análisis del flujo de calor en la base del motor .....	72
Figura 3-11 Circuito de Resistencias Térmicas. ....	73
Figura 3-12 Circuito de Resistencias simplificado. ....	73
Figura 3-13 Análisis de transferencia de calor de la placa superior. ....	74
Figura 3-14 Circuito de resistencias térmicas en la placa superior del motor.....	74

Figura 3-15 Circuito de resistencias térmicas simplificado para la placa superior.	74
Figura 3-16 Análisis de transferencia de calor en la cámara de aire.....	75
Figura 3-17 Circuito de resistencias térmicas en la pared de la cámara de aire. .	75
Figura 3-18 Circuito de resistencias térmicas simplificado para cámara de aire. .	75
CAPÍTULO 4	
Figura 4-1 Opción 1 de 3 para construcción .....	79
Figura 4-2 Base del motor Stirling 1-3.....	80
Figura 4-3 Placa de la base del motor Stirling 1-3.....	82
Figura 4-4 Regenerador del motor Stirling 1-3. ....	84
Figura 4-5 Cámara de aire del motor Stirling 1-3 .....	84
Figura 4-6 Toma de aire del motor Stirling 1-3. ....	86
Figura 4-7 Desplazador del motor Stirling 1-3. ....	86
Figura 4-8 Molde de acrílico para el desplazador de poliuretano 1-3.....	88
Figura 4-9 Tapa superior del motor Stirling 1-3.....	89
Figura 4-10 Placa aislante de la tapa superior .....	90
Figura 4-11 Cigüeñal del motor Stirling 1-3.....	90
Figura 4-12 Relación biela-cigüeñal .....	91
Figura 4-13 Opción 2-3 para construcción .....	93
Figura 4-14 Base del motor Stirling 2-3.....	94
Figura 4-15 Cámara de aire del motor Stirling 2-3 .....	94
Figura 4-16 Toma de aire del motor Stirling 2-3.....	95

Figura 4-17 Desplazador del motor Stirling 2-3.....	95
Figura 4-18 Tapa superior del motor Stirling 2-3.....	96
Figura 4-19 Cigüeñal del motor Stirling 2-3.....	96
Figura 4-20 Base del motor Stirling.....	100
Figura 4-21 Cámara de aire del motor Stirling.....	104
Figura 4-22 Toma de aire del motor Stirling.....	105
Figura 4-23 Desplazador.....	105
Figura 4-24 Geometrías de las partes del desplazador.....	106
Figura 4-25 Centro de gravedad del desplazador del motor Stirling.....	107
Figura 4-26 Placa superior aislada del motor Stirling.....	107
Figura 4-27 Eje torneado del motor Stirling.....	108
Figura 4-28 Cigüeñal del motor Stirling.....	109
Figura 4-29 Motor Stirling ensamble final.....	109

## NOMENCLATURA

- $a$ : Distancia entre el borde de la placa y la periferia de la cámara [ $mm$ ].
- $A$ : Área de transferencia de calor [ $m^2$ ].
- $A_p$ : Área del diafragma [ $m^2$ ].
- $C_v$ : Calor específico a volumen constante promedio [ $KJ/(Kg * K)$ ].
- $d$ : Diámetro interno de la cámara de aire [ $cm$ ].
- $d_{b-c}$ : Distancia entre la biela y el codo [ $mm$ ].
- $d_{p-c}$ : Distancia entre la placa superior y el codo [ $mm$ ].
- $dS$ : Diferencial de entropía [ $KJ/K$ ].
- $dU$ : Diferencial de energía interna [ $KJ$ ].
- $D$ : Diámetro de la cámara del pistón [ $mm$ ].
- $Db$ : Diámetro equivalente de la resistencia eléctrica como cilindro sólido de la base del motor [ $mm$ ].
- $D_D$ : Diámetro del desplazador [ $mm$ ].
- $D_H$ : Diámetro hidráulico de la sección transversal [ $m$ ].
- $D_p$ : Diámetro del pistón [ $mm$ ].
- $e$ : Espesor de la cámara [ $mm$ ].
- $e_{aisl}$ : Espesor del material aislante [ $mm$ ].
- $e_{cc}$ : Espesor del codo del cigüeñal [ $mm$ ].
- $e_{madera}$ : Espesor de la Madera [ $mm$ ].
- $e_p$ : Espesor de la placa superior [ $mm$ ].
- $F$ : Fuerza que ejerce el aire sobre el diafragma [ $N$ ].

- $F_{exp}$ : Fuerza que ejerce el aire en el proceso de expansión [N].
- $F_{comp}$ : Fuerza que ejerce el aire en el proceso de compresión [N].
- $h_a$ : Altura de la cámara de aire [mm].
- $h_{amb}$ : Coeficiente de convección al ambiente [ $W/(m^2 * K)$ ].
- $h_{base}$ : Altura de la base el motor [mm].
- $h_c$ : Coeficiente de convección en el motor [ $W/(m^2 * K)$ ].
- $h_d$ : Holgura entre el desplazador y la placa superior [mm].
- $h_D$ : Altura del desplazador [mm].
- $h_i$ : Holgura entre el foco caliente y el desplazador [mm].
- $h_s$ : Holgura que se tiene entre el foco frío y el desplazador [mm].
- $i$ : Número del elemento analizado.
- $k$ : Conductividad térmica del aire [ $W/(m * K)$ ].
- $k_{Al}$ : Conductividad térmica del aluminio [ $W/(m * K)$ ].
- $k_{acril}$ : Conductividad térmica del acrílico [ $W/(m * K)$ ].
- $k_{amianto}$ : Conductividad térmica del amianto [ $W/(m * K)$ ].
- $k_{madera}$ : Conductividad térmica de la madera [ $W/(m * K)$ ].
- $k_{yeso}$ : Conductividad térmica del yeso [ $W/(m * K)$ ].
- $l_c$ : Longitud del cigüeñal [mm].
- $l_p$ : Longitud de la placa [mm].
- $L$ : Carrera del diafragma [mm].
- $L_D$ : Carrera del desplazador [mm].
- $L_p$ : Carrera del pistón [mm].

$L_t$ : Longitud de transferencia de Calor[mm].

$m$ : Masa del aire [kg].

$m_L$ : Masa de aire frío en el motor [Kg].

$m_H$ : Masa de aire caliente en el motor [Kg].

$m_R$ : Masa de aire en el regenerador del motor [Kg].

$M$ : Masa total de aire en el motor [Kg].

$n$ : Partes en las que se divide el volumen de aire del desplazador.

$N_{uD}$ : Número de Nusselt.

$P$ : Presión del aire [KPa].

$Pr$ : Número de Prandl.

$Q_e = Q_{3-4}$ : Calor de entrada en el ciclo Stirling para la expansión[KJ].

$\dot{Q}_e$ : Flujo de calor de entrada en el ciclo Stirling para la expansión[W].

$Q_{reg}$ : Calor de regeneración en el ciclo Stirling[KJ].

$Q_s$ : Calor de salida en el foco frío [W].

$\dot{Q}_s$ : Flujo de calor de salida en el foco frío[W].

$Q_{In}$ : Calor total necesario de una fuente externa para el ciclo Stirling[KJ].

$\dot{Q}_{In}$ : Flujo de calor total necesario de una fuente externa para el ciclo Stirling[W].

$Q_{3'-3} = Q_{ADReg}$ : Calor adicional para completar la regeneración [KJ].

$\dot{Q}_p$ : Calor total perdido [W].

$\dot{Q}_{pbase}$ : Calor perdido en la base [W].

$\dot{Q}_{pcam}$ : Calor perdido en la cámara [W].

$Q_{RegC}$ : Calor necesario para el calentamiento isocórico [KJ].

$Q_{RegC}'$ : Calor real para el calentamiento isocórico [KJ].

$\dot{Q}_{total}$ : Flujo de calor que debe ingresar al motor [W].

$\dot{Q}_{total}$ : Potencia eléctrica de la resistencia [W].

$r$ : Radio del cigüeñal [mm].

$r_f$ : Radio de giro del fluido [m].

$r_1$ : Radio de la fuente de calor [mm] .

$r_2$ : Radio interior de la base del motor [mm].

$r_3$ : Radio de la carcasa de la base del motor [mm].

$R$ : Constante Universal de los gases [KJ/(Kg \* K)].

$R_1$ : Resistencia a la conducción en el yeso en la base del motor [K/W].

$R_2$ : Resistencia por conducción en la carcasa de la base [K/W].

$R_3$ : Resistencia a la convección entre la carcasa de la base y el medio [K/W].

$R_4$ : Resistencia a la conducción en el aislante de la placa superior [K/W].

$R_5$ : Resistencia a la conducción en la placa superior [K/W].

$R_6$ : Resistencia a la convección entre la placa superior y el medio [K/W].

$R_7$ : Resistencia a la conducción en la cámara de aire [K/W].

$R_8$ : Resistencia a la convección entre la cámara de aire y el medio [K/W].

$R_e$ : Número de Reynolds.

$R_{tot}$ : Resistencia térmica equivalente en la base del motor [K/W].

$R_{totps}$ : Resistencia térmica equivalente en la placa superior [K/W].

$R_{totacrílico}$ : Resistencia térmica equivalente en la cámara de aire [K/W].

$S_{(\phi)}$ : Entropía en función del ángulo de giro del cigüeñal [ $KJ/K$ ].

$t$ : Tiempo de giro del desplazador [ $s$ ].

$T$ : Temperatura del aire [ $K$ ].

$T_H$ : Temperatura promedio del aire en el foco caliente [ $K$ ].

$T_L$ : Temperatura promedio del aire en el foco frío [ $K$ ].

$T_{PH}$ : Temperatura de la placa caliente [ $K$ ].

$T_R$ : Temperatura del aire en el regenerador [ $K$ ].

$T_2$ : Temperatura en la base de la cámara [ $K$ ].

$T_{3'}$ : Temperatura a la salida del regenerador [ $^{\circ}C$ ].

$T_{(\phi)}$ : Temperatura global del motor en función del ángulo de giro [ $K$ ].

$v_{(\omega,r,y)}$ : Velocidad del fluido en función de  $\omega, r, y$  [ $m/s$ ].

$v_{max}$ : Velocidad máxima del fluido a un radio de giro dado [ $m/s$ ].

$v_{aire}$ : Velocidad del aire [ $m/s$ ].

$V$ : Volumen del aire [ $m^3$ ].

$V_{desplazado}$ : Volumen total de aire desplazado [ $m^3$ ].

$V_{MP}$ : Volumen muerto en el pistón [ $cm^3$ ].

$V_{pistón}$ : Volumen total desplazado por el pistón [ $m^3$ ].

$V_P$ : Volumen de aire en el pistón [ $cm^3$ ].

$V_{H(\phi)}$ : Volumen de aire caliente en función del ángulo de giro del cigüeñal [ $cm^3$ ].

$V_{mH}$ : Volumen muerto en el foco caliente [ $cm^3$ ].

$V_{L(\phi)}$ : Volumen de aire frío en función del ángulo de giro del cigüeñal [ $cm^3$ ].

$V_{mL}$ : Volumen muerto en el foco frío [ $cm^3$ ].

$V_{Reg}$  : Volumen presente en el regenerador [ $cm^3$ ].

$V_{T(\phi)}$  : Volumen total de aire en el motor [ $cm^3$ ].

$V_{(\theta)}$  : Volumen de aire de cada parte que se divide el volumen desplazado [ $cm^3$ ].

$W_{NETO}$ : Trabajo neto del ciclo [ $KJ$ ].

$y$  : Distancia entre la pared y el fluido [ $mm$ ].

$\alpha_d$  : Ángulo fijo que determina la región o zona dentro del motor Stirling [ $^\circ$ ].

$\theta$  : Ángulo entre la biela y el eje central del pistón [ $^\circ$ ].

$\theta_{(\phi,i)}$  : Ángulo que correspondiente a la parte  $i$  del volumen de aire del desplazador [ $^\circ$ ].

$\phi$  : Ángulo de giro del cigüeñal [ $^\circ$ ].

$\delta W$ : Diferencial de trabajo entregado [ $KJ$ ].

$\delta Q$ : Diferencial de calor internamente reversible [ $KJ$ ].

$\Delta Q_{isot}$ : Variación de calor isotérmico [ $kJ$ ].

$\Delta Q_{isoc}$ : Variación de calor isocórico [ $kJ$ ].

$\Delta S_{(\phi)}$ : Variación de entropía en función del ángulo de giro [ $KJ/K$ ].

$\Delta S_{isoc(\phi)}$ : Variación de entropía isocórica [ $KJ/K$ ].

$\Delta S_{isot(\phi)}$ : Variación de entropía isotérmica [ $KJ/K$ ].

$\Delta \phi$  : Variación del ángulo recorrido [ $rad$ ].

$\varepsilon_{Reg}$  : Efectividad del regenerador.

$\eta_T$ : Eficiencia térmica del motor.

$\rho$  : Densidad del aire [ $Kg/m^3$ ].

$\nu$  : Viscosidad cinemática del aire [ $m^2/s$ ].

$\mu$  : Viscosidad dinámica o absoluta del aire [ $N * s/m^2$ ].

$\mu_p$  : Viscosidad dinámica o absoluta de la pared [ $N * s/m^2$ ].

$\omega$ : Velocidad angular del desplazador [rad/s].

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo principal diseñar un modelo didáctico de Motor Stirling para el Laboratorio de Termodinámica. Para el desarrollo del mismo se divide en cinco capítulos.

El primer capítulo es un estudio teórico, en donde se describe el ciclo termodinámico teórico y real de un motor Stirling y su clasificación, además hace referencia al funcionamiento de un motor tipo beta a partir del cual se analiza el funcionamiento del motor Stirling con desplazador rotativo. Como base para el nuevo diseño, se presenta un análisis matemático en el cual se analiza: el movimiento del pistón y el cigüeñal, efecto de los espacios muertos, efecto de la eficiencia del regenerador y una comparación de los resultados obtenidos dentro de este análisis.

En el segundo capítulo se presenta tres opciones de modelos de motor Stirling con desplazador rotativo, los cuales difieren en la disposición y geometrías de cada una de sus partes.

El tercer capítulo se centra en el diseño del motor Stirling seleccionado, determinando los parámetros de diseño, de los elementos y partes del motor como son: la cámara de aire, desplazador, placa superior, placa inferior, cigüeñal.

En el capítulo cuatro en base al diseño ya establecido del motor, se plantea tres alternativas de construcción, en donde las dos primeras no proporcionan los resultados esperados, siendo sin embargo la base para obtener la tercera alternativa, la cual es la guía de construcción del nuevo modelo didáctico de un motor Stirling. Se presenta además un diagrama de operaciones, costos y resultados.

Finalmente, en el capítulo cinco se describen las conclusiones y recomendaciones que surgen durante el desarrollo del proyecto.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El Motor Stirling fue patentado en 1816 por el reverendo escocés Robert Stirling, dicho motor funciona bajo un ciclo termodinámico de un gas como fluido de trabajo, que puede ser aire, nitrógeno, helio, etc.

El ciclo ideal de un motor Stirling funciona entre un gradiente definido de temperatura desde la fuente (alta temperatura) al sumidero (baja temperatura). Al ser estos procesos isotérmicos es posible obtener eficiencias ideales iguales a las del ciclo de Carnot.

La ejecución del ciclo Stirling con fin de generar potencia, requiere de equipos de tecnología avanzada, ya sea al hablar de materiales para soportar altas temperaturas en su foco caliente y bajas temperaturas en su foco frío; materiales con alta masa térmica para su regeneración; sellos para garantizar la hermeticidad del sistema, aún al hablar de un gas como fluido de trabajo.

Sin embargo con fines docentes y didácticos existen motores Stirling de bajo gradiente de temperatura, los cuales son de bajo costo, con modelos innovadores, pequeños y que funcionan adecuadamente.

Mediante la construcción de este tipo de motores que aparentemente son sencillos, se debe tomar en cuenta criterios de ingeniería que hacen posible que el diseño y funcionamiento de un motor Stirling se acerque a los cuatro procesos ideales que forman el ciclo.

De esta manera se busca una retroalimentación de conocimiento de los estudiantes para generar mejores diseños de motores didácticos, entendiendo el ciclo termodinámico fundamental y comprobando como en la realidad la Termodinámica, la Mecánica de Fluidos, la transferencia de Calor, el Diseño de Máquinas se fusionan y hacen posible la Ingeniería.

Este proyecto de titulación busca implementar un nuevo modelo de motor Stirling cuyo desplazador ya no tenga el movimiento alternativo que generalmente se construye en el Laboratorio de Termodinámica, ahora se busca que el movimiento del desplazador sea rotativo, buscando innovar el modelo clásico y dejar a los estudiantes una guía constructiva para que anticipando los posibles obstáculos, los estudiantes puedan llegar al objetivo de poner en funcionamiento un motor Stirling con el desplazador rotativo.

## 1.2. MOTOR STIRLING, SU CICLO IDEAL Y REAL.

### 1.2.1. CICLO TERMODINÁMICO DE STIRLING IDEAL.

El ciclo Stirling ideal se compone de cuatro procesos termodinámicos, de los cuales, dos son procesos isotérmicos (a temperatura constante) y dos son procesos isocóricos (a volumen constante), De esta manera se tiene lo siguiente:

1-2 Compresión isotérmica.

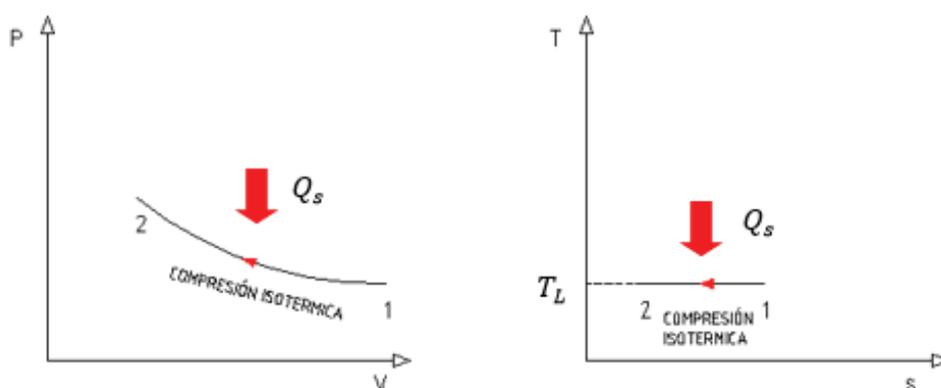


Figura 1-1 Proceso de compresión isotérmica

Como se muestra en la Figura 1-1, el fluido de trabajo alcanza su temperatura mínima  $T_L$ , esto se logra rechazando calor  $Q_s$  a un sumidero externo que se encuentra a la misma temperatura, en este proceso se observa que el volumen del fluido de trabajo disminuye, aumentando la presión.

2-3 Calentamiento isocórico

En la Figura 1-2 se observa que forma parte de un proceso de regeneración, en donde se da una transferencia de calor del regenerador hacia el fluido de trabajo, teniendo así un pre calentamiento del fluido, es decir la temperatura del fluido se

incrementa y con ello se aumenta la presión. Todo este proceso se lo realiza a volumen constante, es decir que se tiene una compresión a volumen constante, algo similar a lo que se tiene en la etapa ideal de explosión de un motor a gasolina.

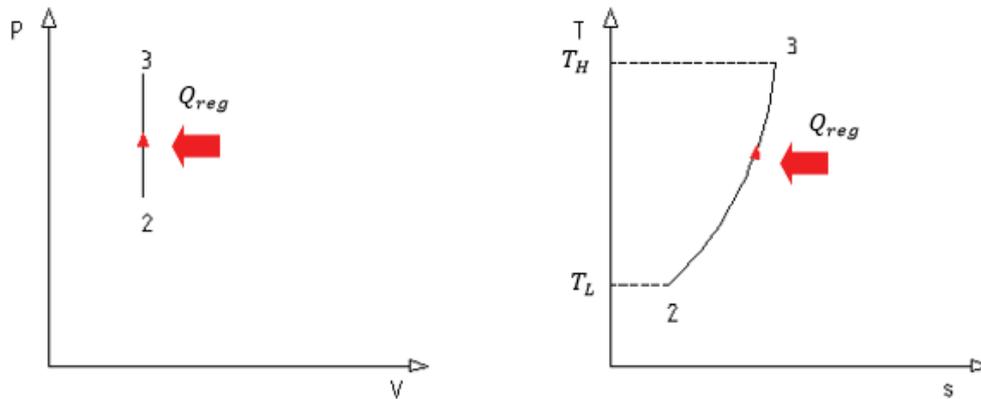


Figura 1-2 Proceso de calentamiento isocórico.

#### 3-4 Expansión isotérmica

En este proceso el fluido de trabajo se alcanza la máxima temperatura  $T_H$ , debido a que el sistema se encuentra recibiendo calor  $Q_e$  de una fuente a temperatura constante como se puede observar en la Figura 1-3, además, la presión del sistema disminuye y con ello el volumen aumenta.

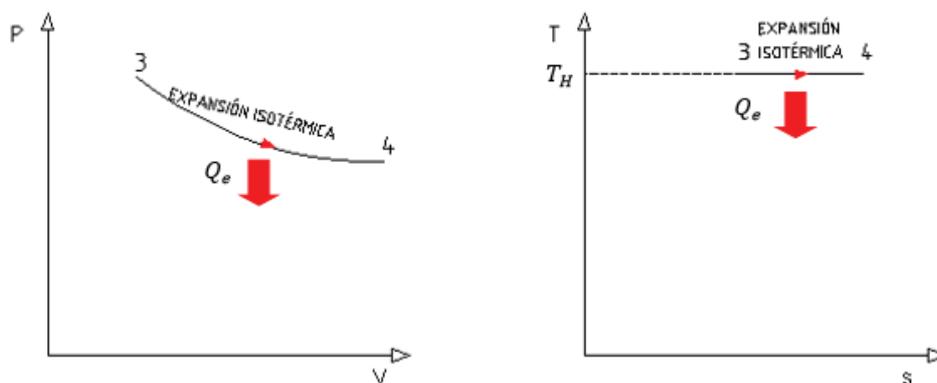
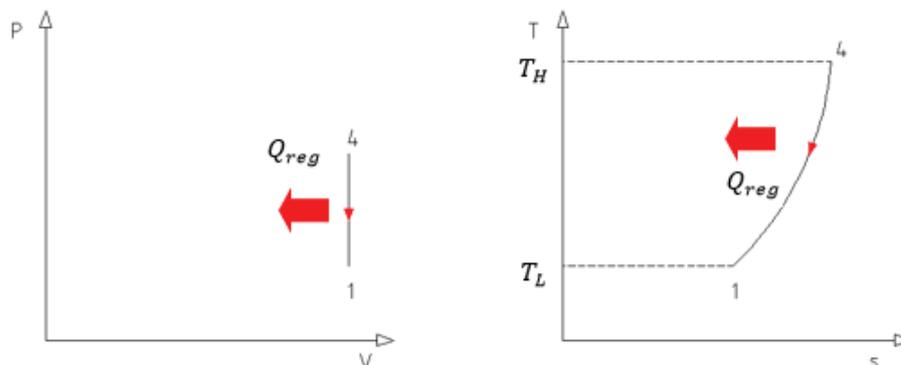


Figura 1-3 Proceso de expansión isotérmica.

#### 4-1 Enfriamiento isocórico.

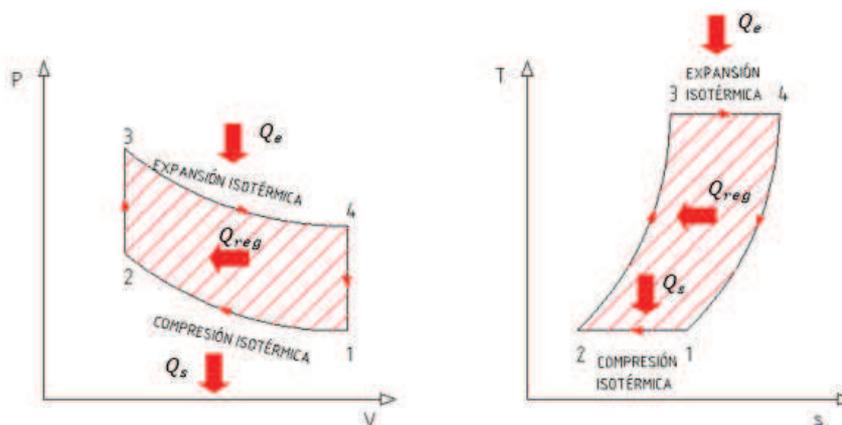
Al igual que en el proceso de calentamiento isocórico, éste también es un proceso de regeneración, en donde se realiza una transferencia de calor por parte del fluido de trabajo hacia el regenerador, con lo cual se tiene un pre enfriamiento del

fluido consiguiendo con esto que la presión disminuya a volumen constante y que la temperatura disminuya, en la *Figura 1-4* se puede observar dicho proceso.



*Figura 1-4* Proceso de enfriamiento isocórico.

Con los cuatro procesos ya descritos anteriormente se ha cumplido un ciclo ideal del motor Stirling, es decir que se asume una regeneración perfecta, en donde el calentamiento a volumen constante del fluido de trabajo sería igual al calentamiento del regenerador a volumen constante, teniendo así un diagrama P-V y un diagrama T-s como se muestra en la *Figura 1-5*.



*Figura 1-5* Ciclo ideal de un motor Stirling.

### 1.2.2. CICLO TERMODINÁMICO DE STIRLING REAL.

En la realidad, dentro de un motor Stirling los procesos no son ideales, esto se debe a irreversibilidades y efectos principalmente de transferencia de calor que no permiten que los procesos sean isotérmicos o isocóricos, las principales causas que generan que el ciclo no sea ideal son:

- Transferencia de Calor Incompleta en el Enfriamiento.- Idealmente en este proceso, el aire es comprimido por un rechazo de calor a un sumidero a temperatura constante, sin embargo esto no sucede. No todo el fluido desplazado se mantiene a una temperatura constante durante este proceso, esto se debe a la resistencia térmica de los elementos que transfieren el calor y la resistencia térmica del mismo fluido. Lo cual lleva a que la temperatura global del fluido sea mayor a la del sumidero.
- Transferencia de Calor Incompleta en el Calentamiento.- Idealmente en este proceso, el aire es expandido por una ganancia de calor de una fuente a temperatura constante, sin embargo esto no sucede. No todo el fluido desplazado se mantiene a una temperatura constante durante este proceso, debido a la resistencia térmica de los elementos que transfieren el calor y la resistencia térmica del mismo fluido. Haciendo que la temperatura global del fluido sea menor a la de la fuente.
- Eficiencia de la regeneración.- Idealmente se considera una regeneración completa, esto quiere decir que el fluido transfiere calor al regenerador a volumen constante disminuyendo la temperatura de  $T_H$  a  $T_L$  (*Figura 1-4*), luego todo este calor que gana el regenerador es transferido al fluido de nuevo para incrementar la temperatura a volumen constante de  $T_L$  a  $T_H$  (*Figura 1-2*). Sin embargo esto no sucede, el fluido solamente transfiere una cierta cantidad de calor al regenerador y este transfiere una cantidad menor de nuevo al fluido. Con esto se habla de una eficiencia del regenerador.
- Fugas del fluido.- Uno de los retos de un motor Stirling es alcanzar la estanqueidad del fluido en la cámara. Esta falta de estanqueidad dentro del sistema da lugar a que en la expansión del fluido disminuya la presión alta y en la compresión aumente la presión baja.
- Volúmenes muertos.- En el ciclo ideal se considera que todo el aire dentro de la cámara va a enfriarse y calentarse, sin embargo existe cierta cantidad de aire que no cumple o no se ocupa para el ciclo, esto reduce el trabajo de salida del motor. Por esta razón es necesario disminuir al máximo estos espacios muertos.

- Fricciones.- Dentro de un motor Stirling didáctico, este puede ser el factor decisivo para que el mismo funcione o no, estas irreversibilidades generan un trabajo negativo para el motor y pueden ser tan grandes que evitarían el funcionamiento del mismo, por esta razón se deben eliminar todo tipo de fricciones indeseables del sistema.
- Movimiento del pistón.- El mecanismo usado para transmitir la potencia, genera una variación del ciclo ideal, dependiendo de la naturaleza del mismo.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, el ciclo de Stirling real va a ser diferente a un ciclo ideal, causando una disminución del trabajo efectivo del ciclo, como se muestra en la Figura 1-6. El trabajo efectivo corresponde al área sombreada delimitada por los procesos 1'-2' compresión, 2'-3' ganancia de calor en regenerador, 3'-4' expansión, 4'-1' rechazo de calor en regenerador.

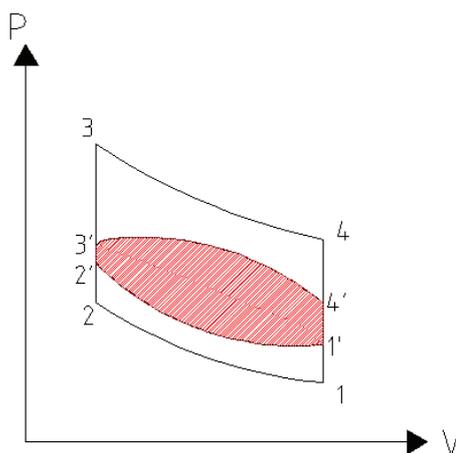


Figura 1-6 Ciclo de Stirling real (1'-2'-3'-4') sobrepuesto al ideal (1-2-3-4).

### 1.3. CLASIFICACIÓN DEL MOTOR STIRLING.

Un motor Stirling puede clasificarse teniendo en cuenta diferentes criterios:

Por su manera de operación

Por el acople del cilindro

Por el acople del pistón

De una manera general, se tiene la siguiente clasificación:

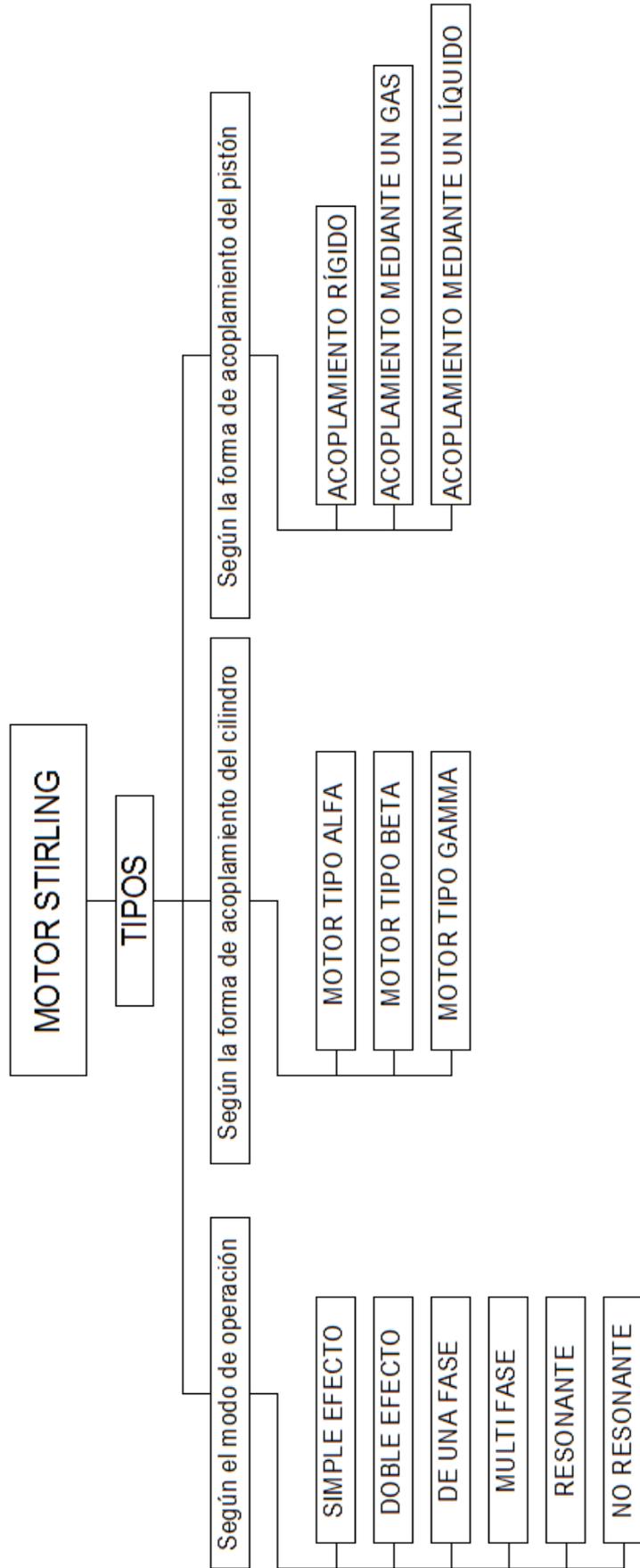


Figura 1-7 Clasificación general de los motores Stirling.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENRÍQUEZ L.; GUADALUPE J. Diseño y Construcción de un Motor Stirling solar para el Laboratorio de Termodinámica, EPN, 2011, Sección 1.2

Según esta clasificación general, el motor Stirling con desplazador rotativo no se encuentra específicamente en un tipo solamente, sino en diferentes grupos:

- Motor Stirling de una fase, ya que el flujo de trabajo es un gas.
- Motor Stirling con acoplamiento del pistón tipo rígido.
- Motor Stirling de simple efecto, ya que solamente se tiene un pistón de potencia.

#### **1.4. MOTORES STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO.**

La diferencia de un motor Stirling con desplazador rotativo y un motor Stirling convencional radica en que el aire ya no es desplazado por un movimiento axial de un desplazador empujado por un pistón, sino por un movimiento rotacional de un desplazador que es empujado por un pistón, siendo conveniente analizar la manera en cómo se desarrolla el ciclo en un motor Stirling tipo beta, cuya construcción es la más común dentro de los estudiantes de Ingeniería Mecánica.

##### **1.4.1. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR STIRLING TIPO BETA.**

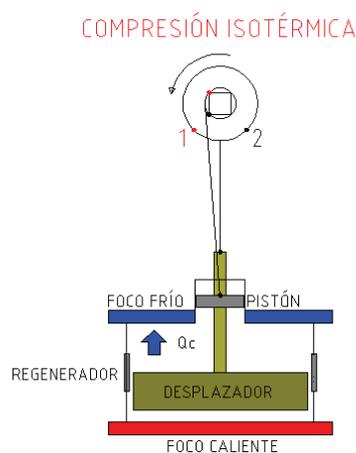
El motor Stirling tipo beta, es el motor de mayor construcción dentro de los motores didácticos de baja diferencia de temperatura. Las características del funcionamiento de este motor son las siguientes:

- La forma de la cámara de aire puede ser de cualquier figura geométrica y es quien delimita el espacio en donde se encuentra el aire. Es recomendable que la cámara sea de un material rígido y de baja conductividad térmica.
- El desplazador adquiere la forma de la cámara y cumple la función de desplazar el aire desde el foco frío al foco caliente y viceversa, por lo que es importante que sea de un material de baja conductividad térmica.
- El regenerador es muy pequeño y se ubica en las paredes del desplazador o en las paredes internas de la cámara, con esto se busca que el aire al ser desplazado desde el foco frío al foco caliente o viceversa transfiera calor al regenerador y luego ese mismo calor sea devuelto al aire.
- El foco frío es una placa conductora de calor que se encuentra en la parte superior y se encuentra a temperatura ambiente.

- El foco caliente es una placa conductora de calor que se encuentra en la parte inferior y es calentada por una fuente de energía, ya sea de naturaleza eléctrica, solar, combustión externa, etc.
- El pistón o diafragma se lo puede tomar de cualquier parte, pero es recomendable tomarlo desde el foco frío.
- El cigüeñal es el elemento que va a ser empujado por el pistón y a mover al desplazador, mediante bielas sujetas al mismo, en el cigüeñal se debe tener un ángulo de noventa grados entre el posicionamiento de la biela que mueve al desplazador y la biela que mueve el pistón.

El ciclo termodinámico de Stirling se da de la siguiente manera en el motor tipo beta.

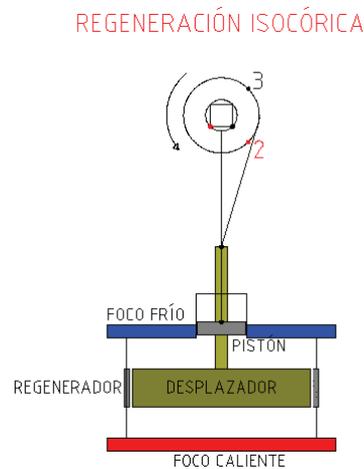
Compresión Isotérmica (1-2).- En la *Figura 1-8* se muestra la posición del desplazador y del pistón del motor cuando se produce la compresión isotérmica. Como se puede observar en este proceso, el desplazador se encuentra en la parte inferior, por lo que la mayor cantidad de aire se encuentra en contacto con el foco frío, el pistón se encuentra bajando. Como consecuencia, el aire empieza a comprimirse, haciendo que el volumen de aire disminuya y la presión aumente conforme se rechaza calor al sumidero de baja temperatura. El desplazamiento del pistón hace girar el cigüeñal desde el punto 1 al punto 2.



*Figura 1-8 Compresión Isotérmica en un motor Stirling tipo Beta.*

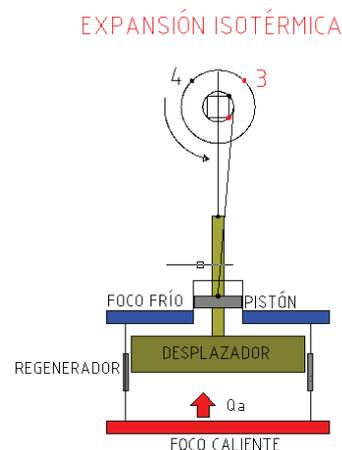
Calentamiento Isocórico (regeneración 2-3).- En la *Figura 1-9* se puede observar el proceso de calentamiento Isocórico, el desplazador se mueve desde la parte inferior a la parte superior, haciendo que el aire que estaba en el foco frío pase

por el regenerador ganando calor del mismo para aumentar su temperatura y presión, manteniendo su volumen constante. El pistón se mueve alrededor del punto muerto inferior, es decir el cigüeñal gira desde el punto dos al punto tres.



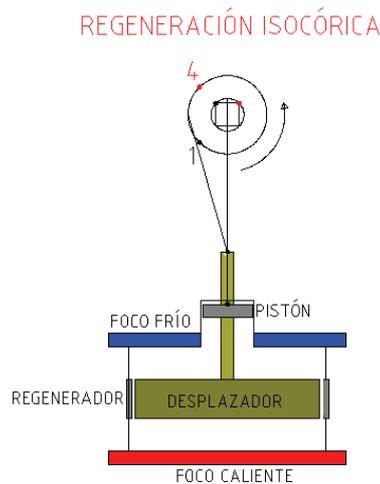
*Figura 1-9 Calentamiento Isocórico de un motor Stirling tipo Beta.*

Expansión Isotérmica (3-4).-En la *Figura 1-10* se muestra la posición del desplazador y del pistón del motor cuando se da la expansión isotérmica. En este punto el desplazador se encuentra en la parte superior, por lo que la mayor cantidad de aire se encuentra en contacto con el foco caliente, el pistón se encuentra subiendo, por lo que en este proceso el aire empieza a expandirse, haciendo que el volumen de aire aumente y la presión disminuya conforme se rechaza calor al sumidero de baja temperatura. Esto hace que el pistón se desplace hacia arriba haciendo girar el cigüeñal desde el punto tres al punto cuatro.



*Figura 1-10 Expansión Isotérmica en un motor Stirling tipo Beta.*

Enfriamiento Isocórico (regeneración 4-1).- En la *Figura 1-11* se puede observar el proceso de enfriamiento Isocórico, el desplazador se mueve desde la parte superior hacia la parte inferior, haciendo que el aire que estaba en el foco caliente pase por el regenerador cediendo calor al mismo para disminuir su temperatura y presión a volumen constante. El pistón se mueve alrededor del punto muerto superior, es decir el cigüeñal gira desde el punto cuatro al punto uno.



*Figura 1-11 Enfriamiento Isocórico de un motor Stirling tipo Beta.*

#### 1.4.2. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO.

La idea que el desplazador del motor tenga un movimiento rotativo en lugar del movimiento axial es innovadora, sin embargo para garantizar un ciclo termodinámico de Stirling, el motor debe cumplir con dos procesos isotérmicos y dos procesos isocóricos. Es decir que el fluido de trabajo para cumplir un ciclo en el trayecto del mismo tendrá que:

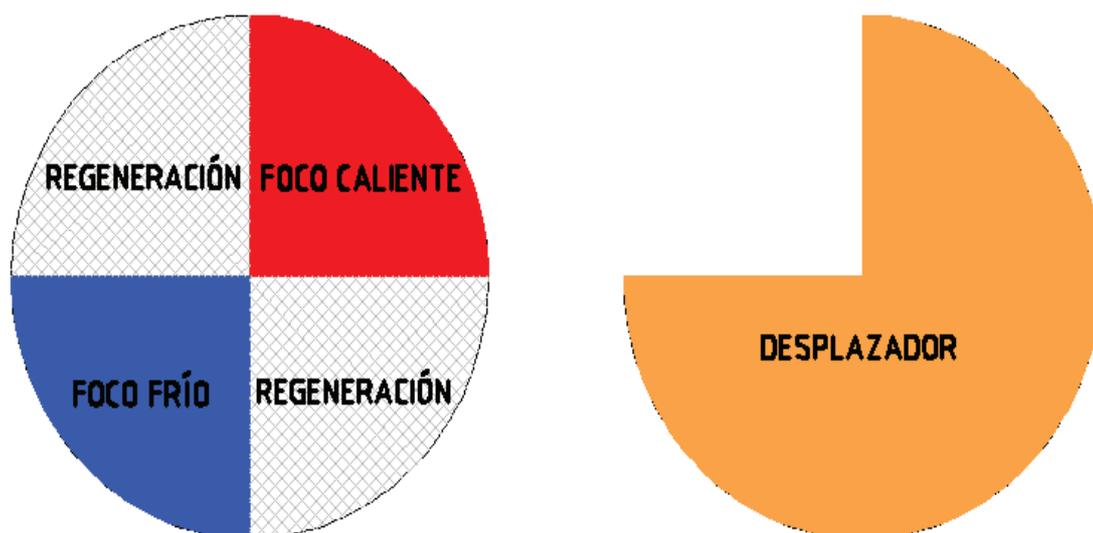
- Ganar calor de una fuente que se encuentra a una temperatura máxima.
- Ceder calor a un regenerador para disminuir su temperatura a volumen constante.
- Rechazar calor a un sumidero que tiene una temperatura mínima.
- Recibir calor del regenerador para aumentar su temperatura a volumen constante.

Para una mejor comprensión de la manera que el aire debería ser movido por el desplazador se considera la forma básica de un movimiento rotativo, que es un

círculo. Por esta razón el desplazador va a tener la forma de una sección circular de doscientos setenta grados, en los noventa grados que no va a cubrir el desplazador se va a situar el fluido de trabajo (aire) el cual va a cumplir el ciclo termodinámico. De esta manera, básicamente la cámara presenta una forma cilíndrica y la base circular del cilindro se va a dividir en cuatro partes que concuerdan con cada uno de los procesos termodinámicos del ciclo.

Cabe recalcar que se podría considerar una división en ocho partes del círculo en vez de cuatro, de esta manera se evitaría el desbalanceo del desplazador, pero esto incluye además un mecanismo reductor de velocidad externo, ya que por cada vuelta del cigüeñal se cumplirían dos ciclos termodinámicos del aire. En este proyecto de titulación el diseño y la construcción se centran solamente en la división en cuatro partes de la cámara cilíndrica para que por cada vuelta del cigüeñal se cumpla un ciclo termodinámico.

Dicho lo anterior se puede ilustrar en la Figura 1-12 la disposición del foco caliente, foco frío y la regeneración concerniente a los procesos que debe cumplir el aire en el motor. Y la forma del regenerador que desplazará el aire por cada una de las regiones.



*Figura 1-12 Ciclo termodinámico en una cámara circular y forma del desplazador.*

Entonces, mientras el desplazador va girando (movimiento rotativo), se cumple el siguiente ciclo:

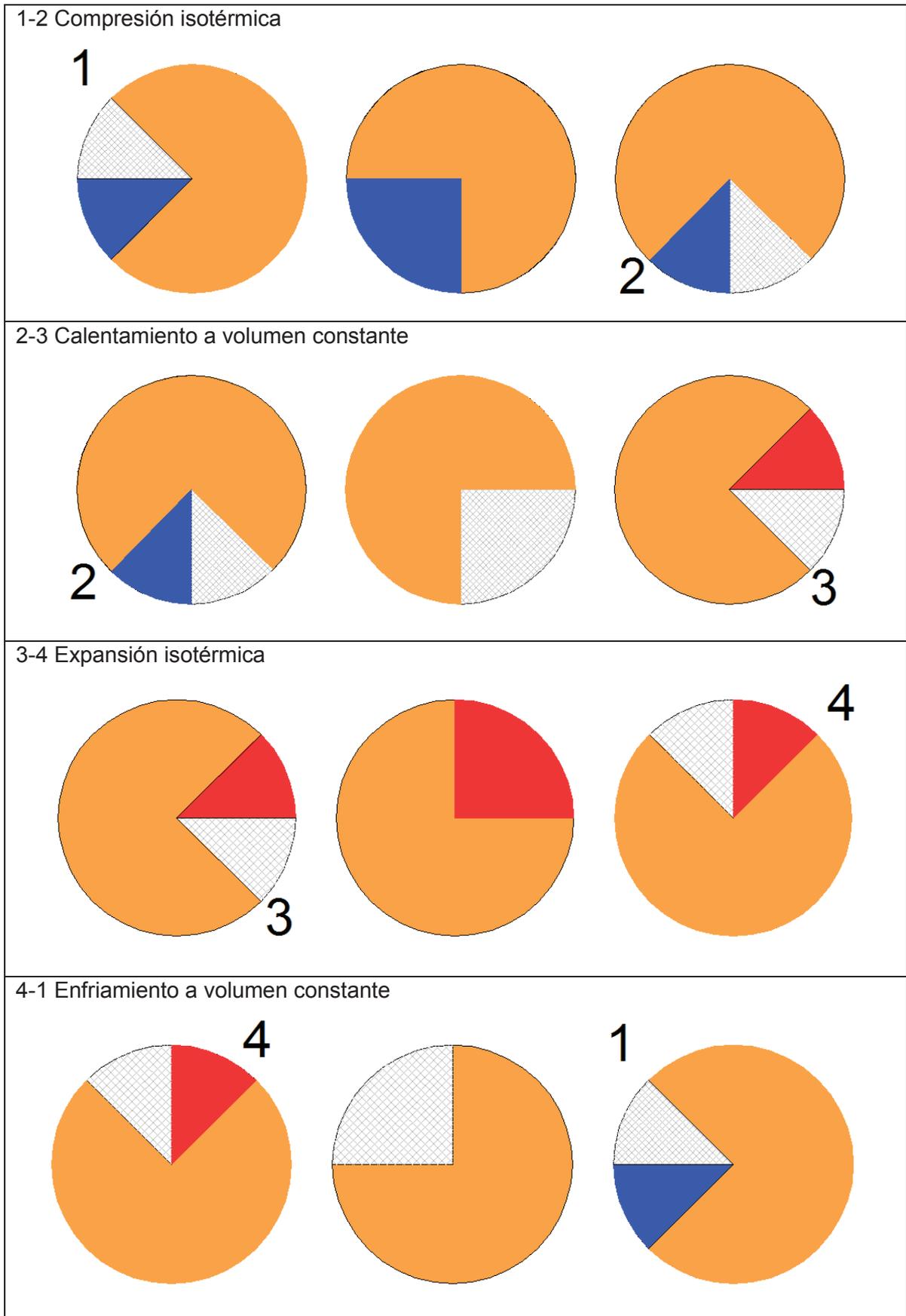


Figura 1-13 Ciclo que debe cumplir un desplazador rotativo.

## 1.5. ANÁLISIS MATEMÁTICO.

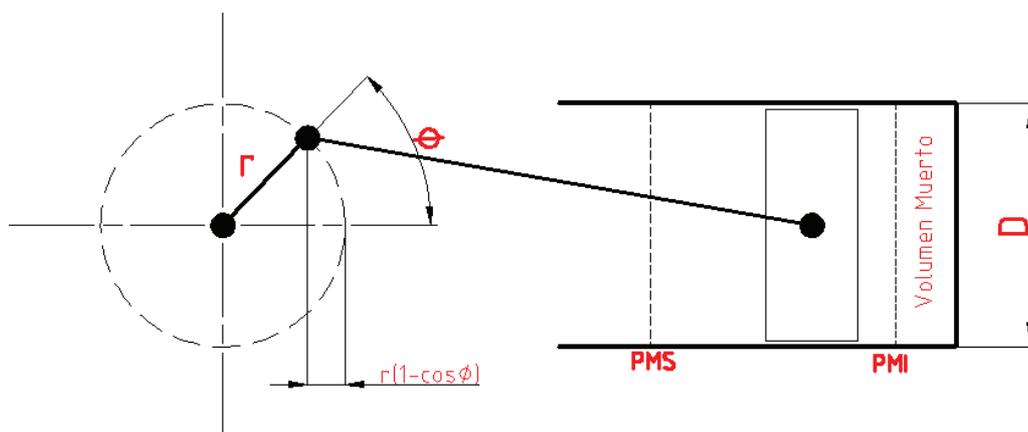
El análisis matemático del presente proyecto de titulación se basa en una comparación del desempeño de un motor Stirling tipo beta didáctico y un motor Stirling de desplazador rotativo de dimensiones similares.

Dentro del análisis matemático se va a considerar los siguientes parámetros que afectan el funcionamiento ideal de un motor Stirling:

- Movimiento del Pistón y el cigüeñal.
- Espacios muertos.
- Eficiencia de regeneración.

### 1.5.1. MOVIMIENTO DEL PISTÓN Y CIGÜEÑAL.

El mecanismo más común para simular el movimiento del pistón es el de biela – manivela, el cual influye directamente en la forma que varía el volumen del aire cuando el mismo se calienta o se enfría. En la cámara se consideran principalmente: El volumen desplazado por el pistón desde el punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI) y el volumen muerto de la cámara.



*Figura 1-14 Influencia del movimiento del pistón en la variación del volumen.*

En la *Figura 1-14* se muestra la forma en que varía el volumen de la cámara con relación al ángulo de giro del cigüeñal, el volumen que desplaza el pistón en la cámara depende de las siguientes variables:

- $r$ : Radio del cigüeñal.

- D: Diámetro de la cámara del pistón.
- $\phi$ : Ángulo de giro del cigüeñal.

La expresión que permite determinar cómo varía el volumen de la cámara del pistón, en función de estos parámetros es la siguiente:

$$V_P = V_{MP} + \frac{\pi * D^2}{4} * r_c * (1 - \cos\phi) \quad (1-1)$$

De la misma manera se puede calcular como varía el volumen de cada una de las zonas en donde se da un proceso termodinámico, dependiendo del ángulo de giro del cigüeñal, ya que el pistón mueve al cigüeñal, pero este a su vez mueve al desplazador, ya sea un motor tipo beta o un motor de desplazador rotativo.

### 1.5.2. EFECTO DE LOS ESPACIOS MUERTOS.

Para realizar el análisis matemático en base a los volúmenes muertos hay que diferenciar las suposiciones y consideraciones en lo que refiere a los volúmenes presentes en la cámara, cabe recalcar que esta consideración también es para el movimiento del desplazador del motor tipo beta.

#### 1.5.2.1. Efecto de volúmenes muertos en el motor Stirling tipo Beta.

En la cámara del motor se pueden encontrar tres regiones y una consideración importante es que cada una de estas regiones se encuentra a una temperatura constante y uniforme, dichas regiones son:

- La presión va a ser la misma en todas las regiones del motor en un instante determinado.
- Volumen caliente:  $V_H$  que se encuentra a  $T_H$  o temperatura máxima.
- Volumen frío:  $V_C$  que se encuentra a  $T_C$  o temperatura mínima.
- Volumen de regeneración:  $V_R$  que se encuentra a  $T_R$  o temperatura de regeneración. Para el fin de este análisis esta región se encontrará a una temperatura promedio entre la temperatura máxima y temperatura mínima.

$$T_R = \frac{T_H + T_C}{2} \quad (1-2)$$

Cada una de estas regiones es el resultado de la suma de dos volúmenes: el volumen útil que conforme es movido por el desplazador cumple los procesos del

ciclo termodinámico y el volumen muerto que como su nombre lo indica no es de utilidad o no interviene en el ciclo de potencia.

En el motor Stirling tipo beta se considera que el volumen en el regenerador es constante y no varía a lo largo del proceso, es decir que los únicos volúmenes que van a variar son el volumen de aire presente en el foco frío y el volumen de aire presente en el foco caliente. Por otra parte, al volumen del foco frío se le debe sumar el volumen del pistón o diafragma ya que el mismo se encuentra en el foco frío. Cabe recalcar que la variación de este volumen se origina por el proceso de expansión o compresión del aire.

De esta manera se encuentran las siguientes relaciones:

$$V_{pistón} = \pi * \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 * L_p * 10^{-9} [m^3] \quad (1-3)$$

$$V_{desplazado} = \pi * \left(\frac{D_D}{2}\right)^2 * L_D * 10^{-9} [m^3] \quad (1-4)$$

Con los volúmenes totales determinados por las relaciones (1-3) y (1-4). Y en vista de que el pistón y el desplazador tienen un movimiento axial, mediante una relación análoga a la ecuación (1-1), se puede determinar la variación del volumen caliente y frío.

Las condiciones iniciales de funcionamiento son cuando el ángulo de giro del cigüeñal  $\phi$  es cero y estas nos permiten determinar las ecuaciones de cada volumen:

- El desplazador se encuentra en la mitad de su recorrido dirigiéndose hacia arriba ( $\phi = 0$ ).
- Se encuentra igual volumen de aire en el foco frío y en el foco caliente.
- El pistón se encuentra en su punto muerto inferior ( $\phi = 0$ ).
- La presión en este punto es igual a la presión atmosférica  $P_{atm} = 71.982 \text{ Kpa}$ .

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente se determina que:

$$V_{H(\phi)} = \frac{V_{Desplazado}}{2} * (1 + \text{sen}\phi) * 10^6 + V_{mH} [cm^3] \quad (1-5)$$

$$V_{L(\phi)} = \left( \frac{V_{Desplazado}}{2} * (1 - \text{sen}\phi) + \frac{V_{pistón}}{2} * (1 - \text{cos}\phi) * \pi * \left( \frac{D_p}{2 * 10^{-3}} \right)^2 \right) * 10^6 + V_{mL} [cm^3] \quad (1-6)$$

$$V_{T(\phi)} = V_{H(\phi)} + V_{L(\phi)} + V_{Reg} [cm^3] \quad (1-7)$$

Una vez encontradas las ecuaciones (1-5) y (1-6) para determinar los volúmenes presentes en cada región de acuerdo al giro del cigüeñal. Se encuentra la masa total de aire presente en el motor, en base a la ecuación general de los gases ideales y a la sumatoria de masas en el motor para las condiciones iniciales establecidas anteriormente.

$$P * V = m * R * T^2 \quad (1-8)$$

$$M = m_H + m_L + m_R \quad (1-9)$$

$$M = \frac{P_{(\phi=0)} * V_{H(\phi=0)}}{R * T_H} + \frac{P_{(\phi=0)} * V_{C(\phi=0)}}{R * T_L} + \frac{P_{(\phi=0)} * V_R}{R * T_R} \quad (1-10)$$

La ecuación (1-10) permite determinar la masa total de aire presente en el motor bajo las condiciones iniciales y en vista de que se considera un sistema sin fugas o hermético, esta masa va a permanecer constante durante todo el funcionamiento del motor.

Entonces, una vez encontrado la masa de aire en el motor y la variación del volumen en función del ángulo, con las ecuaciones (1-8) y (1-9) se puede determinar la presión global en el motor Stirling en función del ángulo de giro del cigüeñal. A continuación se muestra la ecuación (1-11)

$$P_{(\phi)} = \frac{M * R * T_H * T_L * T_R * 10^6}{V_{H(\phi)} * T_L * T_R + V_{L(\phi)} * T_H * T_R + V_{R(\phi)} * T_H * T_L} \quad (1-11)$$

De esta manera una vez conocido el volumen total y la presión del aire del motor en función del ángulo de giro del cigüeñal, se puede encontrar fácilmente datos del funcionamiento del motor como:

Temperatura Global.- La expresión que permite determinar la temperatura global dentro del motor se consigue despejando la temperatura de la ecuación (1-8).

$$T_{(\phi)} = \frac{P_{(\phi)} * V_{T(\phi)}}{R * M * 10^6} \quad (1-12)$$

Trabajo Neto.- Para determinar el trabajo se parte de la siguiente expresión:

$$W_{NETO} = \oint \delta W = \oint P * dV^3 \quad (1-13)$$

La ecuación integral (1-13) se puede expresar en notación de diferencias finitas de la siguiente manera:

$$W_{NETO} = \sum_{Ciclo} \Delta W_{(\phi)} = \sum_{Ciclo} \lim_{\Delta V \rightarrow 0} (P_{(\phi)} * \Delta V) \quad (1-14)$$

La diferencia finita del trabajo se la puede encontrar mediante la siguiente expresión:

$$\Delta W_{(\phi)} = P_{(\phi)} * \frac{V_{T(\phi)} - V_{T(\phi-10^\circ)}}{10^6} \quad (1-15)$$

Entropía.- Para determinar la variación de la entropía dentro del ciclo, se parte de la ecuación de Gibbs o primera ecuación  $T ds$ , para posteriormente resolverla. Hay que tomar en cuenta que  $T ds$  es la diferencial de calor en el ciclo.

$$Tds = dQ \quad (1-16)$$

$$Tds = dU + M * P * dV^4 \quad (1-17)$$

Despejando el diferencial de entropía de la ecuación (1-16), se puede obtener de manera explícita el cambio diferencial de entropía específica.

$$ds = \frac{dU}{T} + \frac{M * P * dV}{T} \quad (1-18)$$

<sup>3</sup>CENGEL, Y; Termodinámica; Ecuación (4-2); página 166.

<sup>4</sup>CENGEL, Y; Termodinámica; Ecuación (7-23); página 352.

Considerando que el aire es un gas ideal y los calores específicos se consideran como los promedios en el rango de temperaturas que se está tratando, se obtiene la siguiente ecuación:

$$dS = M \left( C_V \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} \right) \quad (1-19)$$

A la ecuación(1-19) se la puede dividir en dos partes: la primera como una diferencial de entropía isocórica y la segunda como una diferencial de entropía isotérmica, esto se puede entender de mejor manera en laFigura 1-15que muestra el siguiente gráfico T-S.

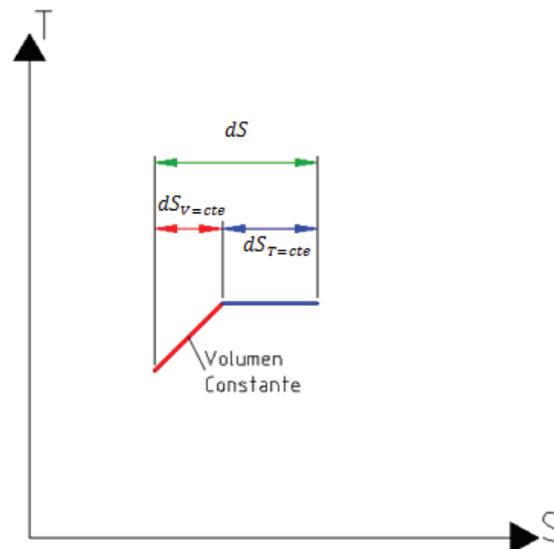


Figura 1-15 Descomposición del diferencial de entropía.

Entendiendo esto es posible resolver la ecuación de la entropía por dos caminos:

Primero.- Resolviendo la ecuación diferencial (1-19), tomando como punto de origen para la entropía ( $S_{\phi=0} = 0$ ), las condiciones iniciales dadas para el modelo matemático.

$$S_{(\phi)} = M \left( C_V * \ln \frac{T_{\phi}}{T_{\phi=0}} + R * \ln \frac{V_{\phi}}{V_{\phi=0}} \right) \quad (1-20)$$

Segundo.- Tratando la ecuación diferencial no como tal sino como diferencias finitas, tomando en cuenta lo expresado en laFigura 1-15 Descomposición del diferencial de entropía..

$$\Delta S_{(\phi)} = \Delta S_{isoc(\phi)} + \Delta S_{isot(\phi)} \quad (1-21)$$

Para determinar la variación de entropía isocórica e isotérmica respectivamente, se divide la ecuación(1-19) en los dos sumandos de la siguiente manera.

$$\Delta S_{isot(\varnothing)} = \frac{M * R * (V_{T(\varnothing)} - V_{T(\varnothing-20^\circ)})}{0.5 * (V_{T(\varnothing)} + V_{T(\varnothing-20^\circ)})} \quad (1-22)$$

$$\Delta S_{isoc(\varnothing)} = \frac{M * C_v * (T_{(\varnothing)} - T_{(\varnothing-20^\circ)})}{0.5 * (T_{(\varnothing)} + T_{(\varnothing-20^\circ)})} \quad (1-23)$$

### 1.5.2.2. Efecto de volúmenes muertos en un motor Stirling Rotativo.

Para realizar este análisis se va a considerar la diferencia principal entre el funcionamiento del motor Stirling rotativo y el motor Stirling tipo beta, la cual es el movimiento del desplazador.

En el motor Stirling tipo beta, cuyo análisis matemático se centró en la sección 1.5.2.1, se indica que el desplazador tiene un movimiento alternativo, por lo que el desplazamiento del volumen de aire se puede analizar de acuerdo a la ecuación(1-1) y además se considera que el volumen de aire en el regenerador es constante, es decir no varía al girar el cigüeñal.

En el motor Stirling de desplazador rotativo, no es factible realizar ninguna de estas dos suposiciones, ya que como se muestra en la *Figura 1-13*, no se puede considerar que el volumen en el regenerador es constante, ya que varía con el movimiento del desplazador.

Por esta razón, es necesario cambiar el modelo matemático en cuanto se refiere a la variación del volumen de aire dentro de las tres zonas del motor (foco frío, foco caliente o regeneración).

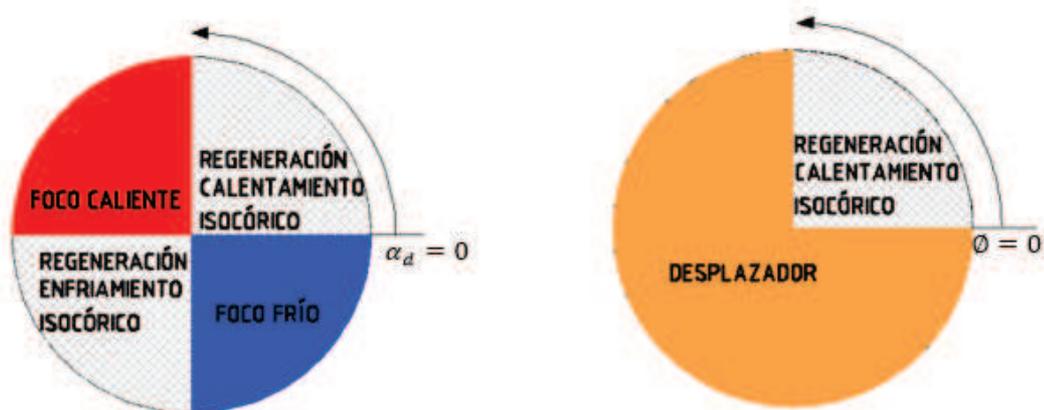
Este problema es muy complicado para resolverlo de manera analítica, por esta razón se parte desde dos puntos de vista: Las regiones del motor y la ubicación del desplazador en estas regiones.

Para determinar las regiones del motor es necesario establecer el punto de inicio o condiciones iniciales de funcionamiento del motor Stirling Rotativo ( $\varnothing = 0$ ), las

cuales con fines de análisis van a ser las mismas que el motor Stirling tipo beta. Es decir:

- Se encuentra igual volumen de aire en el foco frío y en el foco caliente y el mayor volumen de aire posible se encuentra en el regenerador.
- El pistón se encuentra en su punto muerto inferior ( $\phi = 0$ ).
- La presión en este punto es igual a la presión atmosférica  $P_{atm} = 71.982 \text{ Kpa}$ .

Para satisfacer estas condiciones iniciales, se considera que el motor está dividido en cuatro zonas que tienen noventa grados cada una y el punto cero es cuando el desplazador se encuentra totalmente en la región de calentamiento isocórico cómo se muestra en la Figura 1-16



*Figura 1-16 Condiciones Iniciales del funcionamiento del Motor Stirling Rotativo.*

En la Figura 1-16 se puede observar dos ángulos:

$\alpha_d$ : Ángulo fijo que determina la región o zona dentro del motor Stirling.

$\phi$ : Ángulo móvil que muestra el giro del cigüeñal y como este a su vez mueve el desplazador del desplazador.

Dependiendo de la posición del desplazador, y a su vez de la posición del aire se tiene:

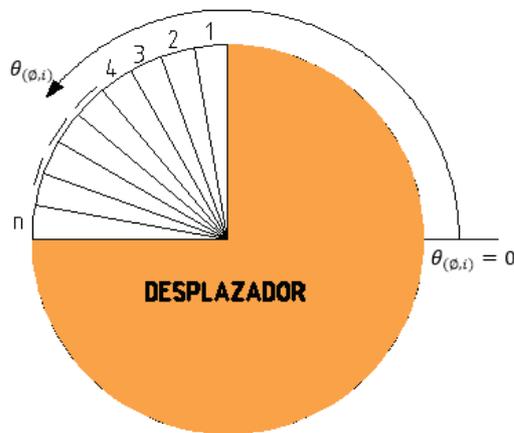
- Si el aire se encuentra entre  $0^\circ \leq \alpha_d < 90^\circ$  está en la zona de regeneración que corresponde al calentamiento isocórico.
- Si el aire se encuentra entre  $90^\circ \leq \alpha_d < 180^\circ$  está en la zona del foco caliente que corresponde a la expansión isotérmica.
- Si el aire se encuentra entre  $180^\circ \leq \alpha_d < 270^\circ$  está en la zona de regeneración que corresponde al enfriamiento isocórico.
- Si el aire se encuentra entre  $270^\circ \leq \alpha_d < 360^\circ$  está en la zona del foco frío que corresponde a la compresión isotérmica.

Sin embargo, una vez que el desplazador entra en movimiento, el aire total presente en la cavidad del desplazador puede encontrarse en diferentes regiones o zonas, dependiendo del ángulo de giro del cigüeñal es así que:

- En el estado inicial  $\emptyset = 0^\circ$  todo el aire se encuentra en el calentamiento isocórico o regeneración.
- Mientras  $0^\circ < \emptyset < 90^\circ$  el volumen de aire en el regenerador va a ir disminuyendo, mientras que el volumen de aire en el foco caliente va a ir aumentando.
- Cuando  $\emptyset = 90^\circ$  todo el aire se encuentra en el foco caliente.
- Mientras  $90^\circ < \emptyset < 180^\circ$  el volumen de aire en el foco caliente va a ir disminuyendo, mientras que el volumen de aire en el regenerador va a ir aumentando.
- Cuando  $\emptyset = 180^\circ$  todo el aire se encuentra en el enfriamiento isocórico o regeneración.
- Mientras  $180^\circ < \emptyset < 270^\circ$  el volumen de aire en el regenerador va a ir disminuyendo, mientras que el volumen de aire en el foco frío va a ir aumentando.
- Cuando  $\emptyset = 270^\circ$  todo el aire se encuentra en el foco frío.
- Mientras  $270^\circ < \emptyset < 360^\circ$  el volumen de aire en el foco frío va a ir disminuyendo mientras que el volumen de aire en el regenerador va a ir aumentando.
- Cuando  $\emptyset = 360^\circ$  se habrá llegado a la posición inicial, repitiéndose nuevamente el ciclo.

Una manera para determinar de una manera rápida la cantidad de aire presente en cada región, es con ayuda del computador y un paquete de software amigable a formar matrices y arreglos matemáticos como son Excel o MatLAB.

Se divide el ángulo de  $90^\circ$  correspondiente a la cavidad del desplazador en un número finito de partes, para que de esta manera cada sección circular formada represente a un pequeño volumen de aire presente en la cavidad del desplazador que al ser sumado por los demás resulte el volumen desplazado, como se muestra en la Figura 1-17.



*Figura 1-17 División del volumen desplazado en un número finito de partes.*

Para cada ángulo de giro del cigüeñal ( $\phi$ ), el computador debe comparar en que región se encuentra cada una de las partes a las que se ha dividido el volumen de aire, de la siguiente manera:

$$\theta_{(\phi,i)} = \phi + \sum_{i=0}^n i * \frac{90^\circ}{n} \quad (1-24)$$

El volumen correspondiente a cada una de las partes del desplazador se lo obtiene en base a la fórmula de área por altura.

$$V_\theta = \pi * \frac{D_D^2}{16 * n} * ha * 10^{-6} \quad (1-25)$$

De esta manera se compara el ángulo  $\theta_{(\phi,i)}$  y al ángulo  $\alpha_d$ , con un lazo If-Then Else se determina a que región del motor corresponde cada parte y finalmente se

suma este volumen a la región correspondiente. Se recomienda que número de divisiones o particiones sea de 45, 90 o 180 partes.

Una vez encontrado el volumen de cada región en función del ángulo de giro, se procede a usar las ecuaciones:

- (1-1) y (1-3) para determinar el volumen del pistón, considerando que ahora se encuentra dentro del foco caliente y no del foco frío.
- (1-2) Temperatura en el regenerador.
- (1-7) Volumen total del motor.
- (1-10) para determinar la masa total del motor Stirling.
- (1-11) Presión global del motor.
- (1-12) Temperatura global del motor.
- (1-14) y (1-15) Trabajo neto del motor.
- (1-21), (1-22) y (1-23) Variación de entropía del sistema.

Obtenidos estos valores se puede hacer una comparación entre el motor Stirling tipo beta y el motor Stirling Rotativo.

### **1.5.3. EFECTO DE EFICIENCIA DEL REGENERADOR.**

El regenerador, idealmente, es el intercambiador de calor encargado de captar energía del fluido caliente, para enfriarlo a volumen constante hasta la temperatura del foco frío y luego ese mismo calor lo transfiere el regenerador al fluido frío para calentarlo a volumen constante hasta la temperatura del foco caliente.

Sin embargo esto no sucede, el regenerador, como cualquier intercambiador de calor tiene una efectividad, que en este caso ocasiona que el calor que se entrega al fluido frío sea menor que el calor que gana el fluido caliente, como consecuencia a esto, la temperatura al finalizar el proceso de calentamiento a volumen constante va a ser menor a la temperatura del foco caliente ( $T_{3'}$ ), como se muestra en la *Figura 1-18*

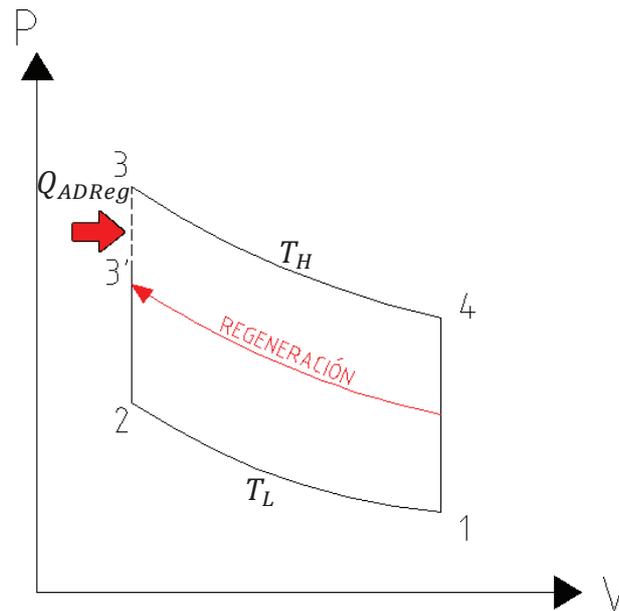


Figura 1-18 Efectividad del regenerador

De esta manera la efectividad del regenerador se la determina mediante la ecuación (1-16).

$$\varepsilon_{Reg} = \frac{T_{3'} - T_L}{T_H - T_L} \quad (1-26)$$

Además en la Figura 1-18 también se puede observar que es necesario introducir un calor adicional de una fuente externa al regenerador para garantizar que el mismo pueda cumplir la función de alcanzar la temperatura del foco caliente. Esta cantidad de calor se la puede obtener partiendo de la ecuación (1-27).

$$\delta Q = T * dS^6 \quad (1-27)$$

Si se reemplaza la ecuación (1-19) de la sección 1.5.2.1. en la ecuación (1-27) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\delta Q = T * M \left( C_V \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} \right) \quad (1-28)$$

<sup>5</sup>ENRÍQUEZ L.; GUADALUPE J. Diseño y Construcción De Un Motor Stirling Solar Para El Laboratorio De Termodinámica; EPN; 2011; pág.16.

<sup>6</sup>CENGEL, Y; Termodinámica; Ecuación (7-14); página 346.

Si la ecuación (1-28) es considerada con diferencias finitas y dividida en dos partes: la una isotérmica y la segunda isocórico; de manera similar que la entropía se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Q_{isot} = T_{(\emptyset)} * \Delta S_{isot} \quad (1-29)$$

$$\Delta Q_{isoc} = T_{(\emptyset)} * \Delta S_{isoc} \quad (1-30)$$

Para determinar el calor necesario de una fuente externa, es necesario sumar los siguientes calores según la *Figura 1-18*:

$$Q_{In} = Q_{3-4} + Q_{3'-3} = Q_e + Q_{ADReg} \quad (1-31)$$

De acuerdo a las ecuaciones(1-29), (1-30) y (1-31) se concluye que el calor necesario de una fuente externa es la suma de dos valores:

- El proceso de expansión isotérmica, el cual se lo puede obtener por la suma de variaciones de calor isotérmico positivas, como se muestra en la ecuación (1-32):

$$Q_e = \sum T_{(\emptyset)} * \Delta S_{isot}^+ \quad (1-32)$$

- El calor adicional para completar el proceso de regeneración se encuentra en base a la eficiencia que tenga el mismo. Ya que dentro del proceso de regeneración, las variaciones de calor positivo serán las correspondientes al calentamiento isocórico y las variaciones de calor negativas van a ser las correspondientes al enfriamiento isocórico, de esta manera el calor efectivo que entrega el regenerador al aire durante el calentamiento es:

$$Q_{RegC} = \sum T_{(\emptyset)} * \Delta S_{isob}^+ \quad (1-33)$$

$$Q_{RegC'} = \varepsilon * \sum T_{(\emptyset)} * \Delta S_{isob}^+ \quad (1-34)$$

$$Q_{ADReg} = Q_{RegC} - Q_{RegC'} \quad (1-35)$$

Una vez determinado el calor total necesario de una fuente externa y el trabajo neto del motor es posible encontrar la eficiencia térmica del motor de acuerdo a la ecuación (1-36).

$$\eta_T = \frac{W_{NETO}}{Q_{in}} \quad (1-36)$$

Los valores antes mencionados se refieren a valores de energía. Para determinar el flujo de calor transferido, es necesario determinar el tiempo de transferencia de calor, el mismo que se encuentra mediante la ecuación(1-37).

$$\omega = \frac{\Delta\phi}{t} \quad (1-37)$$

De esta manera, el flujo de calor necesario para el funcionamiento del motor es:

$$\dot{Q}_{in} = \frac{Q_{in}}{t} \quad (1-38)$$

El flujo de Calor necesario para la expansión se lo determina de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\dot{Q}_e = \frac{\sum T_{(\phi)} * \Delta S_{isot}^+}{t} = \frac{Q_e}{t} \quad (1-39)$$

El flujo de Calor que sale del motor se lo determina de una manera similar al calor necesario para su funcionamiento, de esta manera se muestra en la ecuación (1-40).

$$\dot{Q}_s = \frac{\sum T_{(\phi)} * \Delta S_{isot}^-}{t} = \frac{Q_s}{t} \quad (1-40)$$

### 1.5.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS MATEMÁTICO.

#### 1.5.4.1. Motor Stirling tipo Beta.

Los datos considerados en el motor Stirling tipo beta son tomados de un motor Stirling didáctico ya construido y funcionando.

*Tabla 1-1 Datos para el motor Stirling tipo beta.*

DATOS DEL MOTOR TIPO BETA			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_P$	25	mm
Carrera del pistón	$L_P$	28	mm
Largo del desplazador	$l_D$	120	mm
Ancho del desplazador	$a_D$	80	mm
Carrera del desplazador	$L_D$	32	mm
Volumen muerto caliente	$V_{mH}$	120	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mL}$	120	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	96	cm <sup>3</sup>
Temperatura caliente	$T_H$	150	°C
Temperatura frío	$T_C$	28	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
Cv del gas	$C_V$	0.72	KJ/(Kg * K)
Masa	$M$	0.000456715	Kg
Distancia entre el desplazador y el pistón.	$d_{PD}$	30	mm

Los valores van a ser calculados cada 10° de giro del cigüeñal, la tabla de resultados total se encuentra en el ANEXO1, pero en este capítulo se muestra una tabla reducida que muestra los resultados cada 20° de giro de cigüeñal.

Tabla 1-2 Resultados obtenidos para el motor Stirling tipo Beta

RESULTADOS MOTOR STIRLING TIPO BETA													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [ $cm^3$ ]	V HOT $V_H$ [ $cm^3$ ]	V COLD $V_C$ [ $cm^3$ ]	V REG $V_{Reg}$ [ $cm^3$ ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{isot}}{Kg} [K]$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{isob}}{Kg} [K]$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg} [K]$	ENTROPÍA $S$ $[\frac{KJ}{Kg} * K]$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{isot} [KJ]$	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{isoc} [KJ]$
0	643.20	273.60	273.60	96	71.98	0.00E+00	353.22	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	643.61	326.13	221.48	96	73.97	2.29E-05	363.21	6.32E-08	4.54E-06	4.60E-06	9.26E-06	2.28E-05	1.64E-03
40	644.81	372.33	176.48	96	75.69	5.20E-05	372.35	1.40E-07	3.89E-06	4.03E-06	1.77E-05	5.17E-05	1.44E-03
60	646.64	406.62	144.01	96	76.88	7.54E-05	379.27	1.99E-07	2.70E-06	2.90E-06	2.41E-05	7.52E-05	1.02E-03
80	648.88	424.87	128.01	96	77.34	8.95E-05	382.84	2.34E-07	1.13E-06	1.36E-06	2.76E-05	8.94E-05	4.31E-04
100	651.27	424.87	130.40	96	76.98	9.19E-05	382.46	2.40E-07	-5.97E-07	-3.56E-07	2.78E-05	9.20E-05	-2.28E-04
120	653.51	406.62	150.89	96	75.87	8.24E-05	378.24	2.18E-07	-2.21E-06	-2.00E-06	2.46E-05	8.27E-05	-8.41E-04
140	655.34	372.33	187.01	96	74.19	6.28E-05	370.94	1.70E-07	-3.50E-06	-3.33E-06	1.85E-05	6.32E-05	-1.30E-03
160	656.53	326.13	234.40	96	72.22	3.66E-05	361.74	1.01E-07	-4.30E-06	-4.19E-06	1.05E-05	3.68E-05	-1.56E-03
180	656.94	273.60	287.35	96	70.22	7.33E-06	351.94	2.08E-08	-4.54E-06	-4.52E-06	1.58E-06	7.38E-06	-1.61E-03
200	656.53	221.06	339.47	96	68.43	-2.12E-05	342.73	-6.19E-08	-4.26E-06	-4.32E-06	-7.22E-06	-2.13E-05	-1.47E-03
220	655.34	174.87	384.47	96	67.02	-4.60E-05	335.06	-1.37E-07	-3.51E-06	-3.65E-06	-1.49E-05	-4.63E-05	-1.18E-03
240	653.51	140.58	416.93	96	66.11	-6.49E-05	329.61	-1.97E-07	-2.40E-06	-2.60E-06	-2.07E-05	-6.51E-05	-7.94E-04
260	651.27	122.33	432.93	96	65.78	-7.61E-05	326.82	-2.33E-07	-1.05E-06	-1.28E-06	-2.39E-05	-7.62E-05	-3.42E-04
280	648.88	122.33	430.54	96	66.04	-7.88E-05	326.93	-2.41E-07	4.22E-07	1.81E-07	-2.43E-05	-7.87E-05	1.38E-04
300	646.64	140.58	410.06	96	66.88	-7.26E-05	329.94	-2.20E-07	1.86E-06	1.64E-06	-2.17E-05	-7.23E-05	6.13E-04
320	644.81	174.87	373.94	96	68.24	-5.78E-05	335.68	-1.72E-07	3.14E-06	2.96E-06	-1.64E-05	-5.75E-05	1.05E-03
340	643.61	221.07	326.55	96	69.99	-3.54E-05	343.69	-1.03E-07	4.09E-06	3.99E-06	-8.91E-06	-3.52E-05	1.40E-03
360	643.20	273.60	273.60	96	71.98	-7.51E-06	353.22	-2.13E-08	4.59E-06	4.57E-06	3.69E-10	-7.46E-06	1.61E-03

Tabla 1-3 Resultados Termodinámicos obtenidos en el motor Stirling Tipo Beta.

RESULTADOS TERMODINÁMICOS DEL MOTOR BETA			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	77.33	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	65.77	KPa
Presión Promedio	$P_{PROM}$	71.34	KPa
Relación De Presión	$r_p$	1.17	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	383.15	K
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	326.50	K
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	656.94	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	643.20	cm <sup>3</sup>
Relación De Volúmenes	$r_v$	1.02	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	1.21E-4	KJ
Calor De Entrada	$Q_{IN}$	1.78E-2	KJ
Calor Regenerado	$Q_{REG}$	1.86E-3	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	0.68	%

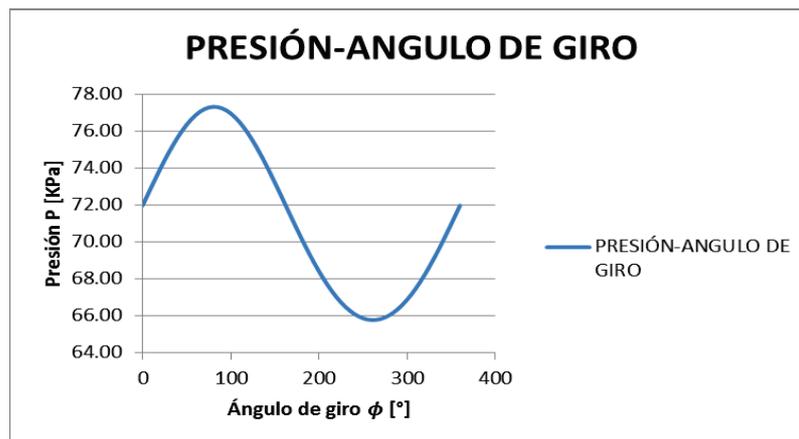


Figura 1-19 Diagrama Presión – Ángulo de giro del Cigüeñal ( $P - \phi$ ) del motor Stirling tipo Beta.

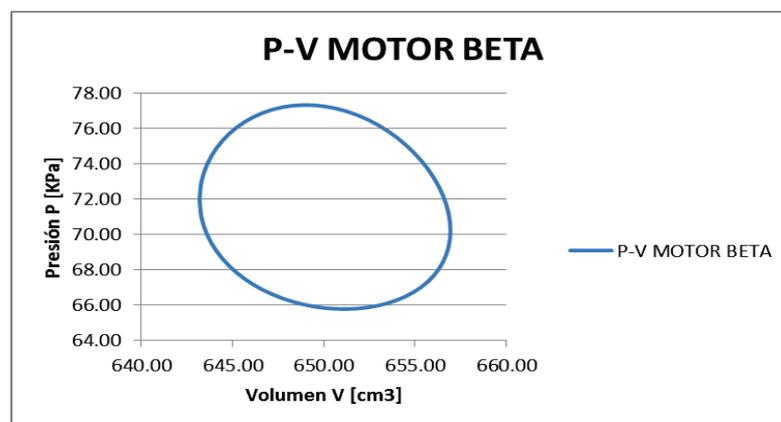


Figura 1-20 Diagrama Presión vs Volumen ( $P-V$ ) del Motor Stirling tipo Beta.

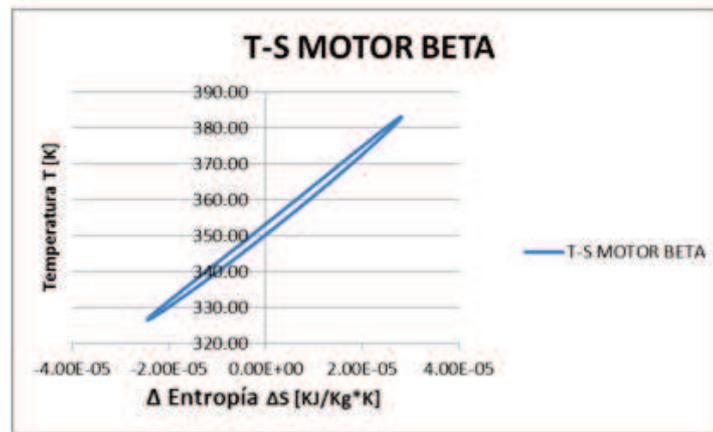


Figura 1-21 Diagrama Temperatura vs Entropía(T – S) del Motor Stirling tipo Beta.

#### 1.5.4.2. Motor Stirling de Desplazador Rotativo.

Los datos tomados en cuenta para realizar el análisis matemático del motor Stirling de desplazador rotativo, son análogos a las dimensiones del motor Stirling tipo Beta del análisis anterior.

Tabla 1-4 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [90°].

DATOS DEL MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_{PR}$	25	mm
Carrera del pistón	$L_{PR}$	25	mm
Diámetro del Desplazador	$D_{DR}$	154	mm
Alto del desplazador	$h_{DR}$	38	mm
Ángulo del Volumen Desplazado	$\alpha_{VD}$	90	°
Volumen muerto caliente	$V_{mHR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mLR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	39	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto pistón	$V_{mR}$	15	cm <sup>3</sup>
Temperatura caliente	$T_{HR}$	150	°C
Temperatura frío	$T_{CR}$	35	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
Cv del gas	$C_V$	0.72	KJ/(Kg * K)
Eficiencia del regenerador	$\varepsilon$	30	
Masa	$M_R$	0.0002232	Kg

Los valores van a ser calculados cada 10° de giro del cigüeñal, la tabla de resultados total se encuentra en el ANEXO1, pero en este capítulo se muestra una tabla reducida que muestra los resultados cada 20° de giro de cigüeñal.

Tabla 1-5 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [90°].

RESULTADOS MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	V HOT $V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	V COLD $V_C$ [cm <sup>3</sup> ]	V REG $V_{Reg}$ [cm <sup>3</sup> ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{isot}}{Kg}$ [ $\frac{KJ}{Kg} * K$ ]	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{isob}}{Kg}$ [ $\frac{KJ}{Kg} * K$ ]	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg}$ [ $\frac{KJ}{Kg} * K$ ]	ENTROPÍA $S$ [ $\frac{KJ}{Kg} * K$ ]	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{isot}$ [KJ]	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{isoc}$ [KJ]
0	324.95	62.00	47.00	215.95	71.98	0.00E+00	365.11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	325.32	101.69	47.00	176.63	73.11	2.02E-05	371.26	5.45E-08	1.35E-06	1.41E-06	2.76E-06	2.02E-05	5.00E-04
40	326.39	142.08	47.00	137.31	74.14	4.55E-05	377.70	1.21E-07	1.39E-06	1.51E-06	5.73E-06	4.53E-05	5.22E-04
60	328.02	183.04	47.00	97.98	75.07	6.58E-05	384.37	1.71E-07	1.41E-06	1.59E-06	8.87E-06	6.56E-05	5.41E-04
80	330.02	224.36	47.00	58.66	75.95	7.85E-05	391.25	2.01E-07	1.43E-06	1.63E-06	1.21E-05	7.82E-05	5.57E-04
100	332.15	226.49	47.00	58.66	75.50	8.04E-05	391.44	2.06E-07	-1.36E-06	-1.15E-06	1.26E-05	8.09E-05	-5.33E-04
120	334.16	189.17	47.00	97.98	73.82	7.16E-05	385.02	1.86E-07	-1.32E-06	-1.14E-06	1.03E-05	7.20E-05	-5.11E-04
140	335.79	151.48	47.00	137.31	72.28	5.47E-05	378.83	1.44E-07	-1.30E-06	-1.15E-06	8.03E-06	5.49E-05	-4.93E-04
160	336.85	113.22	47.00	176.63	70.91	3.21E-05	372.82	8.60E-08	-1.28E-06	-1.20E-06	5.66E-06	3.22E-05	-4.80E-04
180	337.22	74.27	47.00	215.95	69.71	6.50E-06	366.94	1.77E-08	-1.28E-06	-1.26E-06	3.18E-06	6.52E-06	-4.71E-04
200	336.85	73.90	86.32	176.63	68.28	-1.89E-05	359.03	-5.26E-08	-1.75E-06	-1.80E-06	-3.94E-07	-1.90E-05	-6.31E-04
220	335.79	72.84	125.65	137.31	67.03	-4.11E-05	351.32	-1.17E-07	-1.74E-06	-1.86E-06	-4.09E-06	-4.13E-05	-6.16E-04
240	334.16	71.20	164.97	97.98	65.91	-5.77E-05	343.77	-1.68E-07	-1.74E-06	-1.91E-06	-7.89E-06	-5.80E-05	-6.03E-04
260	332.15	69.20	204.29	58.66	64.88	-6.70E-05	336.40	-1.99E-07	-1.74E-06	-1.94E-06	-1.18E-05	-6.73E-05	-5.89E-04
280	330.02	67.07	204.29	58.66	65.22	-6.95E-05	335.96	-2.07E-07	1.52E-06	1.32E-06	-1.24E-05	-6.90E-05	5.10E-04
300	328.02	65.07	164.97	97.98	66.91	-6.49E-05	342.57	-1.89E-07	1.58E-06	1.39E-06	-9.64E-06	-6.44E-05	5.40E-04
320	326.39	63.44	125.65	137.31	68.62	-5.19E-05	349.61	-1.48E-07	1.65E-06	1.50E-06	-6.69E-06	-5.16E-05	5.75E-04
340	325.32	62.37	86.32	176.63	70.33	-3.18E-05	357.12	-8.90E-08	1.73E-06	1.64E-06	-3.48E-06	-3.16E-05	6.13E-04
360	324.95	62.00	47.00	215.95	71.98	-6.71E-06	365.11	-1.84E-08	1.80E-06	1.78E-06	3.76E-10	-6.67E-06	6.52E-04

Tabla 1-6 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo

RESULTADOS TERMODINÁMICO MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	76.39	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	64.39	KPa
Presión Media	$P_{PROM}$	70.57	KPa
Relación de Presión	$r_P$	1.19	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	394.76	K
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	332.79	K
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	337.22	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	324.95	cm <sup>3</sup>
Relación de Volumen	$r_V$	1.04	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	9.1961E-05	KJ
Calor de entrada	$Q_{IN}$	0.00788415	KJ
Calor de regeneración	$Q_{REG}$	0.0029882	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	1.17	%

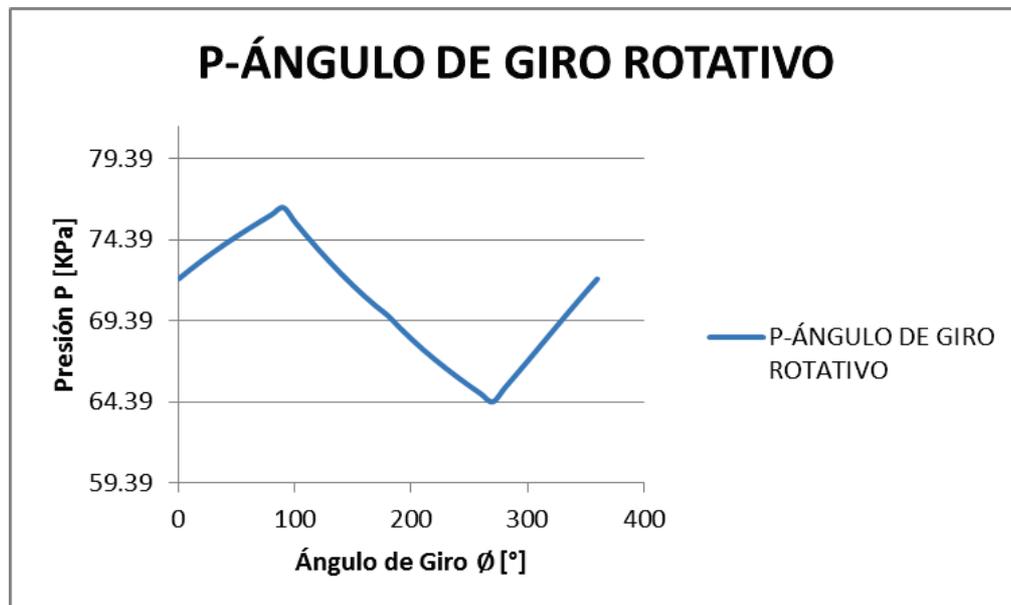


Figura 1-22 Diagrama Presión – Ángulo ( $P - \phi$ ) de giro del Cigüeñal del motor Stirling de Desplazador Rotativo

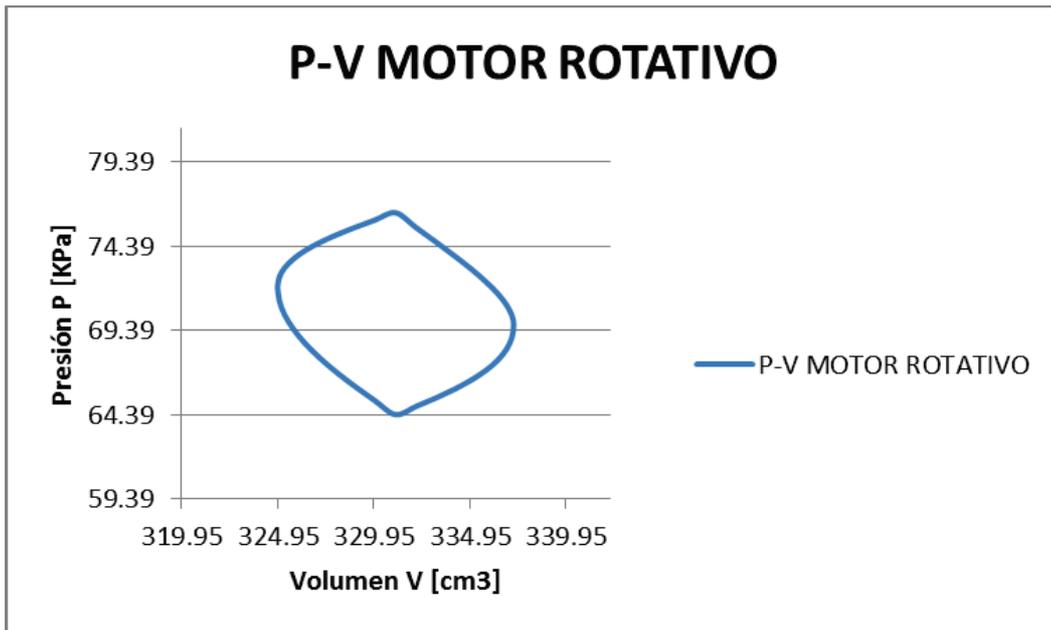


Figura 1-23 Diagrama Presión vs Volumen (P-V) del Motor Desplazador Rotativo

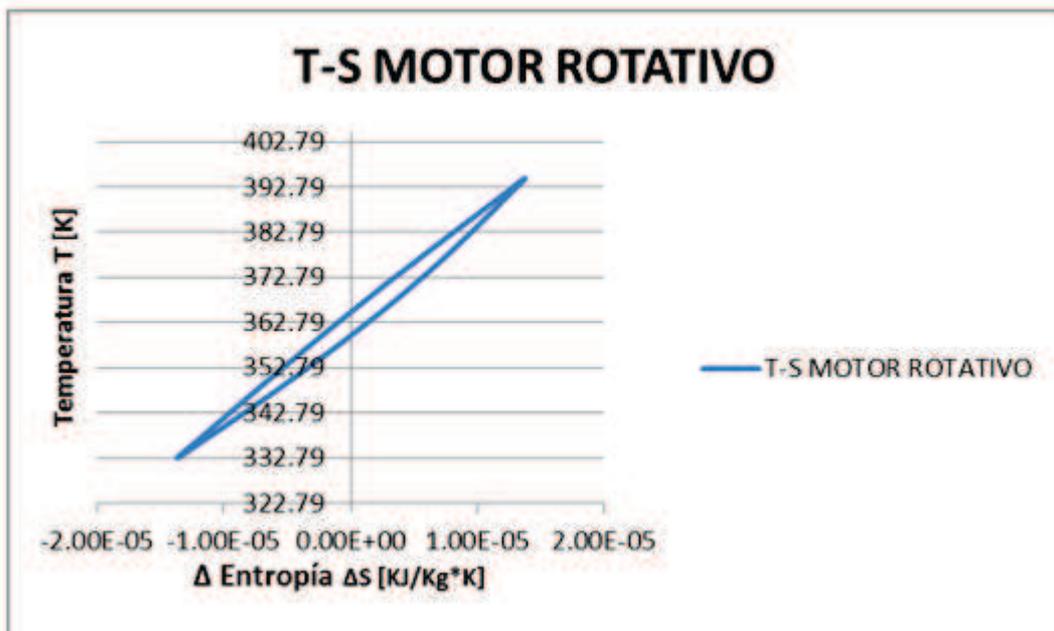


Figura 1-24 Diagrama Temperatura-Entropía (T – S) del Motor Stirling de Desplazador Rotativo.

Como se puede observar en la Figura 1-23 el diagrama P-V es diferente a lo que podría ser un ciclo Stirling ideal, sin embargo, puede ser debido a que la regeneración ocupa mucho espacio dentro del motor. La mitad del tiempo, el volumen del ciclo se encuentra en la regeneración, y esto ocasiona una

disminución del área de los focos caliente y frío, limitando el calor que ingresa al ciclo por la fuente y el calor que se rechaza al sumidero. Por esta razón se varía los parámetros a una distribución de: 120° para el foco caliente, 60° para el enfriamiento de regeneración, 120° par el foco frío y 60° para calentamiento por regeneración. Obteniendo los siguientes datos y resultados.

Tabla 1-7 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [90°].

DATOS DEL MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [120°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_{PR}$	25	mm
Carrera del pistón	$L_{PR}$	25	mm
Diámetro del Desplazador	$D_{DR}$	154	mm
Alto del desplazador	$h_{DR}$	38	mm
Ángulo del Volumen Desplazado	$\alpha_{VD}$	90	°
Volumen muerto caliente	$V_{mHR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mLR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	39	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto Pistón	$V_{mP}$	15	
Temperatura caliente	$T_{HR}$	150	°C
Temperatura frío	$T_{CR}$	35	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
Cv del gas	$C_V$	0.72	KJ/(Kg * K)
Eficiencia del regenerador	$\varepsilon$	20	%
Masa	$M_R$	0.0002242	Kg

Los valores van a ser calculados cada 10° de giro del cigüeñal, la tabla de resultados total se encuentra en el ANEXO1, pero en este capítulo se muestra una tabla reducida que muestra los resultados cada 20° de giro de cigüeñal.

Tabla 1-8 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [120°].

RESULTADOS MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO [120°]													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	V HOT $V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	V COLD $V_C$ [cm <sup>3</sup> ]	V REG $V_{Reg}$ [cm <sup>3</sup> ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{isot}}{Kg} [K]$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{isob}}{Kg} [K]$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg} [K]$	ENTROPÍA $S$ $[\frac{KJ}{Kg} * K]$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{isot} [KJ]$	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{isoc} [KJ]$
0	324.95	91.49	76.49	156.97	71.98	0.00E+00	363.44	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	325.32	131.18	47.00	147.14	74.38	2.06E-05	375.97	5.48E-08	2.30E-06	2.36E-06	5.55E-06	2.05E-05	8.59E-04
40	326.39	171.57	47.00	107.81	75.43	4.63E-05	382.55	1.21E-07	1.41E-06	1.53E-06	8.56E-06	4.61E-05	5.37E-04
60	328.02	212.53	47.00	68.49	76.40	6.69E-05	389.38	1.72E-07	1.43E-06	1.61E-06	1.17E-05	6.67E-05	5.56E-04
80	330.02	244.02	47.00	39.00	76.97	7.95E-05	394.68	2.02E-07	7.40E-07	9.42E-07	1.43E-05	7.95E-05	2.92E-04
100	332.15	246.15	47.00	39.00	76.51	8.15E-05	394.85	2.07E-07	3.46E-08	2.41E-07	1.48E-05	8.16E-05	1.37E-05
120	334.16	218.66	47.00	68.49	75.11	7.28E-05	389.95	1.87E-07	-1.35E-06	-1.16E-06	1.32E-05	7.32E-05	-5.29E-04
140	335.79	180.97	47.00	107.81	73.52	5.56E-05	383.58	1.45E-07	-1.32E-06	-1.18E-06	1.08E-05	5.59E-05	-5.10E-04
160	336.85	142.72	47.00	147.14	72.31	3.27E-05	374.28	8.74E-08	-1.40E-06	-1.32E-06	8.94E-06	3.28E-05	-5.28E-04
180	337.22	103.76	76.49	156.97	69.72	6.50E-06	365.31	1.78E-08	-3.06E-06	-3.04E-06	3.22E-06	6.56E-06	-1.13E-03
200	336.85	73.90	115.81	147.14	67.51	-1.87E-05	353.36	-5.29E-08	-2.36E-06	-2.41E-06	-2.23E-06	-1.88E-05	-8.39E-04
220	335.79	72.84	155.14	107.81	66.29	-4.07E-05	345.87	-1.17E-07	-1.73E-06	-1.85E-06	-5.89E-06	-4.09E-05	-6.02E-04
240	334.16	71.20	194.46	68.49	65.20	-5.71E-05	338.53	-1.69E-07	-1.73E-06	-1.90E-06	-9.67E-06	-5.74E-05	-5.89E-04
260	332.15	69.20	223.95	39.00	64.53	-6.67E-05	333.01	-2.00E-07	-9.19E-07	-1.12E-06	-1.27E-05	-6.68E-05	-3.07E-04
280	330.02	67.07	223.95	39.00	64.85	-6.91E-05	332.56	-2.07E-07	-1.11E-07	-3.19E-07	-1.33E-05	-6.90E-05	-3.70E-05
300	328.02	65.07	194.46	68.49	66.17	-6.41E-05	337.27	-1.90E-07	1.56E-06	1.37E-06	-1.15E-05	-6.37E-05	5.23E-04
320	326.39	63.44	155.14	107.81	67.84	-5.13E-05	344.06	-1.49E-07	1.63E-06	1.48E-06	-8.56E-06	-5.10E-05	5.57E-04
340	325.32	62.37	115.81	147.14	69.50	-3.14E-05	351.31	-8.94E-08	1.70E-06	1.61E-06	-5.41E-06	-3.12E-05	5.95E-04
360	324.95	91.49	76.49	156.97	71.98	-6.71E-06	363.44	-1.85E-08	3.10E-06	3.08E-06	3.51E-10	-6.64E-06	1.11E-03

Tabla 1-9 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo

RESULTADOS TERMODINÁMICO MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [120°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	76.97	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	64.53	KPa
Presión Media	$P_{PROM}$	70.81	KPa
Relación de Presión	$r_p$	1.19	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	394.85	K
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	332.56	K
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	337.22	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	324.95	cm <sup>3</sup>
Relación de Volumen	$r_v$	1.04	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	0.00011294	KJ
Calor de entrada	$Q_{IN}$	0.00897133	KJ
Calor de regeneración	$Q_{REG}$	0.00201142	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	1.26	%

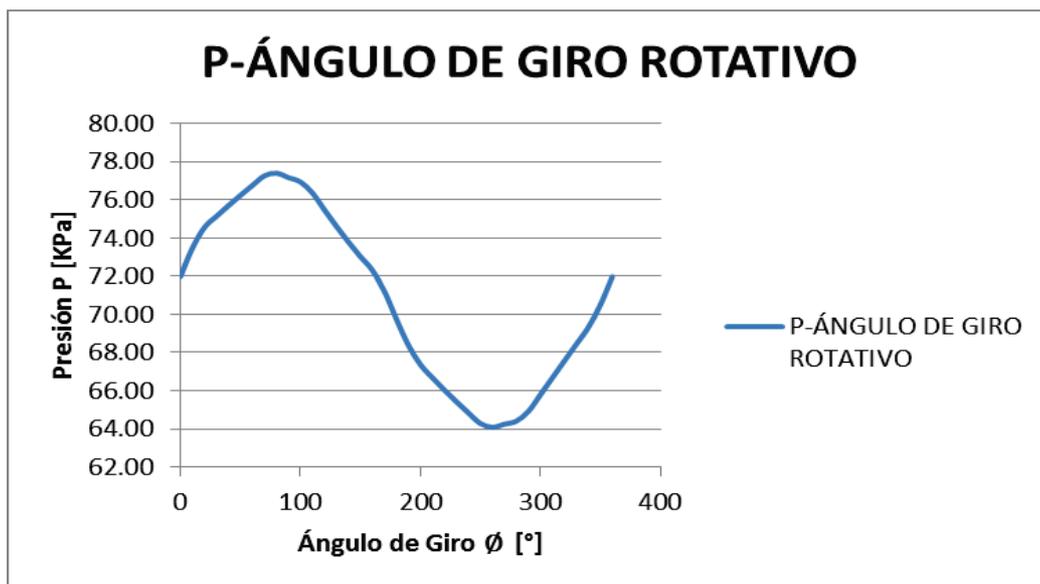


Figura 1-25 Presión vs Ángulo de giro ( $P - \phi$ ) del motor Stirling de desplazador rotativo con 120°

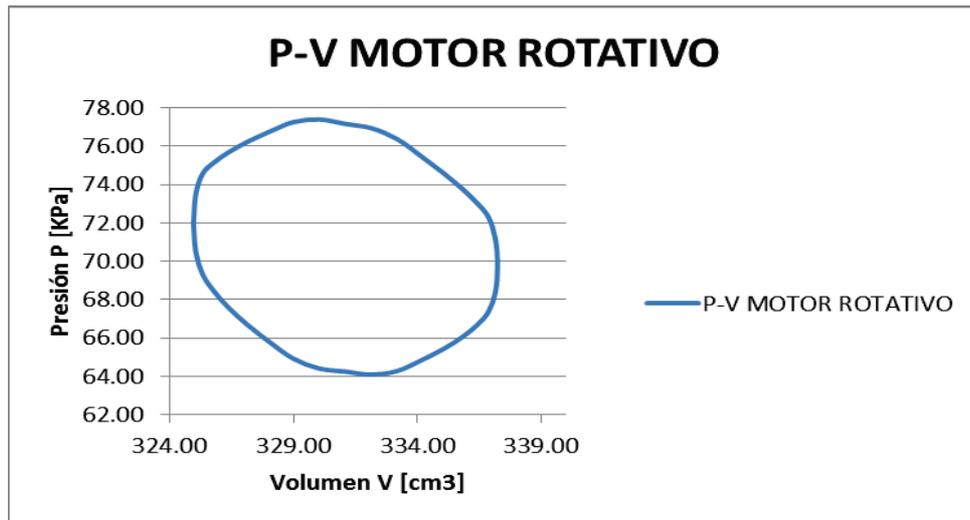


Figura 1-26 Presión vs Volumen ( $P - \phi$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ )

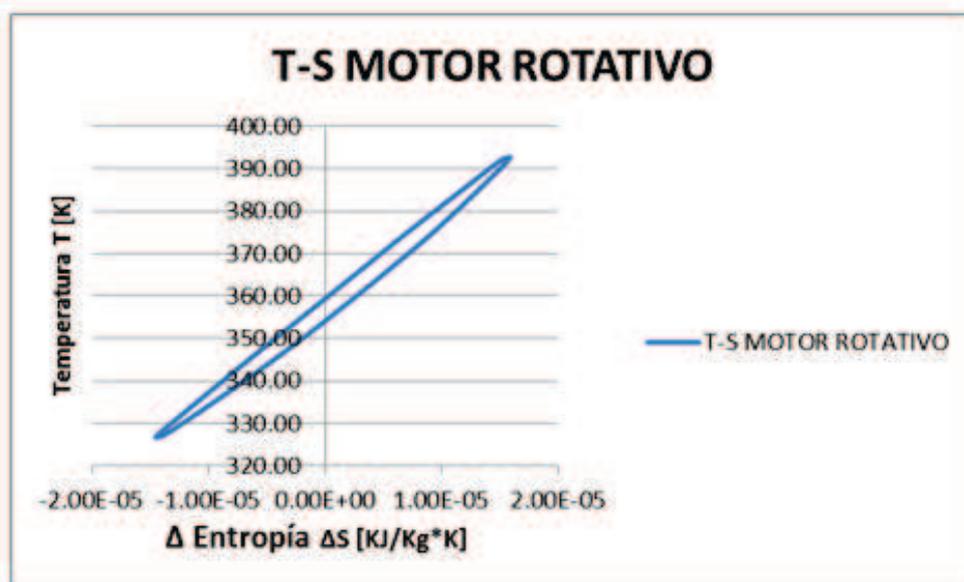


Figura 1-27 Temperatura vs Entropía ( $T-S$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ )

Al comparar los resultados obtenidos entre el motor tipo Beta y el motor Stirling de Desplazador Rotativo, se observa que al disminuir notablemente los volúmenes muertos del motor por el gran espacio que ocupa el desplazador y manteniéndose la misma temperatura de funcionamiento, la eficiencia del Motor Stirling de Desplazador Rotativo aumenta considerablemente en relación al Motor Stirling Tipo Beta. Pero el motor Stirling de Desplazador Rotativo genera un menor Trabajo Neto y es por la razón que al ser el volumen del desplazador muy grande reduce considerablemente también el volumen de aire desplazado por el motor.

Según los resultados obtenidos en la Tabla 1-9 con  $120^\circ$  en el foco caliente y frío y la Tabla 1-6 con  $90^\circ$  en el foco caliente y frío se puede observar una mejora en el trabajo neto, y aumento de su eficiencia. Pero por otra parte se observa una disminución de la eficiencia del regenerador, lo cual puede ser perjudicial. De esta manera se realiza un análisis un poco más profundo en la sección 1.5.4.3.

Al aumentar el área de transferencia de calor en el foco frío y foco caliente, ayuda a que los diagramas  $P - V$  y  $T - S$  formados se asemejen más a un ciclo Termodinámico, redondeado y con picos no muy pronunciados como los que se observan en los diagramas  $P - V$  y  $T - S$  del motor de  $90^\circ$ . Esta es una razón fuerte por la cual se debe disponer un ángulo de  $120^\circ$  para la zona de calentamiento y enfriamiento.

#### 1.5.4.3 Variación Del Ángulo De Apertura

En la base del motor Stirling de desplazador rotativo se tiene  $360^\circ$  los cuales van a estar repartidos para el foco caliente, el regenerador y el foco frío; dichas secciones son las que se hace variar, teniendo así cinco casos distintos.

*Tabla 1-10 Casos de variación de ángulo de las secciones del foco caliente, foco frío y regenerador*

CASO	FOCO CALIENTE	REGENERADOR	FOCO FRÍO
	°	°	°
1	90	90-90	90
2	100	80-80	100
3	120	60-60	120
4	140	40-40	140
5	160	20-20	160

En la Tabla 1-10 se observa que el ángulo de la sección del foco caliente es el mismo que el ángulo de la sección de foco frío, sin embargo el ángulo de la sección del regenerador es distinto, y este a la vez está dividido en dos partes siguiendo la configuración de la geometría que se explica en el Capítulo 4.

Para el análisis de cada caso se mantienen constantes ciertas propiedades y parámetros, que corresponden a los utilizados en la construcción del modelo, los valores se indican Tabla 1-11.

*Tabla 1-11 Parámetros utilizados para el análisis*

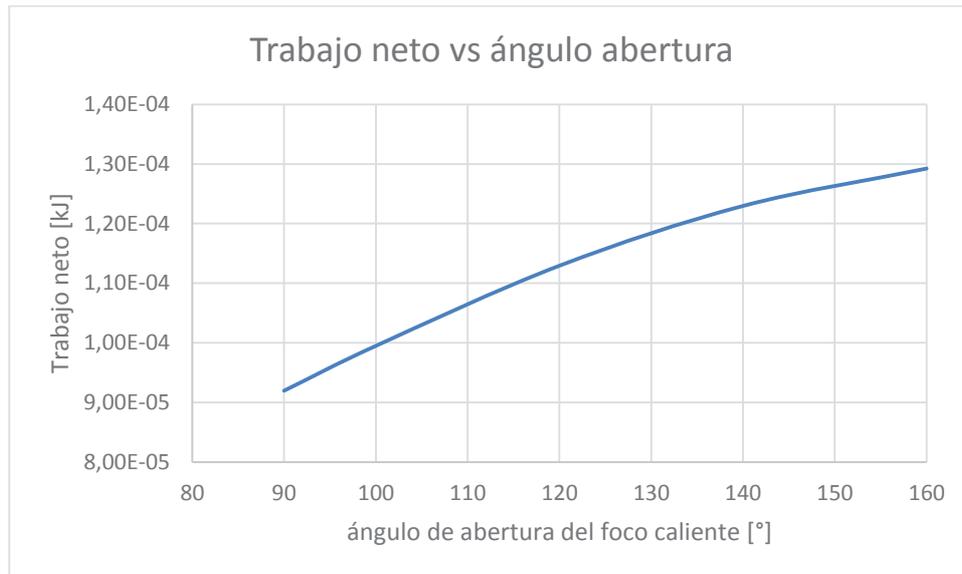
PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Diámetro del pistón	mm	25
Carrera del pistón	mm	25
Diámetro del desplazador	mm	154
Altura del desplazador	mm	38
Ángulo del volumen desplazado	°	90
Volumen muerto foco caliente	cm <sup>3</sup>	47
Volumen muerto foco frío	cm <sup>3</sup>	47
Volumen muerto regenerador	cm <sup>3</sup>	39
Volumen muerto pistón	cm <sup>3</sup>	15
Temperatura foco caliente	°C	150
Temperatura foco frío	°C	35
Constante del gas (aire)	$\frac{kJ}{kg K}$	0.287
Cv del aire	$\frac{kJ}{kg K}$	0.72

Con los datos que se indican en la Tabla 1-11 y con la utilización de todos los criterios y ecuaciones que se mencionan en la Sección 1.5 correspondiente al análisis matemático, se realiza el análisis para cada caso de variación de los grados de apertura propuestos en la Tabla 1-12, obteniendo así los siguientes resultados.

*Tabla 1-12 Resultados del análisis de la variación de ángulo de apertura*

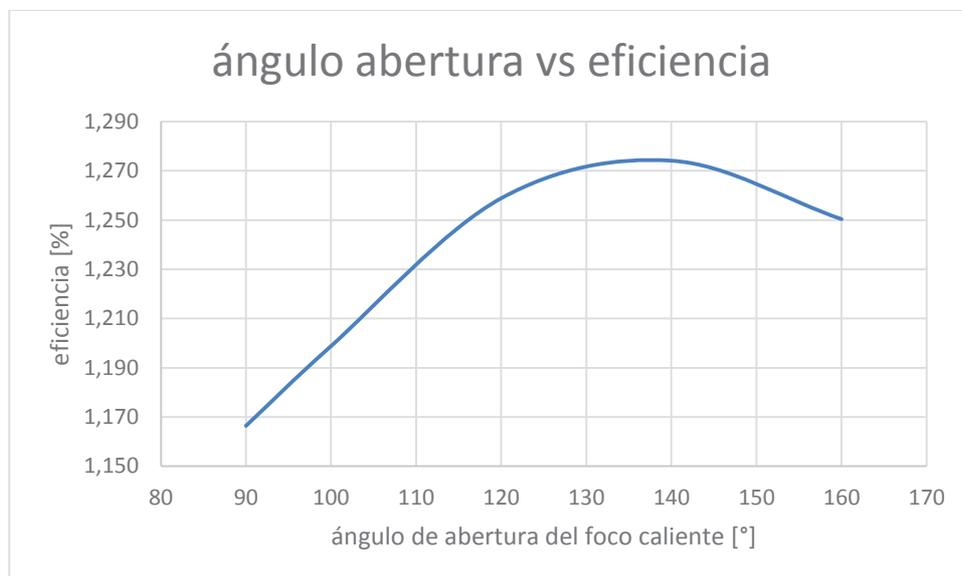
CASO	Trabajo neto	Eficiencia
	kJ	%
<b>1</b>	9,20E-05	1,166
<b>2</b>	9,95E-05	1,199
<b>3</b>	1,13E-04	1,259
<b>4</b>	1,23E-04	1,274
<b>5</b>	1,29E-04	1,250

Para facilitar el análisis, a partir de los valores de la Tabla 1-12 se construye gráficas en función del ángulo de apertura del foco caliente.



*Figura 1-28 Variación del Trabajo neto en función del ángulo de abertura*

La Figura 1-28 muestra que el trabajo neto realizado por el motor aumenta a medida que aumenta el ángulo de apertura de la sección del foco caliente, dicho aumento del trabajo se logra debido al aumento del área de transferencia de calor que ocasiona un incremento en el calor de entrada a dicho motor.



*Figura 1-29 Variación de la eficiencia del motor en función del ángulo de abertura*

En la Figura 1-29, se observa que la eficiencia del motor Stirling aumenta hasta cierto ángulo de apertura del foco caliente (aproximadamente 140°), luego de éste, se nota una disminución de dicha eficiencia.

### 1.5.5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN EN EL INTERIOR DEL MOTOR.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor y la dinámica de fluidos, es necesario establecer algunas suposiciones geométricas, con el fin de simplificar el problema a analizar. El movimiento del fluido y la forma en que varía el perfil de velocidades, de acuerdo a la forma del desplazador es como se muestra en la Figura 1-30.

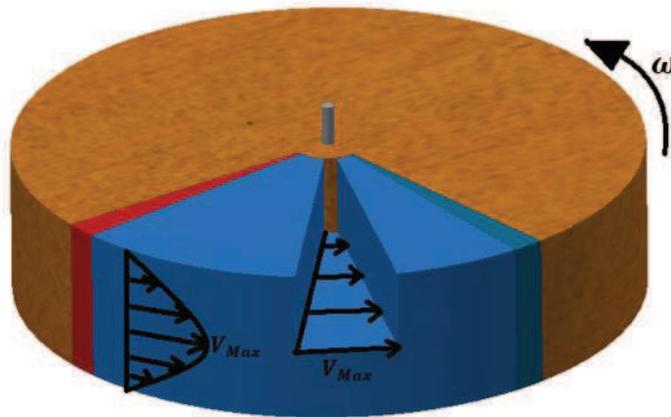


Figura 1-30 Perfiles de velocidades del aire cuando es desplazado, considerando que el flujo sea laminar

En la Figura 1-30 se puede observar que la velocidad del fluido depende de dos parámetros:

- Distancia a la que se encuentra el fluido del eje de rotación del desplazador. Este valor afecta en la velocidad del fluido de acuerdo a la relación (1-41).

$$v_{(\omega,r,y)} = \omega * r_f \quad (1-41)$$

Distancia a la que se encuentra el fluido de las paredes de la cámara, si se considera el perfil de velocidades para flujo interno, se tiene.

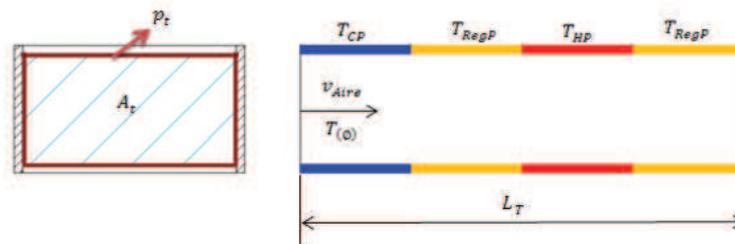
$$v_{(\omega,r,y)} = v_{\max(r)} * \left( 1 - \frac{y^2}{(ha/2)^2} \right)^7 \quad (1-42)$$

<sup>7</sup>CENGEL Y, CIMBALA J; Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones; Ecuación (8-17); página 328.

Sin embargo, para fines de estudio y en vista de que el fluido también va a tener restricción al movimiento en las paredes de la cámara, se toma la velocidad máxima del fluido a dos tercios del radio del desplazador, obteniendo de esta manera la ecuación(1-43) para calcular la velocidad lineal del fluido.

$$v_{Aire} = \omega * \frac{D_D}{3} \quad (1-43)$$

Por otra parte para simplificar el análisis, se va a considerar que el aire no se mueve de forma rotacional, si no que se mueve por una tubería lineal de sección transversal igual a la sección del desplazador que empuja al aire, a la velocidad calculada en la ecuación (1-43). Esta tubería se encuentra a la temperatura del foco caliente, foco frío o regenerador dependiendo del posicionamiento del desplazador en la cámara. Este problema se lo puede entender de una manera más sencilla en la *Figura 1-31*.



*Figura 1-31 Simplificación del problema de transferencia de calor*

Una vez determinada la velocidad, hay que considerar el comportamiento de las propiedades del fluido de trabajo (aire), según la temperatura a la cual se encuentre dentro del motor.

Las propiedades del aire que se encuentran tabuladas en libros de Transferencia de Calor, corresponden a una atmósfera de presión, por lo que los datos de densidad y viscosidad cinemática, van a ser calculados para la presión atmosférica utilizando la ecuación (1-8)

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{P_{atm}}{R * T_{(\phi)}} \quad (1-44)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-45)$$

<sup>8</sup> STREETER V; Mecánica de los Fluidos; Cuarta Edición; Ecuación (1.3.1); página 21

Determinada la velocidad del movimiento del fluido y las propiedades a la temperatura global, se determina el régimen de movimiento del mismo en base al número de Reynolds, el cual se lo calcula mediante la ecuación (1-46).

$$R_e = \frac{v_{aire} * D_H}{\nu} \quad (1-46)$$

El diámetro hidráulico expresado en la ecuación (1-46) se usa cuando el fluido se mueve en tuberías no circulares, como en este caso. Para determinar el diámetro hidráulico se hace referencia a la ecuación (1-47).

$$D_H = \frac{4 * A_t}{p_t} \quad (1-47)$$

Una vez determinado el número de Reynolds se tiene que determinar el régimen de movimiento del fluido en base a las siguientes desigualdades<sup>11</sup>.

$R_e \leq 2300$	Flujo Laminar
$2300 \leq R_e \leq 4000$	Flujo de Transición
$R_e \geq 4000$	Flujo Turbulento

Dependiendo del régimen de movimiento se puede obtener una relación para determinar el número de Nusselt para un flujo térmico no desarrollado, ya que la longitud recorrida es muy pequeña. (1-48), (1-49) y (1-50).

$$N_{uD} = 1.86 * \left( \frac{R_e * Pr}{L_t / D_H} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad (1-48)$$

Flujo Laminar  
 $T_s = cte$   
 $0.48 < Pr < 16700$   
 $0.0044 < \frac{\mu}{\mu_s} < 9.75$

$$N_{uD} = \frac{1}{300} * R_e * Pr^{0.39} \quad (1-49)$$

Flujo de Transición

<sup>9</sup>CENGEL Y, CIMBALA J; Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones; Ecuación (8-3); página 324.

<sup>10</sup> CENGEL Y, CIMBALA J; Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones; Ecuación (8-4); pág. 324.

<sup>11</sup> CENGEL Y, CIMBALA J; Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones; pág. 324.

<sup>12</sup>INCROPERA F, DeWITT D; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Ecuación (8.57); página 444.

<sup>13</sup>BAHAMONDE R.; Apuntes de Transferencia de Calor II; EPN 2012-A.

$$N_{uD} = 0.023 * Re^{\frac{4}{5}} * Pr^{1/3} \quad \text{Flujo Turbulento} \quad (1-50)$$

De esta manera mediante la ecuación(1-51) se puede determinar el coeficiente de convección en cada una de las regiones dentro del motor Stirling de Desplazador Rotativo.

$$h_c = \frac{N_{uD} * k}{D_H} \quad (1-51)$$

---

<sup>14</sup>INCROPERA F, DeWITT D; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Ecuación (8.59); página 445.

## CAPÍTULO 2

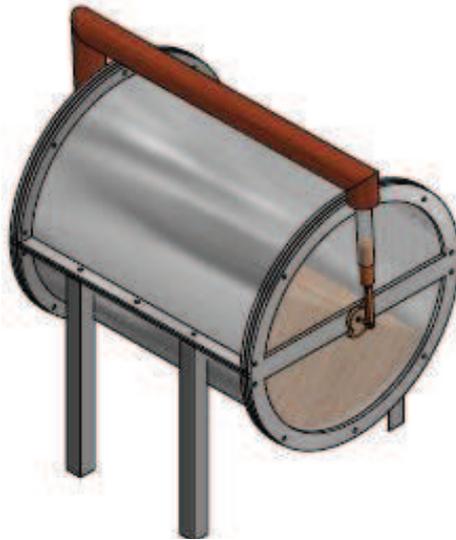
### ALTERNATIVAS Y MODELO SELECCIONADO

En este capítulo se analiza tres alternativas, dos de las cuales son modelos de motores de desplazador rotativo ya funcionando y la tercera es un modelo diferente con resultado desconocido.

#### 2.1 ALTERNATIVAS.

##### 2.1.1 MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO CON LOS FOCOS CALIENTE Y FRÍO EN EL CILINDRO Y DISPOSICIÓN HORIZONTAL.<sup>15</sup>

El motor de desplazador rotativo mostrado en la *Figura 2-1* se basa en un modelo ya construido y funcionando, cuyas características se muestran a continuación:



*Figura 2-1* Motor Stirling DR con disposición horizontal y los focos en el cilindro.

- Es un motor Stirling de desplazador rotativo, cuyo cilindro o cámara debe estar conformado por dos semicilindros de un material conductor, separados por un material aislante. Esto con el fin de que el calor añadido al foco caliente no sea transferido al foco frío.
- La disposición del cilindro es horizontal, por lo tanto necesita de un soporte para el cilindro y generar la combustión externa en el foco inferior (foco

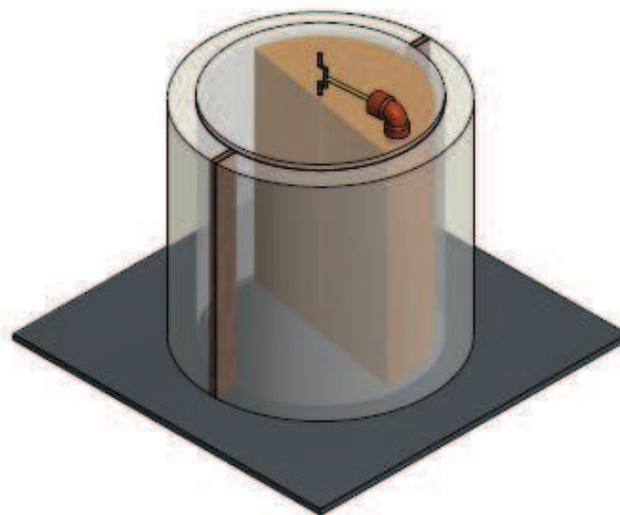
<sup>15</sup>[https://www.youtube.com/watch?v=ZjS4-YYL6lo&index=1&list=PL5GnlzXbSNxPdcdZotRTYgw6x\\_zZ0UuX7](https://www.youtube.com/watch?v=ZjS4-YYL6lo&index=1&list=PL5GnlzXbSNxPdcdZotRTYgw6x_zZ0UuX7)

caliente), mientras que el foco superior se encuentra a la temperatura ambiente (foco frío).

- El desplazador tiene una geometría cilíndrica con una cavidad de 180° en donde se va a alojar el fluido de trabajo.
- La toma de aire que va a desplazar el pistón puede ser de cualquier parte de la cámara, sin embargo hay que considerar que el pistón debe empujar al cigüeñal cuando la cavidad del desplazador se encuentre en el foco caliente, además la distancia de la toma del aire al pistón debe ser la mínima para no incrementar demasiado los volúmenes muertos.
- El regenerador no se considera en este diseño.
- El cigüeñal presenta una posición horizontal, siendo éste solidario al desplazador.
- El dispositivo de trabajo es un pistón el mismo que puede presentar fugas en bajas casi nulas con fricciones considerables, o viceversa.

### 2.1.2. MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO CON LOS FOCOS CALIENTE Y FRÍO EN EL CILINDRO Y DISPOSICIÓN VERTICAL.<sup>16</sup>

Al igual que el motor de la sección anterior, que se muestra en la *Figura 2-2* se basa en un modelo ya construido y funcionando, cuyas características se muestran a continuación:



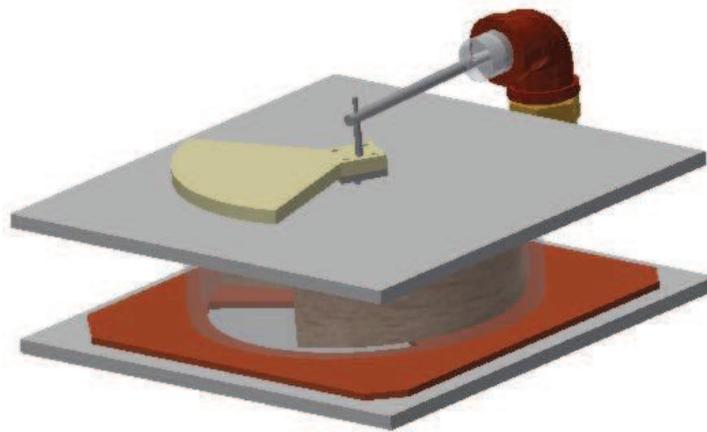
*Figura 2-2 Motor Stirling DR con disposición vertical y los focos en el cilindro.*

<sup>16</sup>[https://www.youtube.com/watch?v=V\\_K8mpe9tjY](https://www.youtube.com/watch?v=V_K8mpe9tjY)

- Es un motor Stirling de desplazador rotativo que consta de una carcasa de dos cilindros concéntricos, que dejan una cavidad entre los mismos, esta cavidad se encuentra dividida en dos partes por un material aislante. En una de las cavidades se le pone un líquido a elevada temperatura (foco caliente) y en la otra cavidad un fluido a baja temperatura (foco frío). Dentro del cilindro interior se aloja el desplazador y el fluido de trabajo que es aire.
- El cilindro de la carcasa es de un material no conductor térmico de bajo espesor (acrílico 2 mm), lo cual permite que el calor disipado por la fuente, que en este caso es el líquido a baja temperatura, llegue en una tasa baja al fluido de trabajo (aire).
- El cilindro externo de la carcasa es de un material no conductor térmico de alto espesor (acrílico 6 mm), lo cual evita la disipación de calor al medio ambiente y garantiza que la mayor tasa de calor se transfiera hacia el cilindro interior.
- Las paredes superior e inferior del cilindro y la carcasa pueden ser de igual manera de acrílico.
- Los cilindros interior y exterior, deben tener una mayor altura y un menor diámetro, ya que al darse la transferencia de calor por las caras laterales, se aumenta el área de transferencia, pero garantizando la cantidad de aire necesaria.
- El desplazador es de un material de baja densidad y tiene una geometría cilíndrica con una cavidad de 180° en donde se va a alojar el fluido de trabajo.
- La toma de aire que va a desplazar el pistón debe ser en la cara superior o inferior del cilindro, lo que deja poco espacio para el mecanismo biela manivela que mueve el cigüeñal.
- El regenerador no se considera en este diseño.
- El cigüeñal se encuentra en posición vertical.
- El dispositivo de trabajo puede ser pistón o diafragma.

### 2.1.3. MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO HORIZONTAL CON LOS FOCOS CALIENTE Y FRÍO EN PLACAS CONDUCTORAS EN LAS BASES DEL CILINDRO.

El motor mostrado en la *Figura 2-3*, no tiene un precedente de construcción, en vista de que el modelo propuesto para desarrollar el diseño en el presente Proyecto de Titulación.



*Figura 2-3 Motor Stirling DR horizontal y placas conductoras en las bases como focos.*

- Es un motor Stirling de desplazador rotativo, cuyo cilindro o cámara es un cilindro de un material aislante rígido. Esto con el fin de que el calor añadido al foco caliente no sea transferido al foco frío. Además el cilindro debe tener un mayor diámetro y una menor altura, para de esta manera aumentar el área de transferencia de calor y no aumentar demasiado el volumen de aire.
- La disposición del cilindro es vertical, por lo tanto los focos caliente y frío deben ser focalizados en una placa conductora inferior y superior respectivamente. Esto se logra poniendo materiales aislantes como el asbesto o madera dejando libre solamente la parte en donde se quiere focalizar la transferencia de calor.
- El desplazador es de un material de baja densidad y tiene una geometría cilíndrica con una cavidad de 90° en donde se va a alojar el fluido de trabajo.

- La toma de aire que va a desplazar el pistón puede ser de cualquier parte de la cámara, sin embargo hay que considerar que el pistón debe empujar al cigüeñal cuando la cavidad del desplazador se encuentre en el foco caliente, además la distancia de la toma del aire al pistón debe ser la mínima para no incrementar demasiado los volúmenes muertos.
- El regenerador se ubica en la placa inferior, es una delgada placa de tol en forma de dos secciones circulares de noventa grados contrapuestos.
- El dispositivo de trabajo puede ser pistón o diafragma.

## **2.2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.**

A pesar de tener la visión de tres alternativas, se opta por desarrollar el diseño y construcción de la tercera alternativa, ya que a pesar de ser un modelo sin precedentes, cumple con los procesos del ciclo termodinámico necesarios para su funcionamiento; sin descartar la posibilidad de construcción de las otras alternativas en el caso de no obtener resultados favorables.

## **CAPÍTULO 3**

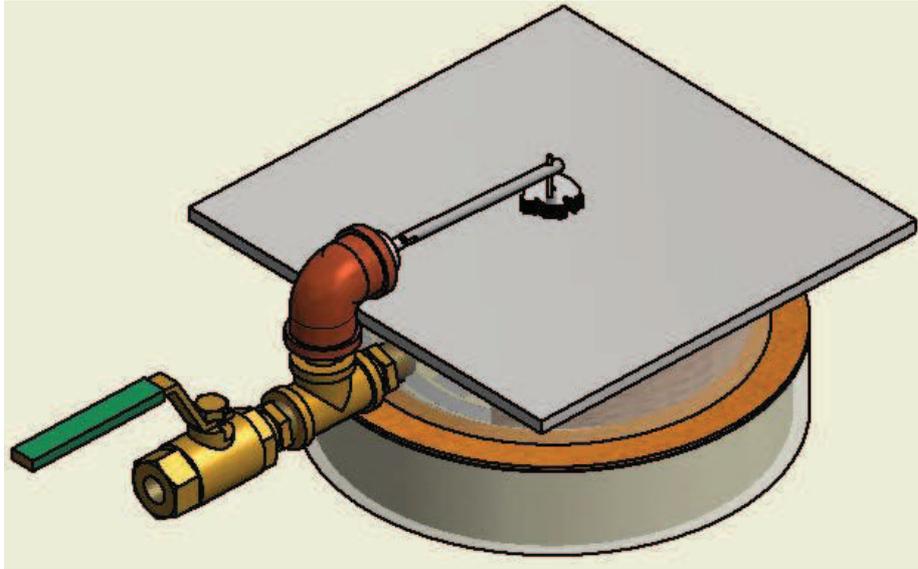
### **DISEÑO DEL MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO**

En base a la opción seleccionada en el Capítulo 2, se procede a describir el modelo a construir, también se identifica los parámetros a tomar en cuenta para determinar la potencia necesaria para cumplir el ciclo Stirling y en base a la misma, dimensionar el área de transferencia de calor, para obtener así las dimensiones del desplazador, la cámara de aire y la placa superior. Además se considera las pérdidas de calor hacia la base del motor y en la cámara, determinando así la potencia que va a suministrar una resistencia eléctrica.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.**

Este es un motor Stirling de desplazador rotativo, el cual se muestra en la Figura 3-1 el cual consiste de una cámara de aire que es de un material aislante rígido. La base de un material cerámico, en la cual se encuentra una resistencia eléctrica focalizada. Dentro de la cámara se encuentra un desplazador rígido con una geometría de sección circular de 270°. El desplazador es solidario al eje del cigüeñal que se encuentra asentado en la placa superior, mediante un rodamiento. Sobre la placa superior se ubica un diafragma que trabaja como un pistón en la expansión y contracción del aire. El aire es transportado al diafragma por una tubería que sale de la cámara en la región del foco caliente. El cigüeñal consta de tres partes que son: la base del cigüeñal, adherida al desplazador, el codo y el eje excéntrico (manivela) al que transfiere la potencia la biela.

Cabe recalcar que al igual que el motor Stirling tipo beta que los estudiantes han venido desarrollando en el Laboratorio de Termodinámica, es necesario que el motor Stirling de desplazador rotativo sea diseñado y construido teniendo en cuenta que el rozamiento sea mínimo y su hermeticidad sea alta como características esenciales para su funcionamiento.



*Figura 3-1 Modelo de Motor a diseñar*

## **3.2 POTENCIA REQUERIDA PARA EL CICLO STIRLING**

Para lograr el funcionamiento del motor, es necesario obtener la potencia eléctrica necesaria, para que la resistencia eléctrica suministre el calor necesario para garantizar la expansión isotérmica del aire en el calentamiento del mismo.

### **3.2.1 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA EL CICLO STIRLING.**

Para el cálculo de la potencia requerida se considera los siguientes parámetros:

- Fluido de trabajo.
- Revoluciones por minuto del motor.
- Temperatura del fluido caliente.
- Temperatura del fluido frío.
- Volumen de fluido desplazado.
- Variación del volumen en el pistón.
- Temperatura del foco caliente.
- Volúmenes Muertos.
- Masa de aire en el motor.

### **3.2.1.1 Fluido de trabajo.**

El fluido de trabajo va a ser aire a presión atmosférica local, cuya propiedad necesaria para este análisis es el calor específico a volumen constante que tiene un valor igual a  $0.72 \text{ KJ}/(\text{Kg} * \text{K})$

### **3.2.1.2 Revoluciones por minuto del motor.**

Para el presente diseño se establece como parámetro objetivo, que el motor debe girar a un número de revoluciones por minuto constante e igual a 20, teniendo en cuenta que el modelo seleccionado es de tipo didáctico, en el cual no se espera generar una cantidad de trabajo considerable o con fines de gran potencia.

### **3.2.1.3 Temperatura del fluido caliente.**

Esta es la temperatura a la cual el aire va a realizar el proceso de expansión a temperatura constante. El valor de esta temperatura es de  $110^{\circ}\text{C}$ .

### **3.2.1.4 Temperatura del fluido frío.**

Esta es la temperatura a la cual el aire va a realizar el proceso de compresión a temperatura constante. El valor de esta temperatura es de  $40^{\circ}\text{C}$ .

### **3.2.1.5 Volumen de fluido desplazado.**

Para el presente diseño se estima un volumen de aire desplazado de  $175 \text{ cm}^3$ .

### **3.2.1.6 Variación del volumen en el pistón.**

Para el volumen desplazado por el pistón, se considera la carrera y el diámetro del mismo. Estos valores son de: carrera  $15\text{mm}$  y diámetro  $25\text{mm}$ .

### **3.2.1.7 Volúmenes Muertos.**

Las holguras entre el desplazador con los demás regiones del motor tienen un valor de  $2 \text{ mm}$ .

### **3.2.1.8 Masa de aire en el motor.**

La masa de aire presente en el motor se calcula en base a condiciones iniciales de funcionamiento y mediante la ecuación(1-10) de la sección 1.5.2.1.

### 3.2.1.9 Eficiencia del regenerador.

La eficiencia del regenerador es del 20%.

### 3.2.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA EL CICLO STIRLING.

Para encontrar la potencia requerida que satisfaga los parámetros propuestos, se procede a calcular en base al análisis matemático de la sección 1.5.

*Tabla 3-1 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [120°].*

PARÁMETROS DEL MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [120°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_{PR}$	25	mm
Carrera del pistón	$L_{PR}$	15	mm
Diámetro del Desplazador	$D_{DR}$	152	mm
Alto del desplazador	$h_{DR}$	38	mm
Ángulo del Volumen Desplazado	$\alpha_{VD}$	90	°
Volumen muerto caliente	$V_{mHR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mLR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	39	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto pistón	$V_{mR}$	15	cm <sup>3</sup>
Temperatura del aire caliente	$T_{HR}$	110	°C
Temperatura del aire frío	$T_{CR}$	40	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
Cv del gas	$C_V$	0.72	KJ/(Kg * K)
Eficiencia del regenerador	$\varepsilon$	20	
Masa	$M_R$	0.00023	Kg
Revoluciones por minuto	$\omega$	20	rpm

Los valores van a ser calculados cada 10° de giro del cigüeñal, la tabla de resultados total se encuentra en el ANEXO2, pero en este capítulo se muestra una tabla reducida que muestra los resultados cada 20° de giro de cigüeñal.

Tabla 3-2 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [120°].

RESULTADOS MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO [120°]													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	V HOT $V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	V COLD $V_C$ [cm <sup>3</sup> ]	V REG $V_{Reg}$ [cm <sup>3</sup> ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{isot}}{KJ * K}$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{isob}}{KJ * K}$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{KJ * K}$	ENTROPÍA $S$ $\frac{KJ}{Kg * K}$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{isot}$ [KJ]	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{isoc}$ [KJ]
0	323.00	91.17	76.17	155.67	71.98	0.00E+00	347.80	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	323.22	130.28	47.00	145.94	73.49	1.22E-05	355.31	3.44E-08	1.52E-06	1.55E-06	3.63E-06	1.22E-05	5.37E-04
40	323.86	169.80	47.00	107.05	74.18	2.73E-05	359.39	7.60E-08	9.60E-07	1.04E-06	5.67E-06	2.72E-05	3.44E-04
60	324.84	209.67	47.00	68.17	74.82	3.93E-05	363.56	1.08E-07	9.71E-07	1.08E-06	7.81E-06	3.92E-05	3.52E-04
80	326.04	240.04	47.00	39.00	75.20	4.66E-05	366.76	1.27E-07	4.95E-07	6.23E-07	9.53E-06	4.66E-05	1.81E-04
100	327.32	241.32	47.00	39.00	74.92	4.79E-05	366.82	1.31E-07	1.39E-08	1.45E-07	9.82E-06	4.79E-05	5.08E-06
120	328.52	213.35	47.00	68.17	74.02	4.31E-05	363.77	1.18E-07	-9.38E-07	-8.19E-07	8.66E-06	4.32E-05	-3.42E-04
140	329.50	175.45	47.00	107.05	72.99	3.31E-05	359.77	9.21E-08	-9.25E-07	-8.33E-07	7.01E-06	3.32E-05	-3.34E-04
160	330.14	137.20	47.00	145.94	72.05	1.95E-05	355.85	5.49E-08	-9.16E-07	-8.62E-07	5.30E-06	1.96E-05	-3.27E-04
180	330.36	98.53	76.17	155.67	70.52	3.94E-06	348.51	1.13E-08	-2.02E-06	-2.01E-06	1.85E-06	3.97E-06	-7.08E-04
200	330.14	69.14	115.05	145.94	69.10	-1.15E-05	341.23	-3.36E-08	-1.54E-06	-1.57E-06	-1.73E-06	-1.15E-05	-5.28E-04
220	329.50	68.50	153.94	107.05	68.33	-2.52E-05	336.80	-7.46E-08	-1.10E-06	-1.17E-06	-4.06E-06	-2.52E-05	-3.70E-04
240	328.52	67.52	192.83	68.17	67.64	-3.56E-05	332.42	-1.07E-07	-1.10E-06	-1.20E-06	-6.45E-06	-3.56E-05	-3.66E-04
260	327.32	66.32	222.00	39.00	67.22	-4.17E-05	329.13	-1.26E-07	-5.71E-07	-6.98E-07	-8.36E-06	-4.17E-05	-1.88E-04
280	326.04	65.04	222.00	39.00	67.45	-4.31E-05	328.95	-1.31E-07	-4.63E-08	-1.77E-07	-8.72E-06	-4.31E-05	-1.52E-05
300	324.84	63.84	192.83	68.17	68.31	-3.97E-05	331.93	-1.20E-07	1.03E-06	9.06E-07	-7.45E-06	-3.96E-05	3.39E-04
320	323.86	62.86	153.94	107.05	69.37	-3.15E-05	336.10	-9.36E-08	1.05E-06	9.60E-07	-5.56E-06	-3.14E-05	3.53E-04
340	323.22	62.22	115.05	145.94	70.41	-1.91E-05	340.44	-5.61E-08	1.08E-06	1.03E-06	-3.54E-06	-1.90E-05	3.68E-04
360	323.00	91.17	76.17	155.67	71.98	-4.03E-06	347.80	-1.16E-08	2.03E-06	2.02E-06	3.66E-10	-4.00E-06	7.03E-04

Tabla 3-3 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo

RESULTADOS TERMODINÁMICO MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [120°]				
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	ECUACIÓN
Presión Máxima	$P_{MAX}$	75.2	KPa	(1-11)
Presión Mínima	$P_{MIN}$	67.22	KPa	(1-11)
Presión Media	$P_{PROM}$	71.24	KPa	-
Relación de Presión	$r_p$	1,12	-	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	366.81	K	(1-12)
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	328.97	K	(1-12)
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	330.02	cm <sup>3</sup>	(1-7)
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	322.66	cm <sup>3</sup>	(1-7)
Relación de Volumen	$r_v$	1.02	-	-
Potencia Neta	$\dot{W}_{NETO}$	0.058	W	(1-14)
Calor total de entrada	$Q_{IN}$	7.49	W	(1-38)
Eficiencia	$\eta_T$	0.77	%	(1-36)

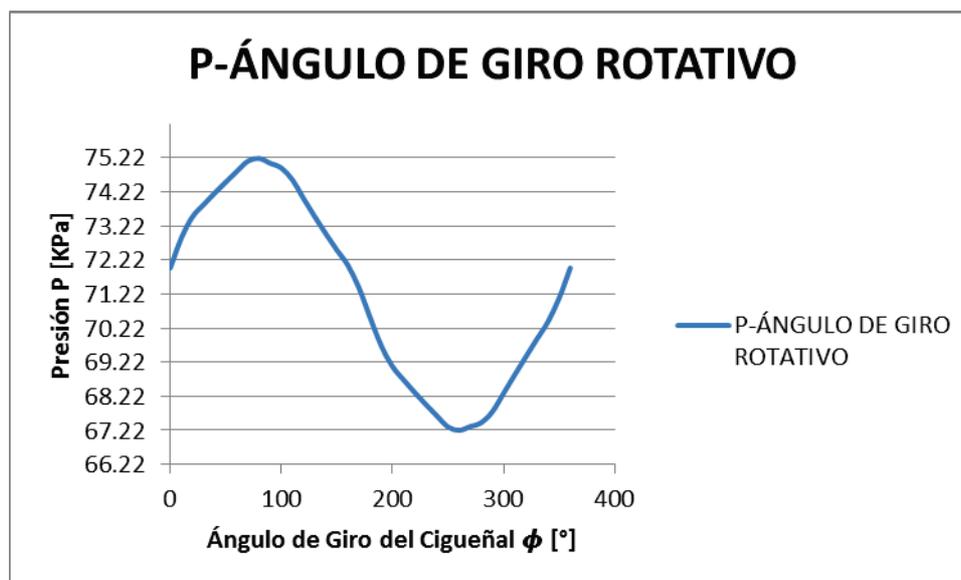


Figura 3-2 Presión vs Ángulo de giro ( $P - \phi$ ) del motor Stirling de desplazador rotativo con 120°

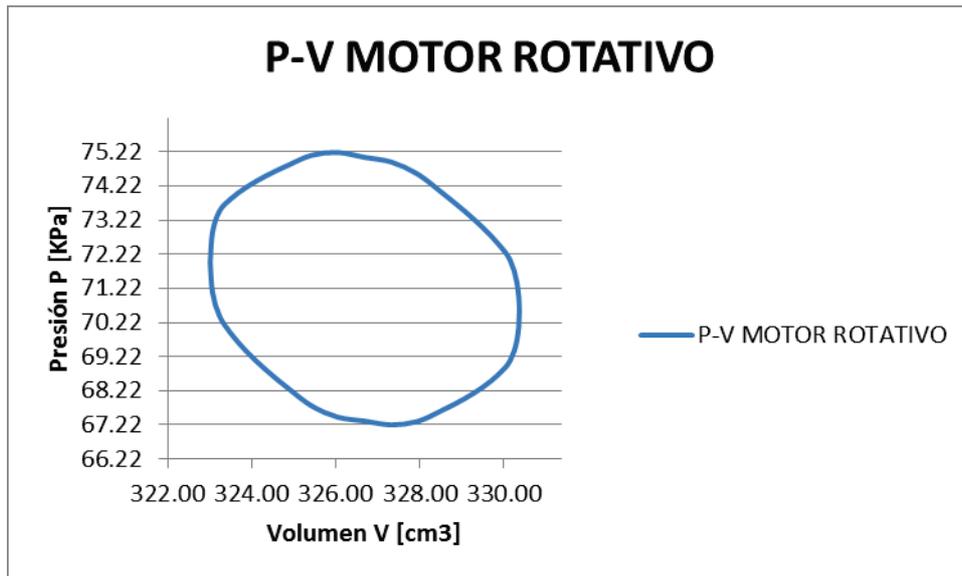


Figura 3-3 Presión vs Volumen ( $P - V$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ )

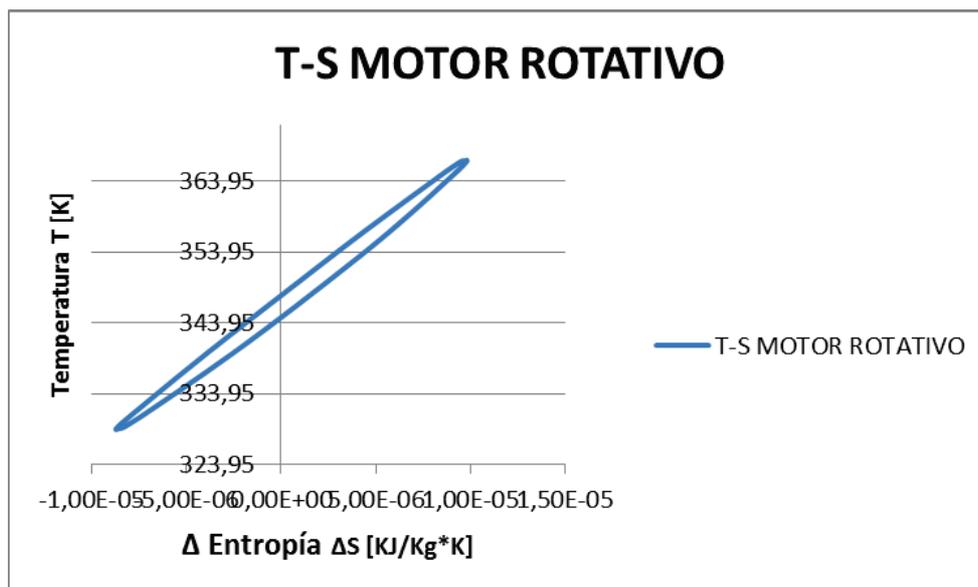


Figura 3-4 Temperatuta vs Entropía ( $T-S$ ) del Stirling de desplazador rotativo ( $120^\circ$ )

Como se observa en la Tabla 3-3 el valor de la energía necesaria que debe transferir la fuente externa al aire es de 7.5 [W]

### 3.3 COEFICIENTE DE CONVECCIÓN TEÓRICO EN EL MOTOR STIRLING.

#### 3.3.1 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN.

Para el cálculo del coeficiente de convección se consideran los siguientes parámetros:

- Fluido de trabajo.

Al ser aire el fluido de trabajo, las propiedades necesarias se determinan en base a la consideración de aire como gas ideal y en base a la Tabla 3-4.

*Tabla 3-4 Propiedades del aire a presión de una atmósfera.<sup>17</sup>*

PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL AIRE A Patm							
$T$	$\rho$	$C_p$	$\mu$	$\nu$	$k$	$\alpha$	$Pr$
K	Kg/m <sup>3</sup>	KJ/kg.K	N.s/m <sup>2</sup> * 10 <sup>-7</sup>	m <sup>2</sup> /s * 10 <sup>-6</sup>	W/m.K * 10 <sup>-3</sup>	m <sup>2</sup> /s * 10 <sup>-6</sup>	
200	1.7458	1.032	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.012	159.6	11.44	22.3	15.9	0.72
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.995	1.009	208.2	20.92	30	29.9	0.7
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.69
450	0.774	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.03	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.04	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.69
700	0.4975	1.075	338.8	68.1	52.4	98	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.44	1.10	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.41	1.11	384.3	93.8	59.6	131	0.716
900	0.39	1.12	398.1	102.9	62	143	0.72
950	0.37	1.13	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.35	1.14	424.4	121.9	66.7	168	0.726

<sup>17</sup>INCROPERA F, DeWITT D; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Fragmento de Tabla A.4; página 839

Como se menciona en las ecuaciones(1-44) y (1-45) de la sección 1.5.5, la densidad y la viscosidad cinemática no se obtienen en base a las tablas, sino en base a dichas ecuaciones.

- Temperatura Superficial de la resistencia.

La resistencia térmica debe tener una temperatura superficial de 500 °C.

### 3.3.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN.

*Tabla 3-5 Datos para determinar el coeficiente de convección por Transferencia de Calor.*

<b>DATOS PARA ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR [120°]</b>			
<b>PARÁMETRO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Área de transversal de aire	$A_t$	0.002907	$m^2$
Perímetro transversal	$p_t$	0.23	$m$
Temperatura Foco Caliente	$T_{PH}$	500	$^{\circ}C$
Temperatura Foco Frío	$T_{PC}$	30	$^{\circ}C$
Temperatura del Aire Caliente	$T_H$	110	$^{\circ}C$
Temperatura del Aire Frío	$T_C$	40	$^{\circ}C$
Velocidad angular	$\omega$	20	$rpm$

Los valores van a ser calculados cada 10° de giro del cigüeñal, la tabla de resultados total se encuentra en el ANEXO2, pero en este capítulo se muestra una tabla reducida que muestra los resultados cada 20° de giro de cigüeñal.

Tabla 3-6 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor en base al ángulo de giro.

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DENTRO DEL MOTOR											
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	TEMP. GLOBAL T [K]	DENSIDAD $\rho$ [ $\frac{Kg}{m^3}$ ]	CALOR ESP. Cp [ $\frac{KJ}{KgK}$ ]	VISC. DINÁMICA $\mu$ [ $\frac{Ns}{m^2}$ ]	VISC. ESTÁTICA $\nu$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	COND. TÉRMICA k [ $\frac{W}{mS}$ ]	DIFUSIVIDAD TÉRMICA $\alpha$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	PRANDL Pr	REINOLDS Re	FLUJO	COEF. CONV h [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]
0	347.80	0.721	1.0089	2.07E-05	2.87E-05	0.030	2.96E-05	0.70	189.04	Laminar	4.11
30	357.34	0.702	1.0097	2.11E-05	3.01E-05	0.031	3.11E-05	0.70	180.30	Laminar	3.81
60	363.56	0.690	1.0104	2.14E-05	3.10E-05	0.031	3.22E-05	0.70	174.95	Laminar	3.84
90	366.79	0.684	1.0107	2.16E-05	3.15E-05	0.031	3.27E-05	0.70	172.27	Laminar	3.85
120	363.77	0.689	1.0104	2.14E-05	3.11E-05	0.031	3.22E-05	0.70	174.78	Laminar	3.84
150	357.80	0.701	1.0098	2.12E-05	3.02E-05	0.031	3.12E-05	0.70	179.89	Laminar	3.81
180	348.51	0.720	1.0089	2.07E-05	2.88E-05	0.030	2.97E-05	0.70	188.35	Laminar	4.11
210	339.01	0.740	1.0086	2.03E-05	2.74E-05	0.029	2.83E-05	0.70	197.91	Laminar	4.68
240	332.42	0.754	1.0083	2.00E-05	2.65E-05	0.029	2.73E-05	0.70	204.97	Laminar	4.65
270	329.04	0.762	1.0082	1.98E-05	2.60E-05	0.028	2.68E-05	0.70	208.74	Laminar	4.63
300	331.93	0.756	1.0083	2.00E-05	2.64E-05	0.029	2.72E-05	0.70	205.51	Laminar	4.64
330	338.25	0.741	1.0085	2.03E-05	2.73E-05	0.029	2.82E-05	0.70	198.71	Laminar	4.68
360	347.80	0.721	1.0089	2.07E-05	2.87E-05	0.030	2.96E-05	0.70	189.04	Laminar	4.11

Tabla 3-7 Resultado del coeficiente de convección promedio.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR [120°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Coeficiente de Convección Promedio	$h_c$	4.22	$W/(m^2 * K)$

### 3.4 CÁLCULO DEL ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

El área de transferencia de calor se va a calcular en base al calor de la expansión isotérmica ya que la otra parte del calor que ingresa es para solventar la baja eficiencia que tiene el regenerador, y con el coeficiente de convección promedio calculado de acuerdo a la ecuación de Sieder - Tate para régimen laminar.

Dicha área se calcula de acuerdo a la expresión

$$\dot{Q}_{in} = h_c * A * (T_{PH} - T_H) \quad (3-1)$$

Entonces reemplazando los valores, se obtiene:

$$A = \frac{\dot{Q}_{in}}{h_c * (T_{PH} - T_H)}$$

$$A = \frac{7.5 \text{ W}}{4.22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * (500 - 110)\text{K}}$$

$$A = 0.00455 \text{ m}^2$$

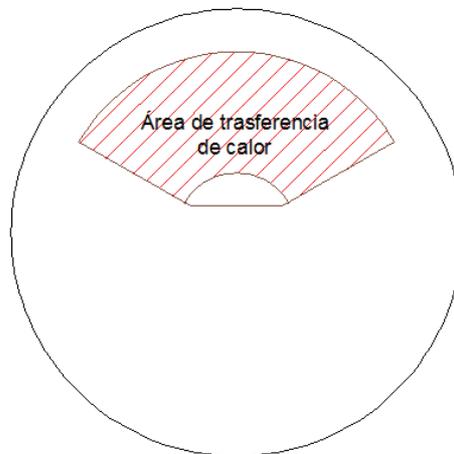
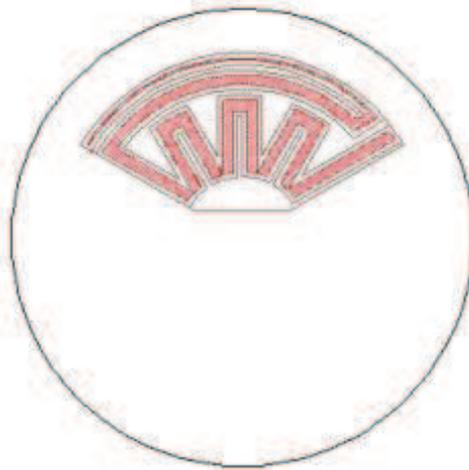


Figura 3-5 Área de transferencia de calor.

### 3.5 SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

En el foco caliente del motor se busca tener un calentador de aire en base a resistencias eléctricas de una forma y región determinada. Siendo así la más común y adecuada la resistencia eléctrica de níquel enrollada.

La resistencia eléctrica enrollada más común en el mercado posee  $35 \Omega$  de resistencia interna con una longitud de 22 cm. En este caso dentro del área del foco caliente calculada en la sección 3.5, al ser el diámetro de la resistencia de 5mm y una separación de 10mm entre la misma, la longitud de la resistencia es de 33 cm correspondiente a una resistencia interna de  $52 \Omega$ .



*Figura 3-6 Disposición de la resistencia eléctrica en el área de transferencia de calor.*

### 3.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESPLAZADOR

La forma del desplazador es de un cilindro sólido, el cual tiene un espacio vacío en una cuarta parte del mismo, el movimiento del desplazador va a hacer posible que el aire en dicho espacio se desplace del foco caliente al foco frío, pasando por el regenerador.

Con el área de transferencia de calor calculada, se puede determinar el diámetro del desplazador más adecuado para el diseño. Considerando que el área de transferencia de calor corresponde al área de la sección faltante en el desplazador, así el diámetro es:

$$D_D = 4 * \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3-2)$$

$$D_D = 4 * \sqrt{\frac{0.00455m^2}{\pi}}$$

$$D_D = 0.152 \text{ m}$$

Por otra parte, la altura del desplazador se determina en base al volumen de aire considerado para el diseño ( $175 \text{ cm}^3$ ) y área de transferencia de calor.

$$h_D = \frac{V_{AD}}{A} \quad (3-3)$$

$$h_D = \frac{175 \text{ cm}^3}{45.5 \text{ cm}^2}$$

$$h_D = 38 \text{ mm}$$

*Tabla 3-8 Dimensiones del desplazador*

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro del desplazador	mm	152
Altura del desplazador	mm	38

### 3.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE AIRE

El dimensionamiento de la cámara de aire se realiza a partir de las dimensiones del desplazador, para la altura de la cámara de aire se tiene la siguiente expresión:

$$h_a = h_s + h_i + h_D \quad (3-4)$$

El valor de las holguras se establece en la sección 3.2.1.7 correspondiente a 2mm.

Para determinar el diámetro interno de la cámara de aire, se utiliza la ecuación (3-5)

$$d = D_D + 2 h_d \quad (3-5)$$

Reemplazando los valores del desplazador se tiene:

$$ha = 2 + 2 + 38$$

$$ha = 42 \text{ mm}$$

$$d = 152 + 2 * 2$$

$$d = 156 \text{ mm}$$

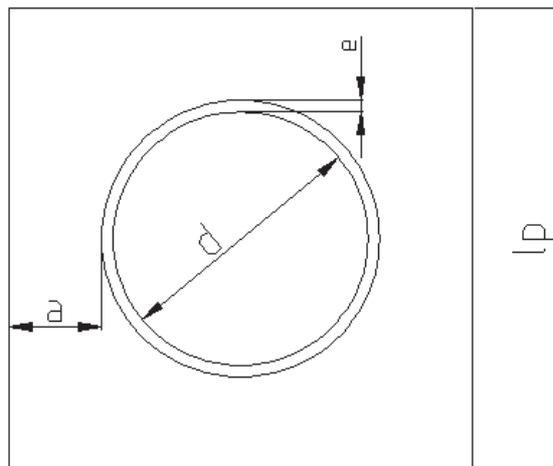
*Tabla 3-9 Dimensiones de la cámara de aire*

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro de la cámara de aire	mm	156
Altura de la cámara de aire	mm	42

### 3.8 DIMENSIONAMIENTO LA PLACA SUPERIOR

Las dimensiones que se busca determinar en la placa superior son: largo, ancho y espesor. El largo y ancho se determinan en base al diámetro de la cámara y van a ser iguales, esto se debe a que la cámara es circular y va a asentarse en la placa superior.

En la Figura 3-7 se puede observar las dimensiones a determinarse.



*Figura 3-7 Dimensiones consideradas para determinar la medida del largo y ancho de la placa inferior.*

Con estas consideraciones la expresión que permite determinar el largo y ancho de la placa superior es:

$$l_p = d + 2 * e_p + 2 * a \quad (3-6)$$

En donde:

$$d = 156mm$$

$$e_p = 6mm.$$

$$a = 15mm$$

Al reemplazar los valores obtenidos en las consideraciones se llega a que el largo y ancho de la placa inferior es  $l_p = 198mm \approx 20cm$ .

Para determinar el espesor de la placa, se considera un rango accesible en el mercado cuyo valor se encuentra entre los valores de: 1-10mm. Sin embargo para reducir este margen se debe tener en cuenta que en la placa superior se aloja un rodamiento, cuya altura es de 4mm. De esta manera el espesor queda reducido a un espesor entre 4 y 6mm.

*Tabla 3-10 Dimensiones de la placa superior*

Parámetro	Unidad	Valor
Lado	mm	200
Espesor	mm	6

### 3.9 DIMENSIONAMIENTO DEL CIGÜEÑAL

Para el diseño del cigüeñal, la característica principal que se toma en cuenta es el evitar un exceso de rozamiento, de no ser así, el trabajo del motor que se obtiene podría no ser suficiente para hacerlo girar, una manera de cumplir con dicha característica es evitar que existan muchos puntos de contacto en el cigüeñal.

Para realizar el dimensionamiento del cigüeñal, se procede a analizar las presiones mostradas en la *Tabla 3-3*, para determinar las cargas a las que está sometido el cigüeñal mediante la ecuación (3-7)

$$P = \frac{F}{A_p} \quad (3-7)$$

De esta manera se obtiene una fuerza de expansión correspondiente a la presión máxima de:

$$F_{exp} = (P_{Max} - P_{atm}) * A_P$$

$$F_{exp} = (75200 - 71982) * \frac{\pi * 0.025^2}{4}$$

$$F_{exp} = 1.58 \text{ N}$$

También se obtiene una fuerza de compresión de:

$$F_{comp} = (P_{atm} - P_{min}) * A_P$$

$$F_{comp} = (71982 - 67220) * \frac{\pi * 0.025^2}{4}$$

$$F_{comp} = 2.3 \text{ N}$$

Como se puede observar el valor promedio de estas fuerzas de expansión y compresión, es de dos Newton. Estas fuerzas son las que van a generar el impulso necesario para garantizar el giro del cigüeñal y por ende del desplazador del motor. Para un radio de bicicleta de acero inoxidable, cuyo diámetro es de dos milímetros y considerando que el motor gira a veinte revoluciones por minuto, no se realiza un cálculo para confirmar que este elemento resiste los esfuerzos a los cuales va a estar sometido.

La forma del cigüeñal presenta un desfase de 90° entre el codo y sus ejes cuya manivela es excéntrica al eje solidario al desplazador; debido a que la relación de giro de éste con respecto al desplazador es de 1:1; el codo se conecta con la biela del diafragma. El valor de la excentricidad va a depender de la longitud de la biela a la cual está conectado y de la carrera que se desea que tenga el diafragma, teniendo en cuenta que la carrera del diafragma no sea nula y que la trayectoria de la biela sea casi lineal.

La carrera del diafragma, la biela que conecta al diafragma con el codo excéntrico del cigüeñal, se indican en la Figura 3-8

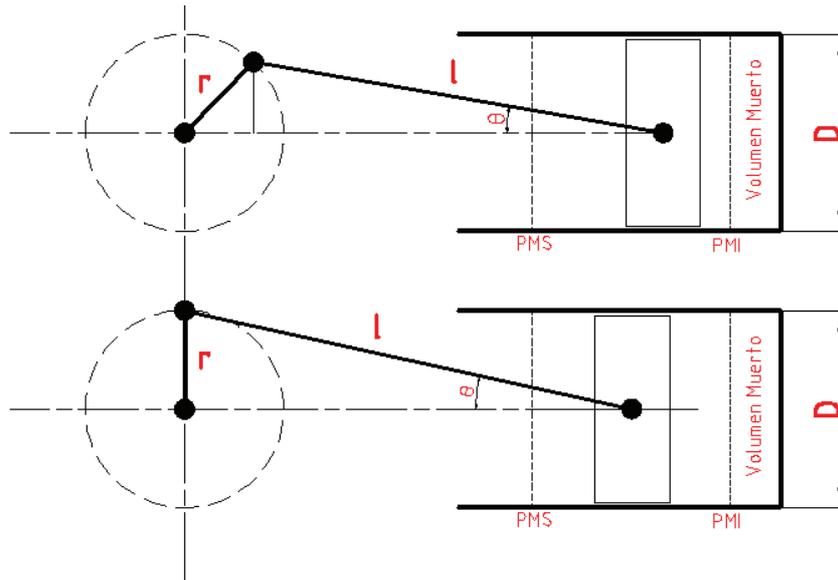


Figura 3-8 Esquema biela – cigüeñal

El ángulo  $\theta$  máximo se tiene cuando  $r$  se encuentre perpendicular al eje central, y para que la trayectoria de la biela sea casi lineal la función trigonométrica  $\sin(\theta) \approx 0$ .

Tabla 3-11 Radio del cigüeñal en función de la longitud de la biela.

r	L	l = 50 mm			l = 60 mm			l = 70 mm			l = 80 mm			l = 90 mm		
		$\theta$	l/r	$\sin(\theta)$												
Mm	mm	°	-	-	°	-	-	°	-	-	°	-	-	°	-	-
4	8	4,6	13	0,08	3,8	15	0,07	3,3	18	0,06	2,9	20	0,05	2,5	23	0,04
5	10	5,7	10	0,10	4,8	12	0,08	4,1	14	0,07	3,6	16	0,06	3,2	18	0,06
6	12	6,9	8	0,12	5,7	10	0,10	4,9	12	0,09	4,3	13	0,08	3,8	15	0,07
7	14	8,1	7	0,14	6,7	9	0,12	5,7	10	0,10	5,0	11	0,09	4,5	13	0,08
8	16	9,2	6	0,16	7,7	8	0,13	6,6	9	0,11	5,7	10	0,10	5,1	11	0,09

En vista de que el  $\sin(\theta)$  tiene una relación directa con la longitud de la biela y una relación inversa con el radio del cigüeñal, se recomienda los trabajar dentro de los rangos que se indican en la Tabla 3-11 para que el valor de esta función se aproxime a cero.

La carrera del diafragma puede estar entre los 8 mm a los 16 mm, dentro de este intervalo la unión diafragma – biela no presenta rozamiento con la pared interna del cilindro, y además dentro de este rango el ángulo que se forma es menor a

10°, por lo que puede considerarse que la trayectoria de la biela es lineal. Entonces la excentricidad en el cigüeñal está entre 4 a 8 mm.

La longitud del cigüeñal se determina mediante la suma de parámetros previamente establecidos como son: la holgura entre el desplazador y la placa superior, el espesor del aislante entre la cámara de aire y la placa superior, el espesor de la placa superior, la distancia entre el codo del cigüeñal y la placa superior, espesor del codo y finalmente la distancia entre la biela y el codo.

$$l_c = h_s + e_{aisl} + e_p + d_{p-c} + e_{cc} + d_{b-c} \quad (3-8)$$

Donde:

$$e_{aisl}: = 2 \text{ [mm]}.$$

$$e_p: = 6 \text{ [mm]}.$$

$$d_{p-c}: = 5 \text{ [mm]}.$$

$$e_{cc}: = 5 \text{ [mm]}.$$

$$d_{b-c}: = 10 \text{ [mm]}.$$

$$l_c = 2 + 2 + 6 + 5 + 5 + 10$$

$$l_c = 30 \text{ [mm]}$$

*Tabla 3-12 Dimensiones del cigüeñal*

Parámetro	Unidad	Valor
Longitud del cigüeñal	mm	30
Excentricidad en el cigüeñal	mm	7

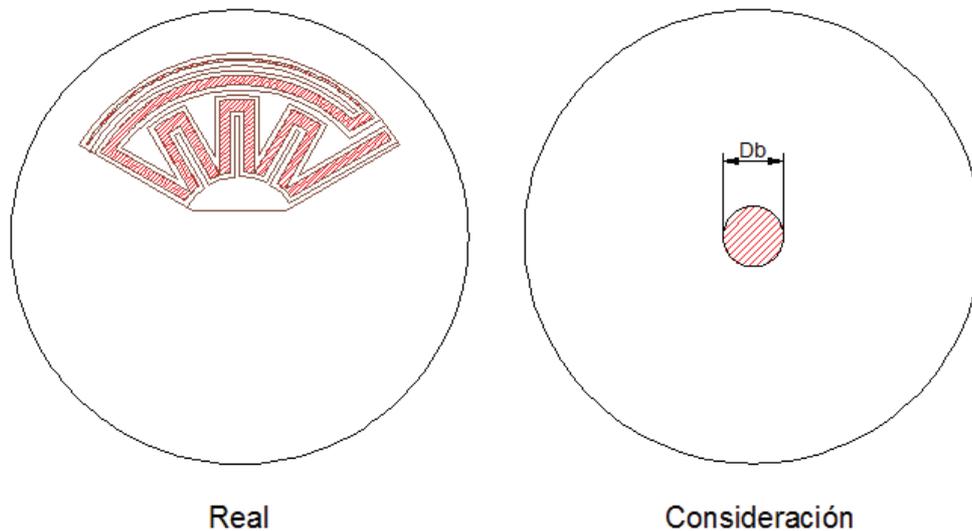
### 3.10 CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL

La potencia total que se va a suministrar al sistema considera: la cantidad de calor que el aire necesita para cumplir su ciclo, la cantidad de calor que se pierde debido a los efectos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. Siendo la suma de dichos calores la potencia total que se va a entregar desde la fuente externa.

El calor necesario para cumplir el ciclo Stirling se calcula en la sección 3.2.2, mismo que corresponde a 7.5 [W].

La cantidad de calor que se pierde se analiza principalmente en la conducción de calor a través de la base del motor y la interacción de ésta con el medio, además de la convección entre el medio ambiente con la placa superior y una parte de la pared de la cámara.

La resistencia eléctrica se encuentra enrollada en una sección circular de 120° sobre la parte superior de la base del motor. Sin embargo con la finalidad de simplificar el análisis de la transferencia de calor se considera que el área correspondiente al foco caliente se encuentra concentrado en el centro de la base como se indica en la Figura 3-9.



*Figura 3-9 Consideración para la resistencia eléctrica.*

El cálculo del diámetro “ $D_b$ ” de la zona caliente se realiza de la siguiente manera:

Con el área de transferencia de calor calculada en la sección 3.4 se calcula el diámetro del círculo en el centro de la base, mediante la ecuación (3-10).

$$A = \frac{\pi * D_b^2}{4} \quad (3-9)$$

$$D_b = \sqrt{\frac{4 * 45.5}{\pi}}$$

$$D_b = 7.6 \text{ cm}$$

Para el análisis de la transferencia de calor de una pared cilíndrica se tiene los radios  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , teniendo en cuenta que entre  $r_1$  y  $r_2$  existe conducción de calor a través del yeso, de  $r_2$  a  $r_3$  la conducción se realiza a través de la carcasa y alrededor de  $r_3$  existe convección con el medio ambiente como se puede apreciar en la Figura 3-10.

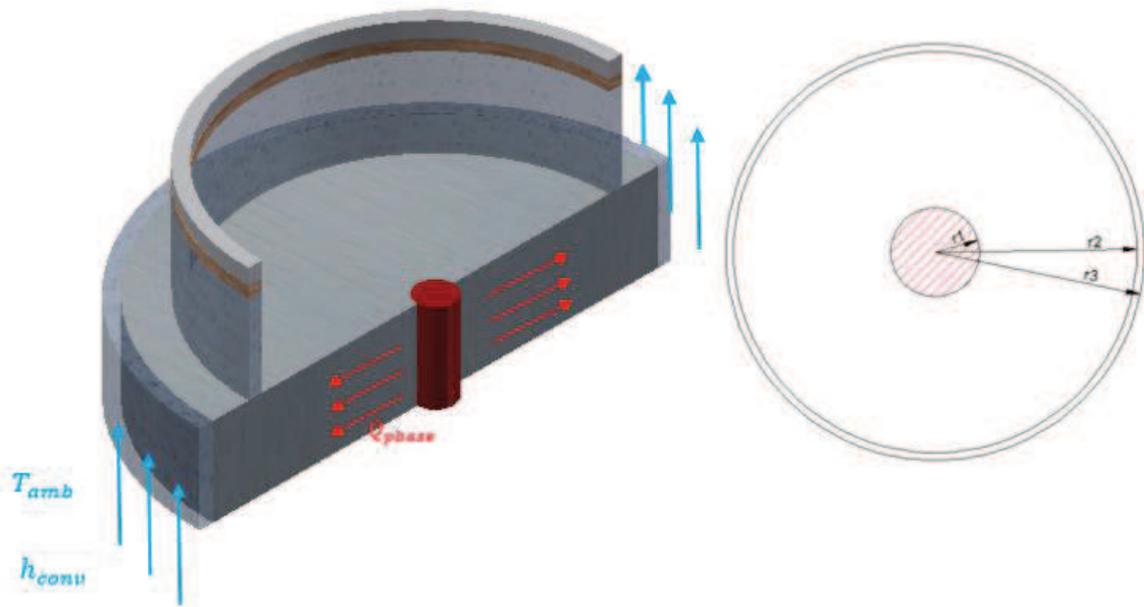


Figura 3-10 Análisis del flujo de calor en la base del motor

Para realizar el circuito de resistencias térmicas, se utiliza las siguientes ecuaciones:

- Resistencia térmica para una pared plana<sup>18</sup>.

$$R_{t,cond} = \frac{L}{k * A} \quad (3-10)$$

$$R_{t,conv} = \frac{1}{h * A} \quad (3-11)$$

- Resistencia térmica para un cilindro<sup>19</sup>.

<sup>18</sup>INCROPERA F, DeWITT D; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Fragmento de Tabla A.4; página 77

<sup>19</sup>INCROPERA F, DeWITT D; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Fragmento de Tabla A.4; página 90

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * k} \quad (3-12)$$

$$R_{t,cond} = \frac{1}{2\pi r L h} \quad (3-13)$$

- Transferencia de calor.<sup>20</sup>

$$q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{tot}} \quad (3-14)$$

Entonces, el circuito de resistencias térmicas es el siguiente:



Figura 3-11 Circuito de Resistencias Térmicas.

Mediante una simplificación del circuito de la Figura 3-11, se obtiene el circuito de la Figura 3-12.



Figura 3-12 Circuito de Resistencias simplificado.

En donde:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3$$

En el análisis de la transferencia de calor entre la placa superior con el medio para la región del foco caliente, como se indica en la Figura 3-13, se asume que la temperatura en la parte superior en la región del foco caliente es igual a la temperatura del aire  $T_{HR} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

<sup>20</sup>INCROPERA F, DeWITT D; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Fragmento de Tabla A.4; página 77

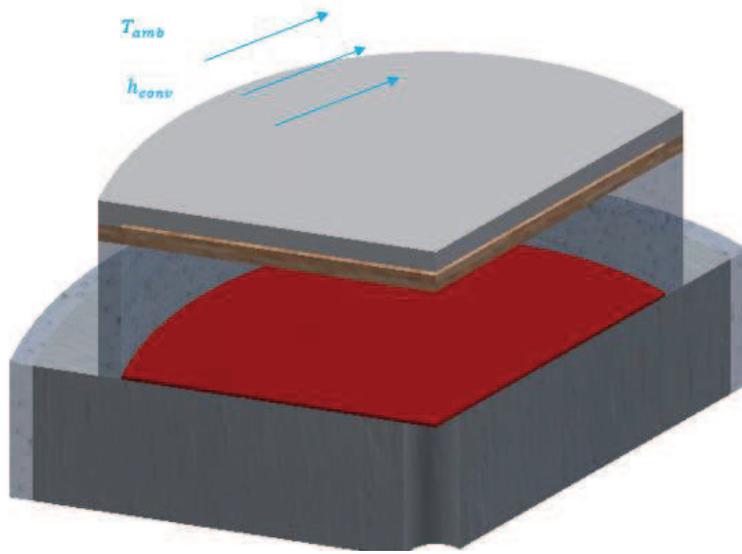


Figura 3-13 Análisis de transferencia de calor de la placa superior.

Teniendo así como resultado el circuito térmico que se indica en la Figura 3-14

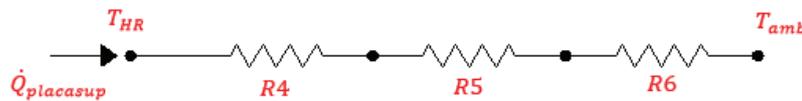


Figura 3-14 Circuito de resistencias térmicas en la placa superior del motor.

Simplificando el circuito térmico anterior, se tiene:



Figura 3-15 Circuito de resistencias térmicas simplificado para la placa superior.

En donde:

$$R_{totps} = R4 + R5 + R6$$

Para la región de la cámara de aire correspondiente al foco caliente, se asume que la pared interna se encuentra a la temperatura del aire  $T_{HR} = 110^{\circ}C$ . Y que esta sección corresponde a una pared recta como se indica en la Figura 3-16.

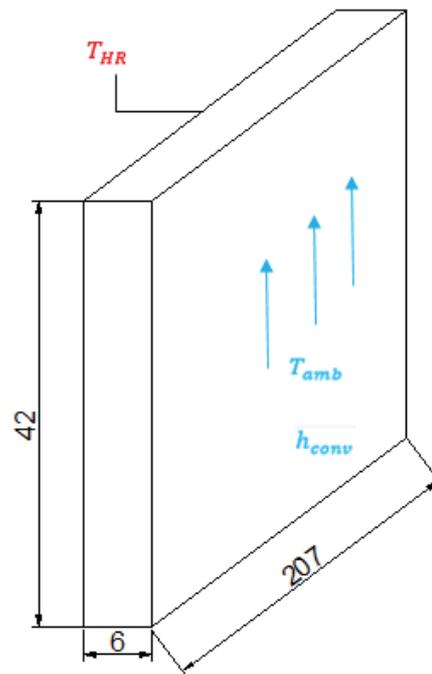


Figura 3-16 Análisis de transferencia de calor en la cámara de aire.

Obteniendo así el circuito de resistencias térmicas que se indica en la Figura 3-17.



Figura 3-17 Circuito de resistencias térmicas en la pared de la cámara de aire.

Simplificando el circuito térmico anterior, se tiene:



Figura 3-18 Circuito de resistencias térmicas simplificado para cámara de aire.

En donde:

$$R_{totacrílico} = R7 + R8$$

Para determinar los valores correspondientes, de acuerdo a la ecuación (3-14), el calor se determina con las siguientes expresiones:

$$\dot{Q}_{pbase} = \frac{T_{PH} - T_{amb}}{R_{tot}}$$

$$\dot{Q}_{placasup} = \frac{T_{PH} - T_{amb}}{R_{totps}}$$

$$\dot{Q}_{pacrilico} = \frac{T_{HR} - T_{amb}}{R_{totacrilico}}$$

Realizando un balance de energía, se tiene la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{pacrilico} + \dot{Q}_{pbase} + \dot{Q}_{placasup} \quad (3-15)$$

Tabla 3-13 Parámetros para calcular el calor perdido

DATOS PARA DETERMINAR EL CALOR PERDIDO			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Radio de la fuente de calor	$r_1$	38	mm
Radio interior de la base del motor	$r_2$	99	mm
Radio de la carcasa de la base del motor	$r_3$	105	mm
Altura de la base	$h_{base}$	40	mm
Espesor del asbesto	$e_{aisl}$	2	mm
Altura de la cámara	$h_a$	42	mm
Espesor de la Madera	$e_{madera}$	3	mm
Espesor de la placa superior	$e_p$	6	mm
Coefficiente de convección al ambiente <sup>21</sup>	$h_{amb}$	11	W/m <sup>2</sup> K
Conductividad térmica del yeso	$k_{yeso}$	0.81	W/mK
Conductividad térmica del acrílico	$k_{acril}$	0.19	W/mK
Conductividad térmica de la madera	$k_{madera}$	0.13	W/mK
Conductividad térmica del aluminio	$k_{Al}$	210	W/mK

<sup>21</sup>ENRÍQUEZ L.; GUADALUPE J. Diseño y Construcción de un Motor Stirling solar para el Laboratorio de Termodinámica, EPN, 2011, Tabla 3.5

Tabla 3-14 Resultados del pérdidas de calor en el motor.

RESULTADOS DEL CALOR PERDIDO				
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	ECUACIÓN
Resistencia a la conducción en el yeso en la base del motor.	$R_1$	4.1	$K/W$	(3-12)
Resistencia por conducción en la carcasa de la base.	$R_2$	1.09	$K/W$	(3-12)
Resistencia a la convección entre la carcasa de la base y el medio.	$R_3$	3.1	$K/W$	(3-13)
Resistencia a la conducción en el aislante de la placa superior.	$R_4$	5.1	$K/W$	(3-10)
Resistencia a la conducción en la placa superior.	$R_5$	0.0063	$K/W$	(3-10)
Resistencia a la convección entre la placa superior y el medio.	$R_6$	19.9	$K/W$	(3-11)
Resistencia a la conducción en la cámara de aire.	$R_7$	3.63	$K/W$	(3-10)
Resistencia a la convección entre la cámara de aire y el medio.	$R_8$	10.45	$K/W$	(3-11)
Resistencia térmica equivalente en la base del motor	$R_{tot}$	8.33	$K/W$	-
Resistencia térmica equivalente en la placa superior	$R_{totps}$	25.05	$K/W$	-
Resistencia térmica equivalente en la cámara de aire	$R_{totacrílico}$	14.08	$K/W$	-
Calor perdido en la base del motor.	$\dot{Q}_{pbase}$	57.6	$W$	(3-14)
Calor perdido en la placa superior.	$\dot{Q}_{placasup}$	3.6	$W$	(3-14)
Calor perdido en la cámara de aire.	$\dot{Q}_{pacrílico}$	6.4	$W$	(3-14)
Calor total perdido	$\dot{Q}_p$	67.6	$W$	(3-15)

La potencia total requerida se la obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_p \quad (3-16)$$

$$\dot{Q}_{total} = 7.5 + 67.6$$

Considerando un factor de seguridad del 20%<sup>22</sup>, la potencia real requerida es:

$$\dot{Q}_{total'} = \dot{Q}_{total} * 1.2$$

$$\dot{Q}_{total'} = 75.1 * 1.2$$

$$\dot{Q}_{total'} = 90.1 \text{ W}$$

### 3.11 VOLTAJE DE FUNCIONAMIENTO

Con la potencia total requerida, y la resistencia interna, se calcula el voltaje utilizando la expresión basada en la ecuación del efecto Joule y la ley de Ohm.

$$\dot{Q}_{total'} = \text{Voltaje} * \text{Intensidad}^{23} \quad (3-17)$$

$$\text{Voltaje} = \text{Intensidad} * \text{Resistencia}^{24} \quad (3-18)$$

$$\text{Voltaje} = \sqrt{\dot{Q}_{total'} * \text{Resistencia}} \quad (3-19)$$

Reemplazando los valores de la potencia real requerida, y la resistencia a utilizar se obtiene:

$$\text{Voltaje} = \sqrt{90.1 * 52}$$

$$\text{Voltaje} = 68.5 \approx 70 \quad [\text{Voltios}]$$

Este voltaje se ajusta mediante un dispositivo de control de voltaje o dimmer.

<sup>22</sup> MAXIWATT; Resistencias Industriales; <http://www.resistencias.com/esp/formulas.php>

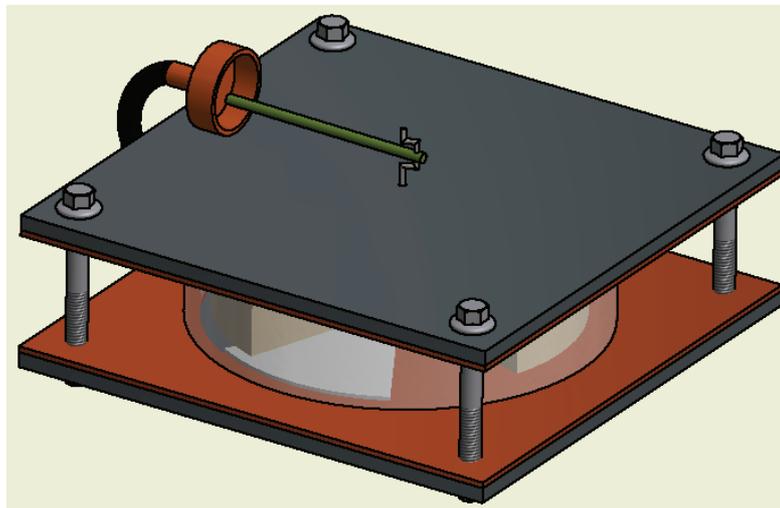
<sup>23</sup> SERWAY R; JEWETT J.; Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna; Volumen 2; Capítulo 27; ecuación 27.20

<sup>24</sup> SERWAY R; JEWETT J.; Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna; Volumen 2; Capítulo 27; ecuación 27.6

## CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN Y RESULTADOS

En el capítulo presente se detalla tres opciones de construcción del motor Stirling de desplazador rotativo, de las cuales, la primera y la segunda opción se realizan sin llegar a obtener resultados satisfactorios, siendo planteada la tercera forma de construir en base a las posibles causas que impiden la operación correcta del motor Stirling. Obteniendo así una opción de construcción cuyo funcionamiento es el deseado, y además un diseño determinado.

### 4.1 OPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN 1 DE 3



*Figura 4-1 Opción 1 de 3 para construcción*

#### 4.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.

Este motor Stirling tiene dos placas de acero, siendo la placa inferior la base del motor y la que cumple de foco caliente. Para facilitar la alineación entre las placas se colocan cuatro pernos, cuyas guías son hechas en un taladro vertical con un broca de 1/4 de pulgada.

Sobre cada placa está pegada una lámina de asbesto, con el fin de evitar el contacto directo de las placas conductoras (acero) con la cámara de aire (acrílico), y a su vez la geometría de la lámina de asbesto deja una sección circular libre en el foco caliente en la placa inferior y para el foco frío en la placa

superior, de esta manera se focaliza la transferencia de calor al aire en la sección circular libre.

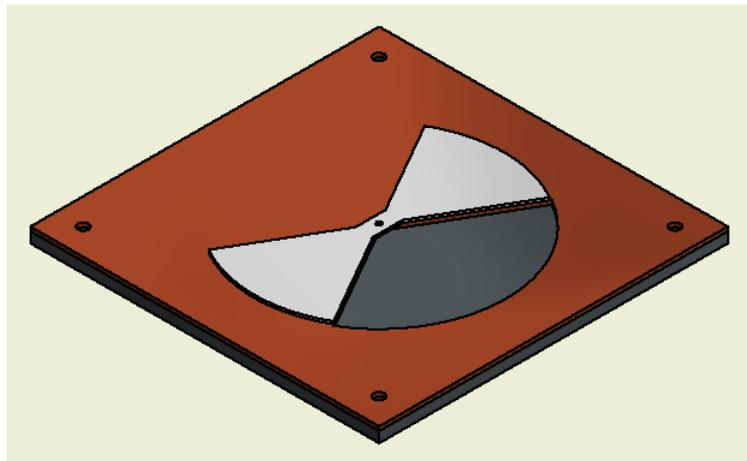
El eje cigüeñal es un radio de bicicleta que se asienta en la placa inferior, atraviesa al desplazador y la placa superior, siendo solidario únicamente al desplazador. Por esta razón es muy importante que las dos placas se encuentren alineadas perfectamente, caso contrario pueden generarse rozamiento entre el desplazador y las paredes de las cámaras.

En la pared de la cámara de aire se ubica un orificio el cual sirve como toma de aire y se une a una manguera flexible y posteriormente al diafragma en la parte superior del motor.

La distribución de la cámara cilíndrica del motor se encuentra de la siguiente manera:  $120^\circ$  para el foco caliente,  $120^\circ$  para el foco frío y  $120^\circ$  para la regeneración. Cabe recalcar que los  $120^\circ$  de la regeneración se encuentra dividida en  $60^\circ$  para el enfriamiento de aire y  $60^\circ$  grados para el calentamiento de aire.

En la Figura 4-1, el motor se encuentra armado completamente, pero su construcción se realiza por partes, las cuales se indican a continuación:

#### 4.1.2 BASE DEL MOTOR



*Figura 4-2 Base del motor Stirling 1-3*

La base del motor se encuentra conformada por:

- Placa conductora de calor, que se va a asentar en la fuente de calor.

- Lámina de material aislante, cuya geometría busca focalizar el calor añadido, aislando la región en la que no es necesario la transferencia de calor.
- Regenerador, que se asienta en la parte aislada con una forma de dos secciones circulares de 60° unidas en su centro.

#### 4.1.2.1 Placa Conductora.

Esta placa es el elemento que va a estar en contacto con la fuente de calor que puede ser un reverbero o un mechero, y la función de dicha placa es de transferir el calor de la fuente al aire en el interior de la cámara.

Esta placa tiene que ser de un material de alta conductividad térmica y de un precio coherente para los estudiantes. A continuación se muestra una lista de materiales conductores con sus respectivos precios.

*Tabla 4-1 Lista de materiales conductores<sup>25</sup>*

MATERIAL	DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	CALOR ESPECÍFICO J/(Kg*K)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/(m*K)	PRECIO \$/Kg
ACERO	7800	460	50	0.38
ALUMINIO	2700	909	210	1.86
ZINC	7140	389	110	2.00
COBRE	8900	389	380	4.65
ORO	19330	130	308.2	4200
PLATA	10500	234	418	580

Uno de los puntos de vista principales para la selección es el económico por lo que se puede eliminar fácilmente al oro y a la plata, aun siendo estos los materiales que mejores propiedades presentan.

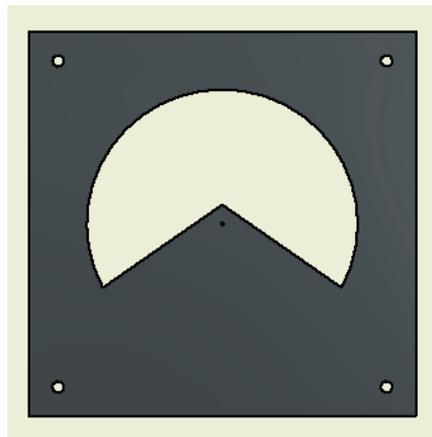
El cobre y sus aleaciones como son el bronce y el latón se podrían considerar de la misma manera como materiales de un costo significativo comparado con el acero, ya que su precio es de doce veces más pero de igual manera su conductividad térmica es siete veces mayor.

<sup>25</sup><http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

El uso del zinc está limitado al galvanizado de piezas o láminas de acero, por este motivo no es posible el uso del zinc en forma de placa para la aplicación que se busca.

Con lo expuesto anteriormente las opciones quedan reducidas a dos, que son el aluminio y el acero, por un lado se tiene el precio reducido del acero y por otro las buenas propiedades térmicas del aluminio.

Para lograr focalizar el calor en una sola región y minimizar el contacto de la placa conductora con el aislante, se puede realizar un corte en forma de sección circular de  $240^\circ$  en el interior de la placa. Este corte se debe realizar con una amoladora para las partes rectas y la parte curva con oxicorte. Se debe tener en cuenta que debido al oxicorte, el espesor de la placa debe ser de al menos 5mm, de lo contrario la placa puede deformarse evitando el asentamiento uniforme del asbesto, y por ende de la cámara de aire, generando el riesgo de fugas.



*Figura 4-3 Placa de la base del motor Stirling 1-3*

#### **4.1.2.2 Lámina de Material Aislante.**

- Si se calienta toda la placa, el asbesto que se ubica sobre ésta se calienta demasiado (Temperaturas mayores a  $150^\circ\text{C}$ ) de manera uniforme.
- Al calentarse el asbesto, se empiezan a expandir gases en su interior debido principalmente a la humedad que existe dentro del mismo, el problema es que al ocurrir esto en la zona que se encuentra dentro de la cámara de aire los gases no pueden escapar al ambiente, provocando que

la capa superior del asbesto se infle, y obstruyendo al movimiento normal del desplazador.

Con el corte que presenta la placa de acero, además de focalizar el calor, se evita que se infle el asbesto en el interior de la cámara de aire, ya que del otro lado de este aislante no hay nada que impida que la expulsión de los gases que este produzca al calentarse.

Para seleccionar el material que se va a utilizar, y teniendo en cuenta que debe ser un material aislante, es decir que su conductividad térmica sea pequeña, se tiene las siguientes opciones.

*Tabla 4-2 Lista de materiales aislantes<sup>26</sup>*

<b>MATERIAL</b>	<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/(m*K)</b>
ASBESTO	0.19
MADERA	0.13
CORCHO	0.04
LANA DE VIDRIO	0.05

Como se puede observar en la Tabla 4-2, la mejor opción de material aislante es el corcho o la lana de vidrio; la lana de vidrio no se encuentra en láminas rígidas por lo que no se la puede utilizar; sin embargo aunque el corcho si existe en láminas, sus superficies son demasiado rugosas lo que implica tener un sistema poco hermético, es decir que van a existir fugas de aire a través del corcho por la parte inferior de la cámara.

Se puede utilizar láminas de madera, pero la placa base se va a encontrar a temperaturas superiores a los 250° C, y teniendo en cuenta que la madera a esta temperatura empieza a desprender gases combustibles, esta alternativa también es descartada, quedando como opción una lámina de asbesto.

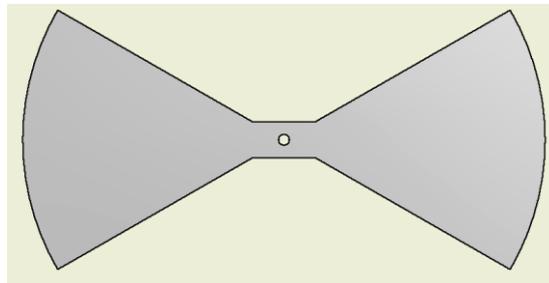
Para que se adhiera el asbesto con la placa de acero, es recomendable utilizar una silicona para alta temperatura, de ser posible la Silicona GREY, de resultados

<sup>26</sup><http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

experimentales se concluyó que esta silicona se pega de mejor manera que la Silicona RED.

#### 4.1.2.3 Regenerador

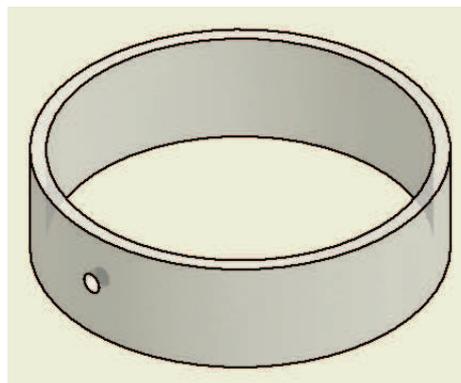
El regenerador se ubica sobre el asbesto, teniendo en cuenta que debe estar entre el foco caliente y el foco frío; se puede pegar con silicona de alta temperatura, pero es importante que éste quede lo más plano posible para que de esta manera no haya rozamiento al girar el desplazador. Si bien, la superficie del regenerador tiene  $120^\circ$  de circunferencia, éste consta de dos partes de  $60^\circ$  cada una, teniendo la siguiente geometría.



*Figura 4-4 Regenerador del motor Stirling 1-3.*

El material del regenerador se debe caracterizar por una buena conductividad térmica, además que tenga presentaciones en espesores pequeños (menores a 1 mm), por lo que con dichas características si tiene como opciones diferentes materiales, los cuales se indican en la Tabla 4-1; en donde se puede apreciar que una lámina de galvanizado es apta para la elaboración del regenerador, ya que su conductividad es alta y además si se la puede conseguir en espesores pequeños.

#### 4.1.3 CÁMARA DE AIRE



*Figura 4-5 Cámara de aire del motor Stirling 1-3*

La cámara de aire es un cilindro, en el interior de éste se desplazará el aire del foco caliente al foco frío. La cámara presenta una perforación en la pared en la cual se conecta una toma de aire para transportarlo hasta un diafragma.

Las características necesarias de la cámara de aire son:

- Su geometría debe ser lo más circular posible, de esto va a depender principalmente el espacio que exista entre la cámara de aire y el desplazador, buscando que esa distancia sea la mínima para tener así la menor cantidad de espacios muertos.
- De ser posible, es una buena opción que sea transparente, ya que de esta manera se puede observar como gira el desplazador mientras funciona el motor, e identificar así cuando el aire desplazado se encuentra en el foco caliente y cuando en el foco frío.

Un material que cumple con estas características y que además es de fácil adquisición es el acrílico; el mismo que se puede conseguir tanto en tubos como en planchas.

En el mercado, si se puede encontrar tubos de acrílico, sin embargo estos solo los venden bajo pedido y son tubos de 1800 mm de longitud; los 40 mm de longitud necesarios para la construcción de esta cámara de aire no justifican la compra de los tubos mencionados. Es por esta razón que a una plancha de acrílico se puede moldearla sometiéndola a una temperatura controlada. Para el moldeo se puede pedir la colaboración del laboratorio de Recursos Hídricos de la EPN.

Para la toma de aire, se realiza una perforación en la pared de la cámara de aire, es recomendable realizarlo en un taladro vertical y con varias brocas, empezando desde una de diámetro pequeño hasta la más grande dependiendo el diámetro de la manguera que vaya a ser utilizada.

Es importante además que tanto la cara superior como la cara inferior del cilindro de acrílico estén lo más paralelas posibles, una manera de conseguirlo es lijando cada cara en una lija de disco.

#### 4.1.4 TOMA DE AIRE



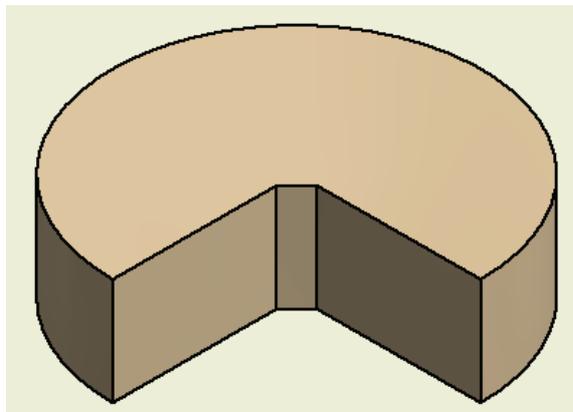
*Figura 4-6 Toma de aire del motor Stirling 1-3.*

Para la toma de aire del motor Stirling se tiene en cuenta:

- El aire se va a transportar desde la pared de la cámara de aire hasta la parte superior del motor.
- El transporte del aire se debe desarrollar evitando que se obstruya el paso del mismo.
- Debido a la forma de la toma de aire, debe ser fácil de doblar o moldear.

La manguera de alta presión es una buena opción, ya que se puede doblar con la garantía de que no se obstruye el paso de aire, para doblarla se puede deformarla mediante calor y dejarla con la geometría indicada en la Figura 4.6

#### 4.1.5 DESPLAZADOR



*Figura 4-7 Desplazador del motor Stirling 1-3.*

Si bien la geometría del desplazador se da de acuerdo al diseño, cabe recalcar ciertas características para la construcción del mismo:

- Las superficies del desplazador han de ser lisas, para de esta manera evitar que existan fricciones al momento de girar.
- El material del cual se elabore el desplazador debe ser resistente a altas temperaturas, aproximadamente a los 200°C.
- El desplazador con el cigüeñal van a girar conjuntamente, por lo que es importante asegurarse que no haya ningún tipo de desplazamiento entre éstos.
- Debido a que el desplazador no es un cilindro completamente sólido, su densidad debe ser pequeña evitando así un desbalanceo muy pronunciado.

Los materiales con los cuales se podría elaborar el desplazador, se indican en la Tabla 4-3

*Tabla 4-3 Densidades de los materiales para el desplazador*

<b>MATERIAL</b>	<b>DENSIDAD g/cm<sup>3</sup></b>
Poliuretano de expansión rápida	0.1
Madera de balsa	0.15
Espuma flex	0.025

Teniendo en cuenta la densidad, se puede apreciar que la espuma flex son los materiales aptos para la construcción del desplazador, sin embargo se debe tener en cuenta que el desplazador va a estar fijo con el cigüeñal, por lo que con ninguno de los dos materiales esta condición va a ser posible.

Entre la madera de balsa y el poliuretano de expansión rápida existe una diferencia significativa de densidades, por lo que se opta por construir el desplazador con el material de baja densidad, sin descartar la posibilidad de la utilización de la madera de balsa en caso de que los resultados no sean satisfactorios.

El poliuretano de expansión rápida se encuentra como espuma en frascos de aerosol, en presentaciones de 250ml, 500ml, 750ml.

En el mercado se pueden encontrar las siguientes marcas.

*Tabla 4-4 Poliuretano de expansión rápida*

NOMBRE	Sika®Boom	Bison ConstruCtion Foam aerosol spray
IMAGEN		
Estabilidad térmica [°C]	-40 +80	-40 +90
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0.02	0.025
Tiempo de secado [h]	5	1.5

Según las especificaciones de cada marca, se puede notar que la marca Sika presenta una menor densidad y un menor punto de estabilidad térmica. Por lo que en base al punto de estabilidad térmica, se recomienda utilizar el producto Bison, pese a que éste tenga mayor densidad, sus especificaciones se encuentran en el ANEXO3.

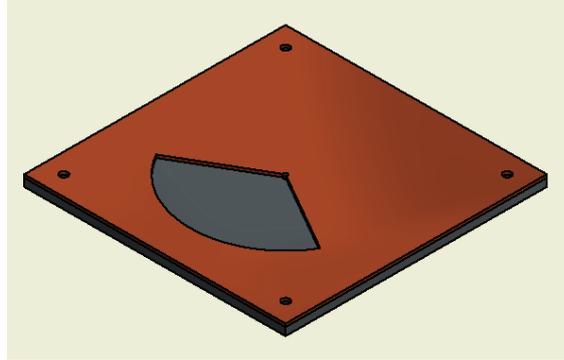
Para inyectar el poliuretano previamente se realiza un molde con la forma del desplazador que se desea tener, un material que se puede utilizar es acrílico, el mismo que se puede pegar con brujita, para evitar que se pegue el poliuretano con la pared del molde es necesario que haya entre ellos silicona.



*Figura 4-8 Molde de acrílico para el desplazador de poliuretano 1-3.*

Es importante tener en cuenta que previamente a que se inyecte el poliuretano en el molde, el cigüeñal ya debe haber sido doblado, de esta manera cuando el desplazador solidifique, el cigüeñal será parte del sólido.

#### 4.1.6 TAPA SUPERIOR



*Figura 4-9 Tapa superior del motor Stirling 1-3.*

La placa superior consta de:

- Placa conductora de calor, que se va a disipar el calor hacia el exterior en la zona del foco frío.
- Lámina de material aislante cuya geometría busca focalizar el calor añadido, aislando la región en la que no es necesario la transferencia de calor.

##### 4.1.6.1 Placa conductora de calor

Para la placa de la tapa superior se toma en cuenta:

- El material de la placa debe ser un material con una conductividad térmica alta, para que de esta manera se pueda disipar el calor de una manera más rápida, haciendo que el diafragma se contraiga en menor tiempo lo que conlleva a que el cigüeñal pueda girar más rápido.
- Por el centro de la placa pasa un eje, el mismo que debe tener facilidad para girar y a la vez el espacio debe ser el mínimo posible para evitar que existan fugas.

Para la selección del material, se hace referencia a la sección 4.1.1.1, en donde se elige el acero como primera opción para la placa conductora.

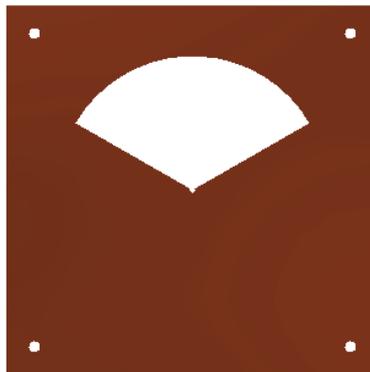
La placa de acero tiene una perforación en el centro, cuyo diámetro debe ser casi el mismo diámetro del cigüeñal, de tal manera que permita que el cigüeñal gire con facilidad pero a la vez que haya la mínima cantidad de fugas; además presenta cuatro perforaciones en las esquinas, mismas que deben ser realizadas conjuntamente con la placa inferior luego de que se le haya cortado la sección interna; de esta manera se tiene guías para el ensamble final asegurando así un poco más que el cigüeñal.

#### 4.1.6.2 Material aislante

- La zona que no se va a mantener aislada de la placa es la región del foco frío, es decir una tercera parte del área que encierra la cámara de aire.

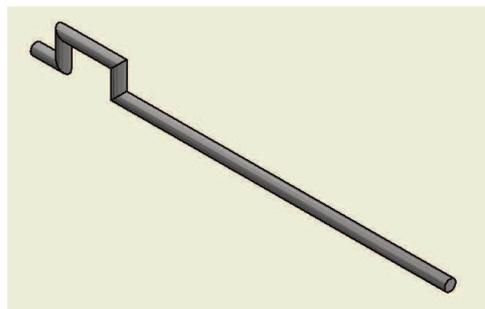
De igual manera que en la sección 4.1.1.2, se elige una placa rígida de asbesto, teniendo en cuenta que la madera si puede ser utilizada ya que la temperatura en la parte superior del motor no superará los 250°C.

La geometría de la placa aislante se muestra en la Figura 4-10



*Figura 4-10 Placa aislante de la tapa superior*

#### 4.1.7 CIGÜEÑAL



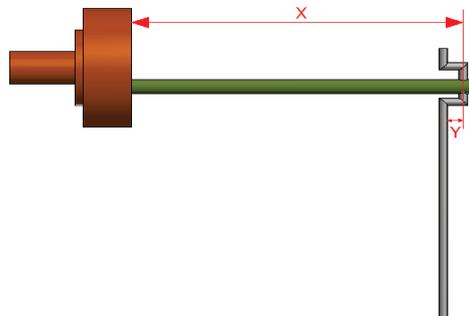
*Figura 4-11 Cigüeñal del motor Stirling 1-3.*

Los aspectos que se tiene en cuenta para la construcción del cigüeñal son:

- Presentar rigidez, pero a la vez debe poderse doblar, para de esta manera poder darle la forma adecuada.
- Su superficie no puede ser rugosa, ya que en ciertos puntos va a tener contacto y el rozamiento que se produzca ha de ser el mínimo posible.

Una buena alternativa para la construcción del cigüeñal, es usar los radios para las llantas de bicicletas, aunque también se puede utilizar electrodos para suelda. Hay que tener en cuenta que es importante saber el diámetro del eje con que se va a hacer el cigüeñal para perforar la guía en la placa superior del motor; además el cigüeñal debe estar listo y ya ubicado en la placa superior antes de que se inyecte el poliuretano en el molde del desplazador.

La forma del cigüeñal no es tan complicada debido a que la relación de giro del cigüeñal con el desplazador es de 1:1; solo necesita un desfase de  $90^\circ$  en el eje, la distancia que se doble depende de la distancia que haya entre el diafragma y el cigüeñal, con la siguiente relación:



*Figura 4-12 Relación biela-cigüeñal*

Como se puede observar en la Figura 4.11, se tiene dos distancias para la configuración del cigüeñal y de la biela: X, Y; las mismas que mantienen una relación entre sí, en donde X va a ser de 15 a 20 veces el valor de Y.

#### **4.1.8 MONTAJE**

Para realizar el ensamble final de los elementos del motor, se hace con el siguiente procedimiento:

- La cámara de aire se pega al asbesto de la base inferior, teniendo en cuenta que la perforación que se encuentra en la base quede en el centro de la cámara de aire, la unión se la puede realizar con silicona para alta temperatura, se recomienda de preferencia la silicona tipo Grey 999.
- La toma de aire se pega al orificio en la pared de la cámara de aire, la parte del diafragma deberá estar ubicado sobre la placa superior del motor.
- La placa superior conjuntamente con el cigüeñal y el desplazador se coloca sobre la cámara de aire, se realiza con la ayuda de los tornillos que atraviesan las guías tanto en la placa inferior como superior. Es importante utilizar un peso o una prensa para que las placas se peguen bien a la cámara de aire para evitar que haya fugas.
- Para colocar el diafragma se debe tener en cuenta que antes debe estar la biela (sorbete) ya unido al diafragma; luego se coloca este conjunto en la salida de la toma de aire.

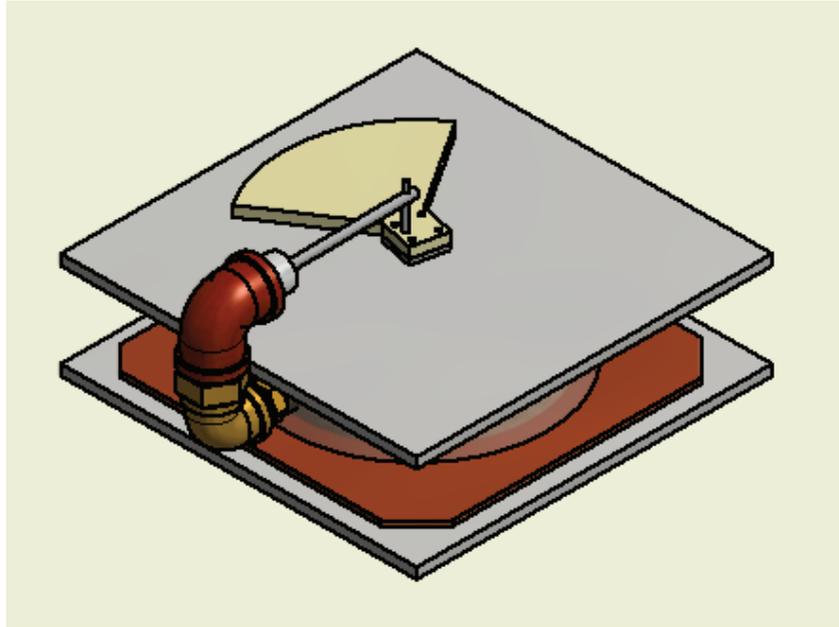
#### **4.1.9 RESULTADOS**

Para hacer funcionar el motor se somete a una fuente de calor a la placa inferior del motor, se da a notar que:

- La fricción que tiene el eje cigüeñal es un gran impedimento para que el desplazador pueda girar fácilmente.
- Pese a que la placa inferior tiene una forma con la cual se busca focalizar el calor, luego de un tiempo corto (aproximadamente 2 minutos), se calienta toda la placa.
- Al calentarse toda la placa inferior, los tornillos que sirven como guías para el montaje también se calientan y por conducción hacen que la placa superior también se caliente.
- A pesar que el asbesto es un material aislante, éste si se calienta con lo cual hace que el regenerador también se caliente y evitando así que se realice la regeneración de la forma esperada.
- Debido a que el desplazador no es muy perpendicular con el cigüeñal ciertas partes de las paredes del desplazador deben ser disminuidas con lo que se tiene más espacios muertos de aire.

- El diafragma si muestra contracción y dilatación dependiendo de la ubicación del desplazador, sin embargo no es suficiente para poder superar las fricciones que presenta el cigüeñal.

## 4.2 OPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN 2 DE 3

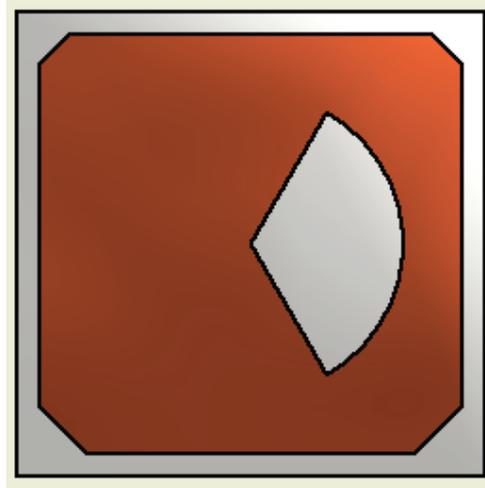


*Figura 4-13 Opción 2-3 para construcción*

La segunda opción de construcción se realiza teniendo los problemas que impiden el funcionamiento de la primera opción de construcción; los aspectos y características que se toman en cuenta para cada parte del motor se siguen manteniendo, sin embargo las mejoras o modificaciones que se aplican en cada conjunto se indican a continuación:

### 4.2.1 BASE DEL MOTOR

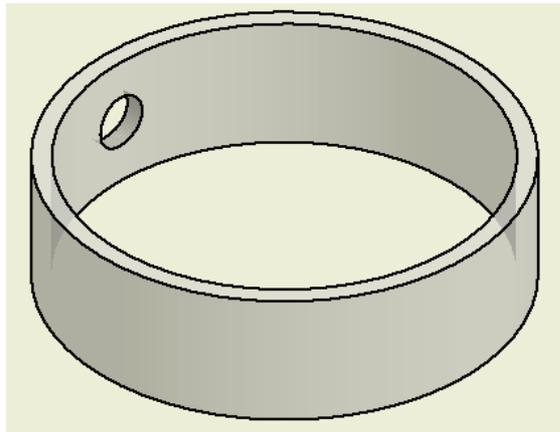
- Los orificios de la placa de acero que se utilizan para guías de los tornillos para el montaje del motor ya no se realizan.
- La guía que se ubica en el centro de la placa de acero, como guía y asiento del eje del cigüeñal también ya no es necesaria, ya que el cigüeñal ya no va a estar en contacto con la placa inferior



*Figura 4-14 Base del motor Stirling 2-3*

#### **4.2.2 CÁMARA DE AIRE**

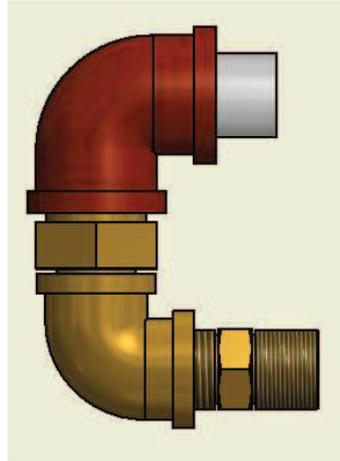
- En el orificio de la pared de la cámara de aire, se saca rosca para que se pueda acoplar de esta manera la toma de aire.



*Figura 4-15 Cámara de aire del motor Stirling 2-3*

#### **4.2.3 TOMA DE AIRE**

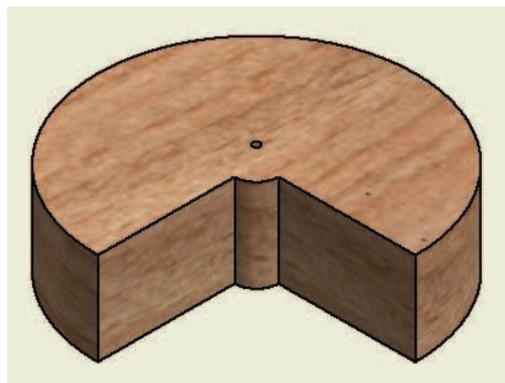
- Debido a la dificultad para doblar una manguera de manera permanente, se utiliza un juego de accesorios de tubería de cobre, estos son: neplo de 1/8 pulg, codo 90° 1/8 pulg. neplo reductor de 1/2 pul. a 1/4 pulg. y un codo 90° de PVC de 1/2 pulg.
- Para obtener una mejor hermeticidad entre las uniones de cada accesorio se utiliza teflón.



*Figura 4-16 Toma de aire del motor Stirling 2-3*

#### **4.2.4 DESPLAZADOR**

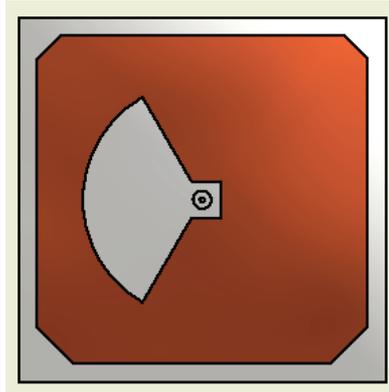
- El material a utilizar para el desplazador es de madera de balsa.
- Debido a que la madera de balsa solamente se tiene disponible en láminas de 2mm de espesor hasta 9mm, se cortan las láminas con la geometría indicada y se pegan una sobre otra; se ponen láminas de diferentes espesores dependiendo de la altura final del desplazador que se desee tener, una buena opción para unir cada lámina es el pegamento UHU.



*Figura 4-17 Desplazador del motor Stirling 2-3*

#### **4.2.5 TAPA SUPERIOR**

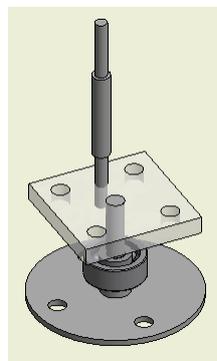
- En la placa superior se fija un rodamiento de bolas y con sello de caucho para de esta manera evitar que existan fugas.
- El asiento del rodamiento que se maquina en la placa superior, se la puede realizar en un torno.



*Figura 4-18 Tapa superior del motor Stirling 2-3.*

#### **4.2.6 CIGÜEÑAL**

- El cigüeñal consta de tres partes para una fácil construcción, montaje y desmontaje del mismo.
- El eje que entra en apriete con el rodamiento, es maquinado en el torno, dejando una sección con un diámetro considerable para que de esta manera se pueda unir con facilidad al desplazador. El eje se puede unir con el acrílico con una mezcla de epóxica.
- El contrapeso del cigüeñal se lo puede construir con acrílico, éste se una con facilidad al eje que está en apriete con el rodamiento y al codo (eje que se conecta con la biela del sistema).
- El codo del cigüeñal se monta en el acrílico, una opción es que sea el radio de la llanta de bicicleta, la punta que tiene rosca puede ajustarse fácilmente con el acrílico.
- En el acrílico además se acopla un contra peso debido al espacio vacío del desplazador, dicho contrapeso puede ser realizado de acrílico.



*Figura 4-19 Cigüeñal del motor Stirling 2-3.*

#### **4.2.7 MONTAJE**

Para el montaje, los pasos recomendados a realizar son:

- Asentar el rodamiento en la placa superior del motor.
- La toma de aire se ajusta al orificio roscado en la pared de la cámara de aire.
- Acoplar solamente la base del cigüeñal con el desplazador, se puede unir con pegamento UHU, y además la base del cigüeñal puede tener perforaciones para la colocación de tornillos pequeños impidiendo así un desplazamiento entre el cigüeñal y el desplazador.
- El conjunto desplazador- eje del cigüeñal se inserta en el rodamiento de la placa superior.
- La cámara de aire se pega al asbesto de la base superior, la unión se la puede realizar con silicona para alta temperatura, se recomienda de preferencia la silicona Grey 999. Se debe tener en cuenta que la cámara de aire debe estar centrada con el desplazador, de tal manera que pueda girar sin que hayan rozamientos.
- Armar el cigüeñal; se une el acrílico a la base del cigüeñal conjuntamente con el contrapeso y el eje de bicicleta al acrílico.
- Colocar la placa base en la parte inferior de la cámara de aire asegurándose que el desplazador pueda girar sin que haya rozamientos, principalmente con el regenerador; se puede pegar con silicona de alta temperatura.
- Para colocar el diafragma se debe tener en cuenta que antes debe estar la biela (sorbete) ya unido al diafragma; luego se coloca este conjunto en la salida de la toma de aire.

#### **4.2.8 RESULTADOS**

El funcionamiento del motor con esta opción de construcción presenta los siguientes inconvenientes:

- A pesar de que se puso un contrapeso para evitar un desbalanceo en el giro del desplazador, no se logró completamente.

- El cambio de material en el desplazador es una buena alternativa, debido a que el espacio entre la cámara de aire y el desplazador es menor, por lo cual los espacios muertos de aire también son menores.
- Con la configuración que se realizó en la construcción de la toma de aire, el diafragma se mantiene fijo.
- La hermeticidad del interior de la cámara de aire y de la toma de aire es buena, pero la cantidad de aire que se encuentra en el interior no es la necesaria por lo que es necesario que haya una válvula para que se pueda regular dicha cantidad.
- El principal problema de esta opción de construcción radica en cómo focalizar el calor en una sola región (foco caliente), problema que se tiene también en la opción de construcción 1 de 3.

### **4.3 OPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN 3 DE 3**

Las modificaciones que mejoran el desempeño de cada elemento del motor, con respecto a la anterior opción de construcción son:

- Para poder focalizar el calor en una zona, se construye la base del motor con un material no conductor del calor, con una resistencia eléctrica en la región del foco caliente.
- A la toma de aire, se instala una válvula, para de esta manera poder controlar la cantidad de aire necesaria dentro de la cámara de aire.
- Para evitar el contra peso en el cigüeñal, se balancea el peso del desplazador con espacios vacíos dentro del mismo.

Con las nuevas modificaciones, se construye la nueva opción, misma que servirá como guía de construcción para los estudiantes que toman la materia de Termodinámica II

## **GUÍA DE CONSTRUCCIÓN**

El motor Stirling con desplazador rotativo está compuesto por un conjunto de partes, las mismas que se van ensamblando una vez que estas estén construidas,

dichas partes se indican a continuación, con la lista de materiales de cada una de ellas.

### 4.3.1 CÁLCULOS PREVIOS

Dependiendo de la velocidad angular que se desee conseguir, se tiene diferentes valores tabulados de los parámetros necesarios para empezar con el dimensionamiento del motor Stirling de desplazador rotativo, los valores con los cuales se espera un correcto funcionamiento se encuentran en la Tabla 4-5.

*Tabla 4-5 Parámetros para el dimensionamiento del motor Stirling*

Velocidad angular	Diámetro del pistón	Carrera del Pistón	Volumen de aire desplazado	Área de transferencia de calor	Diámetro del desplazador
$\omega$	$D_P$	$L_P$	$V_{AD}$	$A_{TC}$	$D_D$
<i>rpm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>cm</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>mm</i>
20	20	10	150	0.00373	138
	25	15	175	0.00455	152
	30	20	200	0.00551	168
25	20	10	150	0.00426	147
	25	15	175	0.00517	162
	30	20	200	0.00625	178
30	20	10	150	0.0047	155
	25	15	175	0.00573	171
	30	20	200	0.00692	188

El estudiante puede escoger un valor de las rpm esperadas, seguido de una de las tres opciones de dimensionamiento para la misma; luego puede realizar los cálculos complementarios del dimensionamiento, para lo cual se utiliza las siguientes expresiones:

#### 4.3.1.1 Altura del desplazador

$$h_D = \frac{V_{AD}}{A_{TC}}$$

#### 4.3.1.2 Altura de la cámara de aire

$$h_a = h_s + h_i + e_d$$

#### 4.3.1.3 Diámetro de la cámara de aire

$$d = D_D + 2 hd$$

#### 4.3.1.4 Lados de la placa superior

$$l_p = d + 2 * e + 2 * a$$

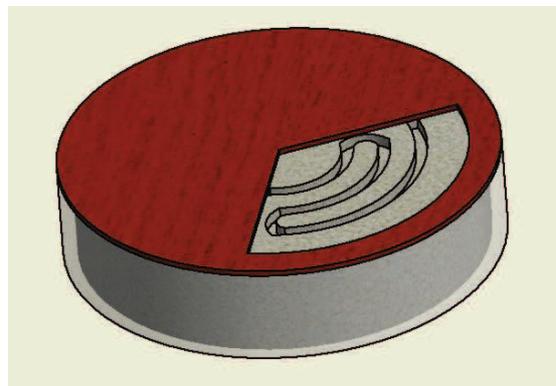
#### 4.3.1.5 Longitud del cigüeñal

$$l_c = hs + e_{aisl} + e_p + d_{p-c} + e_{cc} + d_{b-c}$$

Cada expresión se encuentra detallada en el Capítulo 3.

A continuación, se indica las características que se toman en cuenta y la manera de construir cada parte del motor Stirling de desplazador rotativo, considerando que primero se construye cada parte en forma independiente para luego realizar un ensamble total.

#### 4.3.2 BASE DEL MOTOR



*Figura 4-20 Base del motor Stirling*

Para el motor Stirling se necesita una base que tenga la fuente de calor dispuesta en un solo lugar, por lo que se va a construir un reverbero pequeño, en el cual solo una parte de éste contenga una resistencia eléctrica.

A la resistencia eléctrica se le suministra la energía eléctrica a través de un dimmer para poder controlar el voltaje y de esta manera la temperatura a la cual se desea que se mantenga constante la resistencia eléctrica en el foco caliente.

Para posicionar la resistencia eléctrica se puede utilizar el molde de un reverbero, debido a que realizar el molde con las guías para la resistencia de un material refractario resulta más complicado.

Del molde del reverbero solamente se utiliza la tercera parte para fijar la resistencia eléctrica, por lo que las 2 terceras partes restantes se rellenan.

Para definir el material de la base, se debe considerar las siguientes características:

- Baja conductividad térmica, para poder tener focalizado el calor.
- Fácil de moldear, se va a construir un reverbero pequeño en la base del motor.
- Resistencia a la temperatura, en la región del foco caliente se va a tener altas temperaturas.
- Rigidez, es la base del motor, por lo que se debe mantener firme.

*Tabla 4-6 Selección de materiales para la base del motor<sup>27</sup>*

<b>MATERIAL</b>	<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/(m*K)</b>
YESO ODONTOLÓGICO	0.81
HORMIGÓN	1.4
LADRILLO	0.66
CERÁMICA	0.7

El material de baja conductividad según la Tabla 4-6 es el ladrillo, sin embargo para la construcción se necesita realizar un molde, y además un horno de ladrillos para poder secar y tener el molde sólido, lo cual demanda de mucho más tiempo y la facilidad de poder tener acceso al horno. De igual manera se presenta el mismo inconveniente para la obtención de un molde sólido de cerámica.

El yeso odontológico es una buena alternativa, su conductividad térmica no es muy alta y además no necesita de un horno en su proceso de solidificación.

<sup>27</sup><http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

Con la finalidad de conseguir una base del motor rígida, se realiza una mezcla del yeso odontológico con ciertos materiales que contribuyen en la del molde.

Los materiales que se utiliza para la base, se indican a la Tabla 4-7

*Tabla 4-7 Materiales para la base del motor Stirling.*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Cilindro hueco de acrílico	Ø 20 mm >Ø cámara de aire
Arena sílice	1 Kg
Ladrillo refractario	½ Kg
Yeso volcán	2 libras
Yeso odontológico	1 libra
Alúmina	100 gramos
Fibra de vidrio	50 cm
Agua	--
2 Resistencias eléctrica	25 ohmios
Dimmer	220 v
Asbesto	200mm*200mm
Refractario para reverbero	1 unidad

La base del motor está elaborada de una mezcla de yesos con arena, para dicha mezcla se debe tener los componentes en ciertas proporciones, las cuales se van a dar en base a 100 gramos de arena sílice, mismas que se indican en la Tabla 4-8.

*Tabla 4-8 Proporciones de componentes de la base del motor Stirling.*

Componente	Proporción
Arena sílice	100 gramos
Ladrillo refractario	50 gramos
Yeso volcán	50 gramos
Yeso odontológico	25 gramos
Alúmina	15 gramos
Pedazos de lana de vidrio	10 gramos
Agua	70 gramos

La cantidad que se ponga dependerá del volumen que se tenga del cilindro hueco de acrílico, en su defecto del recipiente en el cual se vaya a contener la mezcla.

Con las proporciones establecidas, sin poner el agua se mezcla en un recipiente por al menos cinco minutos, el mezclado es rápido si se desea tener mayor resistencia mecánica en el sólido final.

Teniendo una mezcla homogénea, se le añade agua en pocas cantidades, y paulatinamente mezclándole hasta que tener una mezcla pastosa.

Luego se añade los pedazos de fibra de vidrio mientras se sigue mezclando.

Colocar el refractario para reverbero en el molde, los canales para la resistencia eléctrica deben estar sobre la superficie que se apoye dicho molde.

Teniendo la mezcla lista, ésta se vacía en el molde.

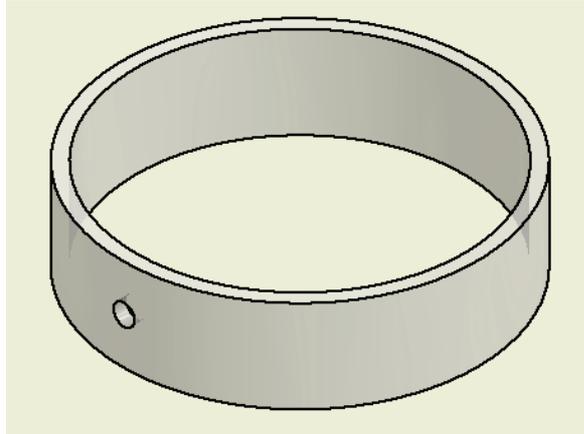
Esperar al menos diez minutos y dar la vuelta con mucho cuidado el molde, para rellenar de mezcla los canales del refractario del reverbero que no van a formar parte del foco caliente del motor.

Aunque aparentemente se solidifica rápidamente, la mezcla tarda al menos cuatro días en secarse completamente, que es el tiempo de fraguado que los yesos odontológicos recomiendan para espesores grandes.

Una vez seca la base del motor, entonces se coloca la resistencia en el refractario del reverbero que quedó libre.

Por último, se coloca el asbesto sobre la base, ya que es en éste en donde se va asentar el acrílico o cámara de aire. Es importante tener en cuenta que los terminales de la resistencia eléctrica que se conectan al dimmer estén por debajo del asbesto evitando así cualquier contacto de la resistencia con la cámara de aire.

### 4.3.3 CÁMARA DE AIRE



*Figura 4-21 Cámara de aire del motor Stirling*

Los materiales necesarios para la cámara de aire son:

*Tabla 4-9 Materiales para la cámara de aire del motor Stirling.*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Cilindro hueco de acrílico	Ø 14cm-16 cm

En caso de que no se pueda conseguir un tubo de acrílico, se puede hacer deformar acrílico, para lo cual será necesario una plancha de acrílico, la cual mediante un calentamiento apropiado y un molde circular se puede obtener el cilindro, en la EPN en el laboratorio de Recursos Hídricos realizan este tipo de trabajo.

Con la altura del cilindro establecida, se debe cortar el cilindro de acrílico, procurando que la cara superior sea lo más paralela posible con la cara inferior.

De un lado del cilindro se debe hacer una perforación, para tener la toma de aire, para esto se procede a taladrar, empezando con brocas pequeñas hasta llegar a una de 3/8 pulg. con el neplo de cobre se puede hacer rosca en el orificio del acrílico.

### 4.3.4 TOMA DE AIRE

Para la toma de aire, los materiales a utilizar se indican a continuación:

*Tabla 4-10 Materiales para la toma de aire del motor Stirling.*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
1 Neplo de cobre	Cónico exag. Ø 3/8 pulg.
1 neplo corrido	Ø 3/8 pulg. - Ø 1/2 pulg.
Codo PVC 90°	Ø ½ pulg.
Válvula	Ø ½ pulg.

Con los materiales mostrados en la Tabla 4-10 se realiza un ensamble, cuya configuración se indica en la Figura 4-22

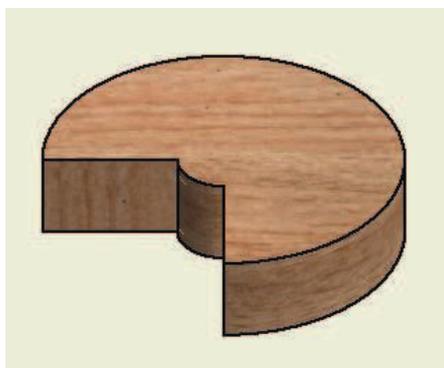


*Figura 4-22 Toma de aire del motor Stirling*

Para evitar que existan fugas de aire, estos elementos deben ser ensamblados con teflón en todas las roscas.

Por facilidad, antes de colocar el codo de PVC a la toma de aire, es recomendable que el diafragma y el pistón (sorbeta) ya se encuentren acoplados entre sí.

#### **4.3.5 DESPLAZADOR**



*Figura 4-23 Desplazador*

Los materiales a utilizar se indican en la Tabla 4-11.

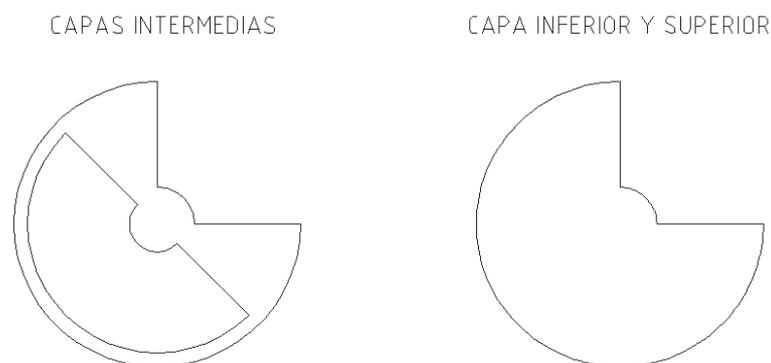
*Tabla 4-11 Materiales para el desplazador del motor Stirling.*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
1 Plancha de madera de balsa	9 mm* 300 mm * 600 mm
1 Plancha de madera de balsa	6 mm* 300 mm * 600 mm

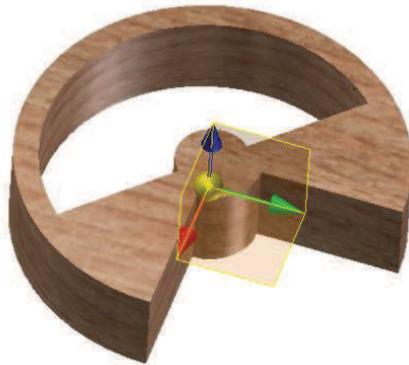
La forma del desplazador es un cilindro sólido, del cual un cuarto de éste es hueco. Dependiendo del diámetro y la altura de la cámara de aire, se da así las dimensiones del desplazador procurando tener una holgura mínima entre la pared interior de la cámara de aire y la pared del perímetro del desplazador, y además entre la cara inferior y cara superior del desplazador con la base y la tapa superior del motor Stirling respectivamente. Se busca una holgura mínima ya que entre menor sea esta, menor serán los espacios muertos que existan dentro de la cámara de aire.

Idealmente el desplazador debería ser construido de un solo sólido, pero como el material escogido para la elaboración del mismo es madera de balsa y ésta no se puede conseguir en tales dimensiones, se hace moldes en las planchas de la madera de balsa y luego se las pega, formando así un solo sólido; la manera más práctica de realizar los moldes es dibujando las geometrías en un formato CAD y con esto hacer cortar con láser.

Se debe tener en cuenta además que debido a que un cuarto del desplazador es hueco, entonces el centro de gravedad del mismo no va a estar en el centro lo que conlleva a que éste se encuentre desbalanceado; una forma de contrarrestar este problema es dejando espacios vacíos dentro del desplazador, por lo que las geometrías a dibujar serían las siguientes:



*Figura 4-24 Geometrías de las partes del desplazador*



*Figura 4-25 Centro de gravedad del desplazador del motor Stirling*

#### **4.3.6 TAPA SUPERIOR**

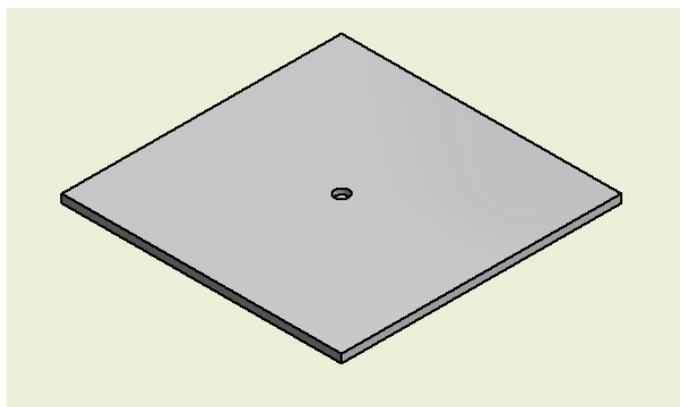
Los materiales a emplear para la tapa superior son:

*Tabla 4-12 Materiales para la tapa superior del motor Stirling.*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Placa de aluminio o acero	6mm*200mm*200mm
Tabla triplex	2mm*200mm*200mm

La tapa superior debe tener un alojamiento para el rodamiento, para lo cual es necesario tornearse hasta que éste entre completamente en la placa, la hoja de procesos para el torno se encuentra en el ANEXO 5

La placa no va en contacto directo con la cámara de aire, por lo cual se pone una lámina de triplex, la misma que va recubrir toda la cara de la placa excepto la parte del foco frío la misma que tiene un ángulo de abertura de 120°.



*Figura 4-26 Placa superior aislada del motor Stirling*

En el caso que se desee aumentar el área de transferencia de calor el foco frío de la placa superior, se puede hacer ranuras en dicho espacio.

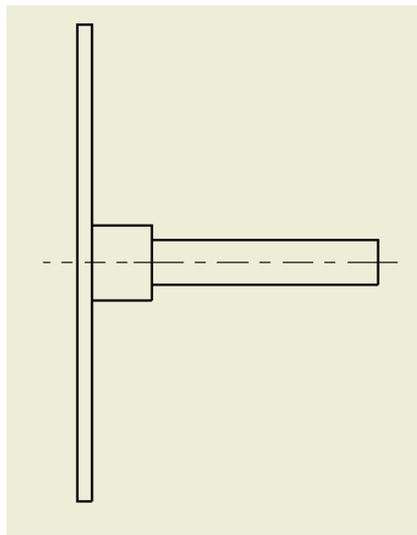
#### 4.3.7 CIGÜEÑAL

Para el cigüeñal, los materiales que se utiliza se indican en la siguiente tabla:

*Tabla 4-13 Materiales para el pistón del motor Stirling.*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Eje de acero	L>18mm, Ø >20mm
Rodamiento	R2-2RS
Acrílico	3mm*3mm*3mm
Radio de bicicleta	1 u

El eje va a ser maquinado en el torno, su geometría se muestra en la Figura 4-27



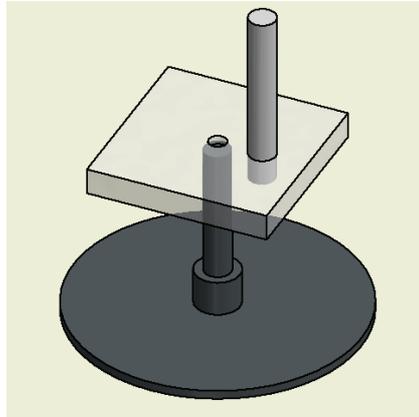
*Figura 4-27 Eje torneado del motor Stirling*

Como se puede observar, el eje tiene una placa de mayor diámetro en la base, la siguiente sección es el espacio entre el rodamiento y la base antes mencionada.

La hoja de procesos para maquinar el eje se encuentra en el ANEXO4.

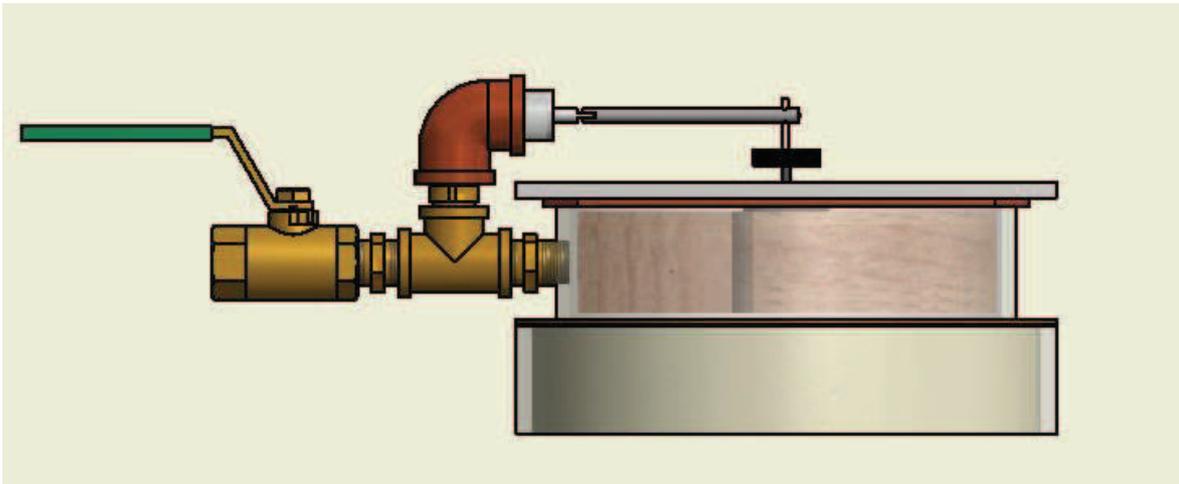
El codo del cigüeñal es de acrílico, en este se deben taladrar dos alojamientos, en el uno se ubica al eje torneado y en el otro el radio de bicicleta, el espacio entre los dos agujeros debe ser entre 1/15 y 1/20 veces la distancia de la biela.

El radio de bicicleta tiene un extremo roscado, y es esta parte la cual se va a conectar con el acrílico, por lo que se corta de unos 20mm aproximadamente.



*Figura 4-28 Cigüeñal del motor Stirling*

#### 4.3.8 ENSAMBLE FINAL



*Figura 4-29 Motor Stirling ensamble final*

El procedimiento recomendado para unir los componentes del motor sigue los siguientes pasos:

- Asentar el rodamiento en la placa superior del motor, y luego adherir la capa aislante.
- Ajustar la toma de aire con el orificio roscado en la pared de la cámara de aire.

- Acoplar solamente la base del cigüeñal con el desplazador, (se puede unir con pegamento UHU), y además la base del cigüeñal puede tener perforaciones para la colocación de tornillos pequeños impidiendo así un desplazamiento entre el cigüeñal y el desplazador.
- Insertar el conjunto desplazador- eje del cigüeñal en el rodamiento de la placa superior.
- Sobreponer la cámara de aire en la base del motor y señalar sobre el asbesto la posición correcta en la cual las paredes de la cámara de aire no estén en contacto con el regenerador, ya que debido a las altas temperaturas que puede llegar a tener el regenerador podría dañarle al acrílico; o también la base de la cámara de aire podría estar sobre el regenerador con lo que dicha base (acrílico) no se va a asentar completamente sobre la base del motor Stirling (asbesto).
- Completar el cigüeñal; el acrílico se une a la base del cigüeñal y el eje de bicicleta al acrílico, teniendo en cuenta que cuando el espacio vacío del desplazador debe encontrarse a  $90^\circ$  de la posición de la manivela.
- Pegar la cámara de aire en el asbesto de la base superior, la unión se la puede realizar con silicona para alta temperatura, se recomienda de preferencia la silicona Grey 999. Se debe tener en cuenta que la cámara de aire debe estar centrada con el desplazador, de tal manera que pueda girar sin que haya rozamientos.
- Todo el conjunto que ya se ha armado se pega sobre la base del motor; se recomienda pegar con silicona de alta temperatura.
- Para colocar el diafragma se debe tener en cuenta que antes debe estar la biela (sorbete) ya unido al diafragma; luego se coloca este conjunto en la salida de la toma de aire.

Es importante tener en cuenta que en las operaciones en que se utiliza pegamento, o se utiliza la silicona de alta temperatura es pertinente la utilización de prensas manuales, o de contrapesos para que de esta manera se tenga una mejor adherencia.



#### 4.5 COSTOS

A continuación se detalla los costos de los materiales necesarios para la construcción del motor Stirling con desplazador rotativo.

*Tabla 4-15 Precio de los materiales necesarios para el motor Stirling de desplazador rotativo*

Material	Dimensión	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Acrílico	3*10*10 mm	1	2	2
Codo PVC 90°	Ø ½ pulg.	1,2	1	1,2
Cilindro hueco acrílico	Ø 160, h=40, e= 6 mm	1	15	15
Dimmer	220 v	8	1	8
Eje de acero	L = 40 mm, Ø 1 1/2 pulg	3	1	3
Neplo corrido	Ø 3/8 pulg. - Ø 1/2 pulg.	3,5	1	3,5
Neplo de cobre	Cónico exag. Ø 3/8 pulg.	1,8	1	1,8
Pega UHU		1	3,5	3,5
Placa de aluminio o acero	6*200*200 mm	10	1	10
Plancha de madera de balsa	9 * 300* 600 mm	2,96	1	2,96
Plancha de madera de balsa	6 * 300 * 600 mm	3,15	1	3,15
Radio de bicicleta		1	0,4	0,4
Refractario para reverbero	1 unidad	2	1	2
Resistencia eléctrica	20 ohmios	2,5	1	2
Rodamiento	R2-2RS	3,5	1	3,5
Silicona de alta temperatura	grey	1	3,5	3,5
Tabla triplex	2*200*200mm	1,5	1	1,5
Teflón		1	0,5	0,5
Válvula de bola	Ø ½ pulg.	6	1	6
Yeso odontológico	1 libra	1	1	1
Yeso volcán	2 libras	2	0,25	0,5
				<b>75,01</b>

## 4.6 RESULTADOS

- Luego de las pruebas realizadas, se comprueba que es factible el funcionamiento de un motor bajo el ciclo Stirling sustituyendo el movimiento axial del desplazador con un movimiento rotacional del mismo.
- La velocidad del desplazador es constante, lo cual tiene relación con las gráficas obtenidas mediante el análisis matemático que presenta un ciclo redondeado y sin la presencia de picos de presión.
- La velocidad angular del desplazador es igual a 20 rpm, teniendo así un resultado menor al objetivo de funcionamiento establecido que es de 35 rpm.
- El diafragma presenta una notable dilatación y contracción, lo cual le permite mediante una alineación correcta del cigüeñal generar la fuerza e inercia suficiente para que el motor permanezca en su giro normal.
- A medida que el voltaje suministrado a la resistencia eléctrica aumenta o disminuye con la ayuda del regulador de voltaje adaptado, se espera también que la rapidez de giro del desplazador varíe, en vista de que el calor aportado al ciclo cambia y consecuentemente su trabajo, el mismo que se ve reflejado en la velocidad del motor.
- La válvula instalada en la toma de aire del motor permite regular la presión media de funcionamiento del mismo, porque hace posible ingresar la cantidad adecuada de aire a la cámara.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES**

- El principal objetivo del proyecto de titulación es cumplido. Se diseña y se construye un motor Stirling de desplazador rotativo, obteniendo como resultado el funcionamiento del mismo y permitiendo así elaborar una guía de construcción para los estudiantes de Termodinámica.
- Existe una gran variedad de materiales con los cuales se puede construir el motor Stirling, obteniendo así los mejores resultados en lo referente a la calidad de propiedades aislantes o de transferencia de calor, sin embargo es muy importante considerar la fácil adquisición dentro del mercado comercial del país y el costo que representa cada uno de estos. Con esto se reduce a las opciones más accesibles para que sea factible la construcción por parte de un estudiante.
- Una manera de conseguir que la región del foco caliente esté focalizada dentro del motor Stirling es la utilización de una resistencia eléctrica, misma que va asentada en la base de un reverbero la cual está rodeada de yeso. De esta manera la temperatura máxima se encuentra en una zona determinada, permitiendo así tener una diferencia de temperaturas adecuada entre el foco caliente y el foco frío para el adecuado funcionamiento del motor Stirling de desplazador rotativo.
- Una desventaja de focalizar el calor mediante la resistencia eléctrica, es que se disminuye notablemente el área de transferencia de calor, lo que ocasiona una disminución en la tasa de calor que ingresa en el motor y por ende el trabajo útil del mismo. Para compensar esta disminución de trabajo, es necesario incrementar el voltaje en la resistencia y por ende se incrementa el calor que ingresa al mismo, disminuyendo así la eficiencia del motor.
- Luego de que se realiza el ensamble del motor Stirling dentro de la cámara de aire queda una incierta masa de aire, dicha cantidad puede ser o no la

necesaria para el funcionamiento adecuado del motor Stirling. Por esta razón, se utiliza una válvula que está conectada al sistema de la toma de aire, la cual permite la entrada o salida del fluido de trabajo, permitiendo al motor la versatilidad de ocupar la masa de aire necesaria para el ciclo y alcanzar una presión media adecuada de funcionamiento.

- Las dimensiones del pistón o diafragma afectan de manera directa al dimensionamiento de la fuente de calor, ya que esta es la responsable de transferir el calor necesario para la expansión a temperatura constante del aire presente en el pistón.
- La disminución de fugas y de las fuerzas de rozamiento son factores muy importantes que intervienen directamente en el funcionamiento del motor Stirling. Este efecto se refleja en la diferencia entre los resultados obtenidos (20 rpm) y esperados (35 rpm) para la velocidad de giro del desplazador en el motor.
- Mediante el análisis matemático se predice de una manera acertada el funcionamiento idealizado del motor, dejando a un lado los efectos de fugas y rozamientos, a los cuales se les atribuye el sesgo entre lo ideal del modelo matemático y lo obtenido en el motor construido.
- En fines prácticos es complejo obtener condiciones de transferencia de calor manteniendo una propiedad constante. Dichas suposiciones solamente sirven para reflejar el análisis idealizado del funcionamiento de un motor bajo un ciclo termodinámico. En el caso de este proyecto de titulación no se logra obtener condiciones de temperatura y de volumen constante, sin embargo el análisis y el diseño del motor se realiza bajo estas suposiciones.
- El regulador de voltaje o dimmer permite variar la cantidad de calor transferido de la fuente a temperatura constante y de esta manera incrementar la velocidad de giro del motor sin variar parámetros fundamentales de funcionamiento.

- La distribución de las regiones dentro del motor juega un papel muy importante en lo que concierne al área de transferencia de calor en sus focos a temperatura constante y en el regenerador. Como se puede observar en la Figura 1-28 y Figura 1-29, existe un creciente trabajo dentro del motor al aumentar el ángulo de las regiones a temperatura constante y disminuyendo la región de regeneración. Sin embargo la eficiencia disminuye luego de superar los  $140^\circ$  de apertura, lo cual sucede en vista de que se aumenta el área de transferencia de calor de los focos, pero se disminuye la eficiencia del regenerador.

## RECOMENDACIONES

- Para la construcción del motor Stirling se recomienda seguir paso a paso lo establecido en la guía descrita en el Capítulo 4, siendo esta tomada en base a la opción de construcción más factible obtenida al final del proyecto de titulación.
- En la construcción del motor Stirling se utiliza un rodamiento que se asienta en la placa superior para permitir el giro del cigüeñal, sin embargo se puede utilizar un bocín en la placa superior teniendo en cuenta además que para este caso el cigüeñal debe asentarse en la placa inferior.
- El rodamiento que se utiliza en el motor Stirling de preferencia debe tener sellos de goma, ya que con el rodamiento de sellometálico se tiene una mayor cantidad de fugas.
- Para la construcción del desplazador se recomienda la utilización de madera de balsa, aunque según la Tabla 4-3 el poliuretano de expansión rápida presenta una densidad más baja. Agregando que éste requiere de un molde para poder inyectarlo, la superficie presenta mucha rugosidad y porosidad haciendo que el volumen muerto aumente y no presenta una rigidez adecuada para su montaje.
- Las fugas dentro de la cámara de aire deben ser las mínimas o nulas, por lo que se recomienda que para unir la cámara con la base y con la parte superior del motor se utilice silicona de alta temperatura tipo Grey, ya que en base a pruebas previas se comprobó que éste tipo de silicona se adhiere mejor cuando se somete a su temperatura límite de funcionamiento.
- La resistencia eléctrica, se recomienda que esté asentada en un material que resista altas temperaturas, siendo la mejor opción la base de un reverbero, ya que evita la construcción de guías en un material cerámico para el montaje y ajuste de dicha resistencia.

- Se recomienda utilizar un diafragma en lugar de un pistón, en vista de que es complicado llegar a un punto de fricción y fugas mínimas en el pistón debido al contacto entre sus elementos móviles. Para el diafragma es recomendable utilizar látex, por su elevada resistencia y flexibilidad que permite la expansión y compresión libre del mismo.
- Para el regenerador es muy importante incrementar al máximo su área de transferencia de calor, en vista de que éste debe cumplir una disminución y aumento de la temperatura entre sus valores máximos y mínimos a volumen constante.
- A la válvula que se encuentra en la toma de aire, se recomienda abrirla cuando el cigüeñal se encuentre aproximadamente a  $5^\circ$  del punto muerto superior para garantizar la cantidad de aire adecuada en el llenado de la cámara.
- Es recomendable tener claro los parámetros de voltaje a los cuales es seguro que funcione la resistencia eléctrica y que su temperatura y el calor generado en ella no cause daños al desplazador del motor o a su cámara de acrílico.
- Se recomienda para un futuro proyecto de titulación considerar la opción de cambiar la geometría del desplazador, teniendo su espacio hueco repartido en dos secciones circulares opuestas. Con esto se busca duplicar dos parámetros importantes como son: la masa de aire y el área de transferencia de calor; permitiendo de esta manera incrementar notablemente el trabajo obtenido por el motor. También esta geometría permite mejorar el balanceo y la inercia del desplazador. Dicho cambio también compromete a considerar que por cada vuelta del cigüeñal se obtiene dos ciclos de potencia, generando la necesidad de acoplar un mecanismo reductor de 2:1 en su cigüeñal.

## BIBLIOGRAFÍA

- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION; Stirling Engine Design Manual; USA; January 1983.
- INCROPERA F., DeWITT D.; Fundamentos de Transferencia de Calor; Cuarta Edición; Precentice Hall; México 1999.
- CENGEL Y., Termodinámica; Sexta Edición; McGraw-Hill; México D.F.; 2007.
- CENGEL Y., SIMBALA J.; Mecánica de Fluidos Fundamentos y aplicaciones; McGraw-Hill; México D.F.; 2007.
- STREETER V; Mecánica de los Fluidos; Cuarta Edición; McGraw-Hill; México D.F.; 1972.
- SERWAY R; JEWETT J.; Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna; Séptima edición; 2009.
- SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES; National Maritime Research Institute; Paper.
- BANCHA KONGTRAGOOL, SOMCHAI WONGWISES; A Review Of Solar-Powered Stirling Engines And Low Temperature Differential Stirling Engines; Paper.
- BAHAMONDE R.; Apuntes de Transferencia de Calor II; EPN 2012-A.
- <http://www.lyrsa.es/index.php?ids=598>
- <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>
- <http://www.goodfellow.com/S/Elastomero-de-Silicona.html>
- <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-05-06-COND.pdf>
- [https://www.youtube.com/watch?v=V\\_K8mpe9tjY](https://www.youtube.com/watch?v=V_K8mpe9tjY)
- [https://www.youtube.com/watch?v=ZjS4-YYL6lo&list=PL5GnlzXbSNxPdcdZotRTYgw6x\\_zZ0UuX7](https://www.youtube.com/watch?v=ZjS4-YYL6lo&list=PL5GnlzXbSNxPdcdZotRTYgw6x_zZ0UuX7)

- ENRÍQUEZ LUIS, GUADALUPE JORGE; Diseño y Construcción de un motor Stirling solar para el Laboratorio de Termodinámica, EPN 2011.
- AGÜERO V.; Diseño y construcción de un motor Stirling para la generación de energía eléctrica; Universidad de Ingeniería; Lima – Perú; 2006.

## **ANEXOS**

## ANEXO1 TABLAS DE RESULTADOS TERMODINÁMICOS DE CADA TIPO DE MOTOR STIRLING ANALIZADO EN LA SECCIÓN 1.5.

### 1. MOTOR TIPO BETA.

Tabla A 1.1 Datos para el motor Stirling tipo beta.

DATOS DEL MOTOR TIPO BETA			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_p$	25	mm
Carrera del pistón	$L_p$	28	mm
Largo del desplazador	$l_D$	120	mm
Ancho del desplazador	$a_D$	80	mm
Carrera del desplazador	$L_D$	32	mm
Volumen muerto caliente	$V_{mH}$	120	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mL}$	120	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	96	cm <sup>3</sup>
Temperatura caliente	$T_H$	150	°C
Temperatura frío	$T_C$	28	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
Cv del gas	$C_v$	0.72	KJ/(Kg * K)
Masa	$M$	0.000456715	Kg
Distancia entre el desplazador y el pistón.	$d_{PD}$	30	mm

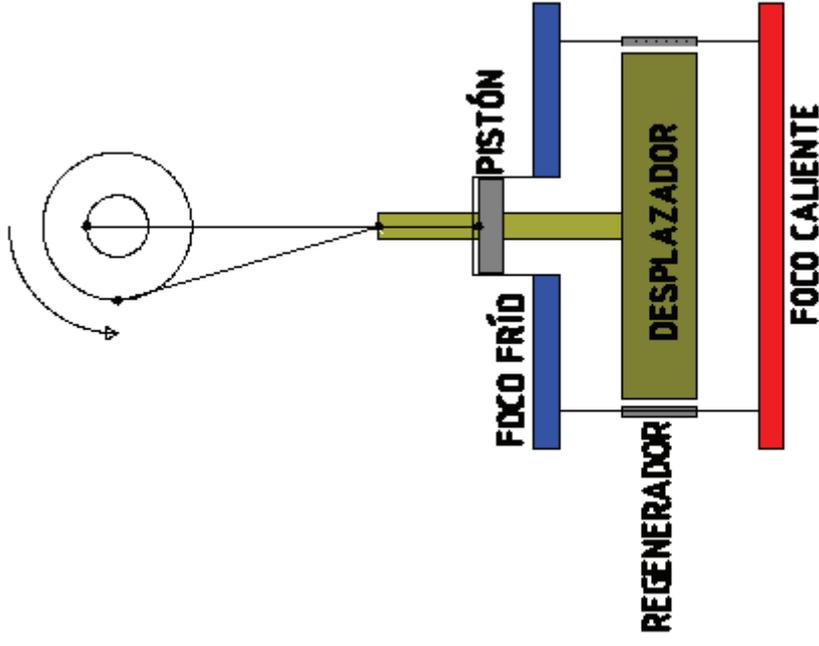


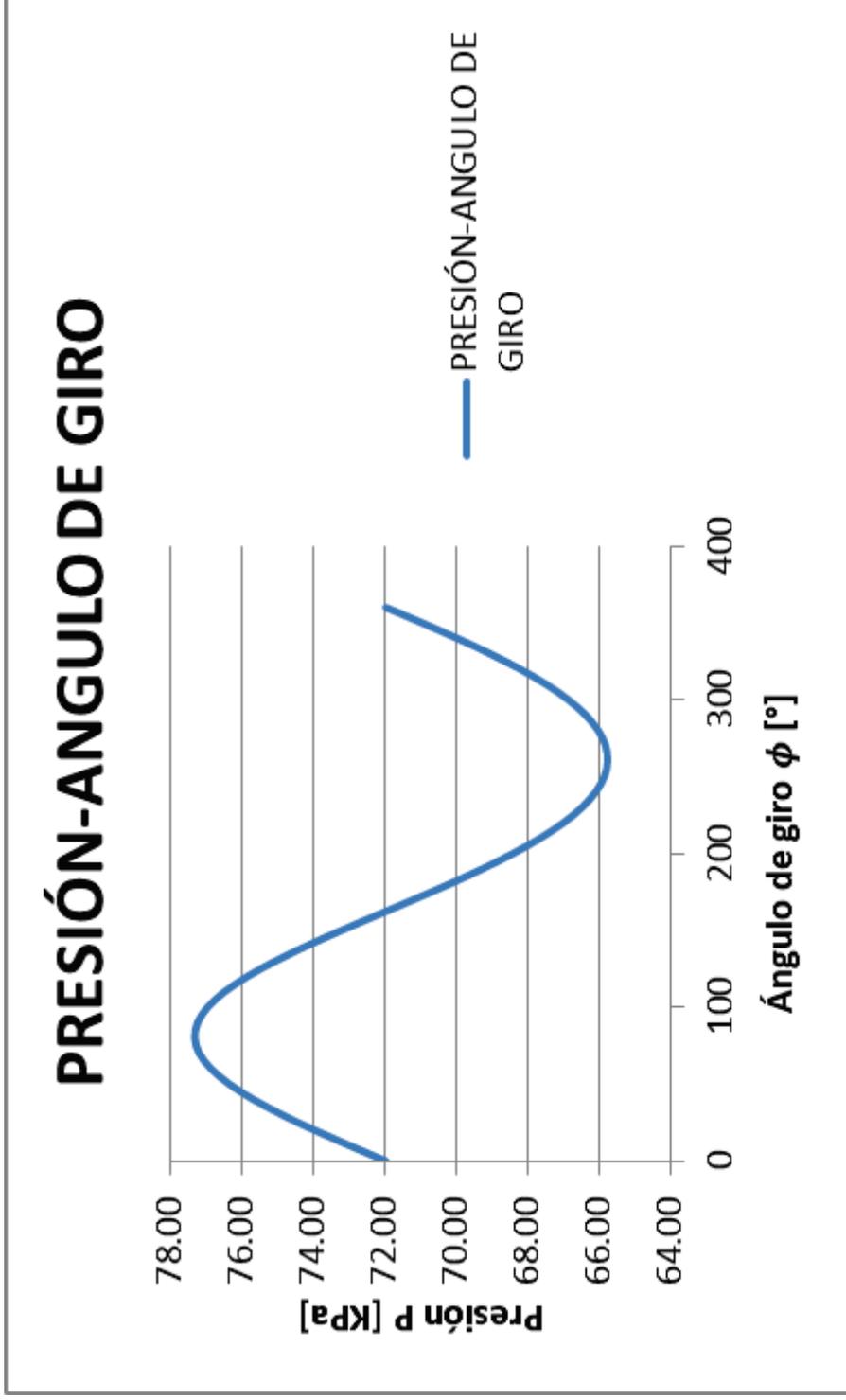
Tabla A 1.2 Resultados obtenidos para el motor Stirling tipo Beta

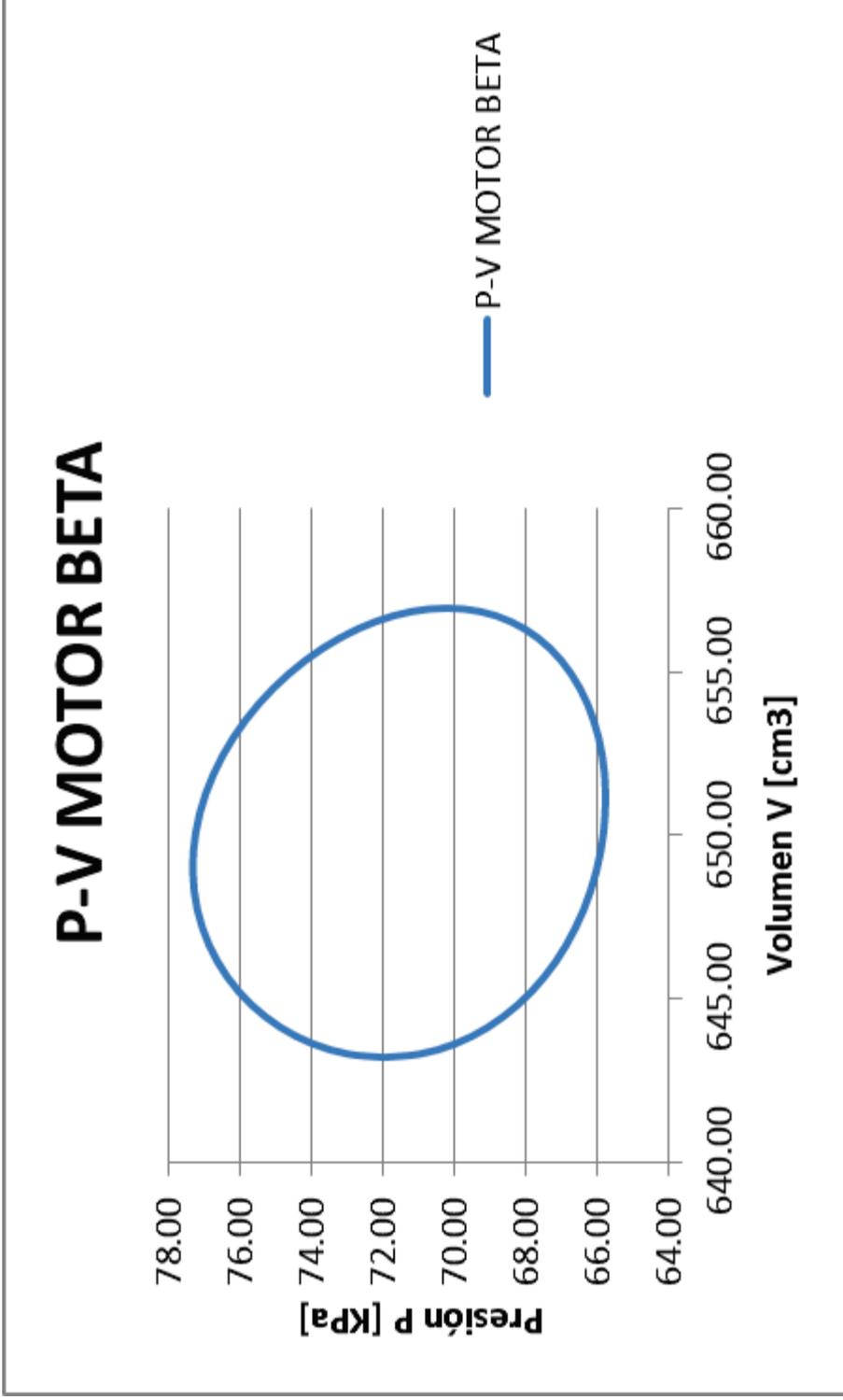
RESULTADOS MOTOR STIRLING TIPO BETA													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [ $cm^3$ ]	V HOT $V_H$ [ $cm^3$ ]	V COLD $V_C$ [ $cm^3$ ]	V REG $V_{Reg}$ [ $cm^3$ ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{Isot}}{Kg} * K$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{Isob}}{Kg} * K$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg} * K$	ENTROPÍA $S$ $\frac{KJ}{Kg} * K$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{Isot}$ [KJ]	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{Isoc}$ [KJ]
0	643.20	273.60	273.60	96	71.98	0.00E+00	353.22	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	643.30	300.27	247.03	96	72.99	7.62E-06	358.23	2.13E-08	4.64E-06	4.66E-06	4.66E-06	7.57E-06	1.65E-03
20	643.61	326.13	221.48	96	73.97	2.29E-05	363.21	6.32E-08	4.54E-06	4.60E-06	9.26E-06	2.28E-05	1.64E-03
30	644.12	350.40	197.72	96	74.88	3.79E-05	367.98	1.03E-07	4.29E-06	4.39E-06	1.36E-05	3.77E-05	1.57E-03
40	644.81	372.33	176.48	96	75.69	5.20E-05	372.35	1.40E-07	3.89E-06	4.03E-06	1.77E-05	5.17E-05	1.44E-03
50	645.65	391.26	158.39	96	76.37	6.47E-05	376.17	1.72E-07	3.35E-06	3.53E-06	2.12E-05	6.44E-05	1.26E-03
60	646.64	406.62	144.01	96	76.88	7.54E-05	379.27	1.99E-07	2.70E-06	2.90E-06	2.41E-05	7.52E-05	1.02E-03
70	647.72	417.94	133.78	96	77.21	8.38E-05	381.53	2.20E-07	1.95E-06	2.17E-06	2.63E-05	8.36E-05	7.42E-04
80	648.88	424.87	128.01	96	77.34	8.95E-05	382.84	2.34E-07	1.13E-06	1.36E-06	2.76E-05	8.94E-05	4.31E-04
90	650.07	427.20	126.87	96	77.26	9.22E-05	383.16	2.41E-07	2.69E-07	5.10E-07	2.81E-05	9.22E-05	1.03E-04
100	651.27	424.87	130.40	96	76.98	9.19E-05	382.46	2.40E-07	-5.97E-07	-3.56E-07	2.78E-05	9.20E-05	-2.28E-04
110	652.42	417.94	138.49	96	76.51	8.85E-05	380.80	2.33E-07	-1.43E-06	-1.20E-06	2.66E-05	8.88E-05	-5.48E-04
120	653.51	406.62	150.89	96	75.87	8.24E-05	378.24	2.18E-07	-2.21E-06	-2.00E-06	2.46E-05	8.27E-05	-8.41E-04
130	654.49	391.26	167.23	96	75.08	7.37E-05	374.91	1.97E-07	-2.91E-06	-2.71E-06	2.19E-05	7.41E-05	-1.10E-03
140	655.34	372.33	187.01	96	74.19	6.28E-05	370.94	1.70E-07	-3.50E-06	-3.33E-06	1.85E-05	6.32E-05	-1.30E-03
150	656.02	350.40	209.62	96	73.23	5.03E-05	366.50	1.37E-07	-3.96E-06	-3.83E-06	1.47E-05	5.06E-05	-1.46E-03
160	656.53	326.13	234.40	96	72.22	3.66E-05	361.74	1.01E-07	-4.30E-06	-4.19E-06	1.05E-05	3.68E-05	-1.56E-03
170	656.84	300.27	260.57	96	71.21	2.21E-05	356.84	6.19E-08	-4.49E-06	-4.43E-06	6.10E-06	2.22E-05	-1.61E-03
180	656.94	273.60	287.35	96	70.22	7.33E-06	351.94	2.08E-08	-4.54E-06	-4.52E-06	1.58E-06	7.38E-06	-1.61E-03

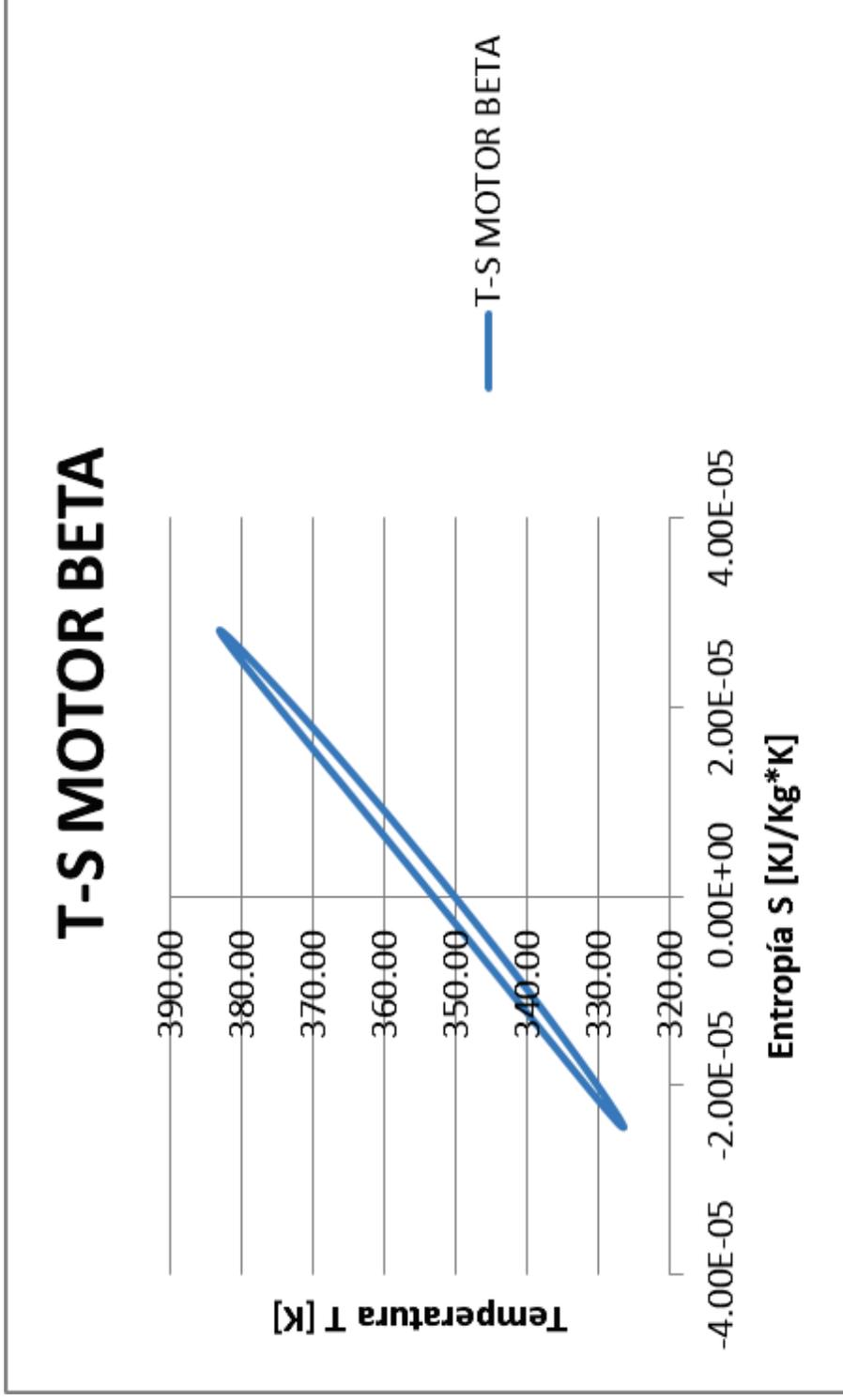
190	656.84	246.93	313.91	96	69.29	-7.23E-06	347.20	-2.08E-08	-4.46E-06	-4.48E-06	-2.90E-06	-7.28E-06	-1.56E-03
200	656.53	221.06	339.47	96	68.43	-2.12E-05	342.73	-6.19E-08	-4.26E-06	-4.32E-06	-7.22E-06	-2.13E-05	-1.47E-03
210	656.02	196.80	363.22	96	67.66	-3.43E-05	338.65	-1.01E-07	-3.94E-06	-4.04E-06	-1.13E-05	-3.44E-05	-1.34E-03
220	655.34	174.87	384.47	96	67.02	-4.60E-05	335.06	-1.37E-07	-3.51E-06	-3.65E-06	-1.49E-05	-4.63E-05	-1.18E-03
230	654.49	155.93	402.55	96	66.50	-5.63E-05	332.02	-1.70E-07	-2.99E-06	-3.16E-06	-1.81E-05	-5.65E-05	-9.98E-04
240	653.51	140.58	416.93	96	66.11	-6.49E-05	329.61	-1.97E-07	-2.40E-06	-2.60E-06	-2.07E-05	-6.51E-05	-7.94E-04
250	652.42	129.26	427.16	96	65.87	-7.15E-05	327.86	-2.18E-07	-1.74E-06	-1.96E-06	-2.26E-05	-7.16E-05	-5.73E-04
260	651.27	122.33	432.93	96	65.78	-7.61E-05	326.82	-2.33E-07	-1.05E-06	-1.28E-06	-2.39E-05	-7.62E-05	-3.42E-04
270	650.07	120.00	434.07	96	65.84	-7.86E-05	326.51	-2.40E-07	-3.18E-07	-5.58E-07	-2.45E-05	-7.85E-05	-1.04E-04
280	648.88	122.33	430.54	96	66.04	-7.88E-05	326.93	-2.41E-07	4.22E-07	1.81E-07	-2.43E-05	-7.87E-05	1.38E-04
290	647.72	129.26	422.46	96	66.39	-7.68E-05	328.08	-2.34E-07	1.15E-06	9.21E-07	-2.34E-05	-7.66E-05	3.78E-04
300	646.64	140.58	410.06	96	66.88	-7.26E-05	329.94	-2.20E-07	1.86E-06	1.64E-06	-2.17E-05	-7.23E-05	6.13E-04
310	645.65	155.94	393.72	96	67.50	-6.62E-05	332.49	-1.99E-07	2.53E-06	2.33E-06	-1.94E-05	-6.59E-05	8.38E-04
320	644.81	174.87	373.94	96	68.24	-5.78E-05	335.68	-1.72E-07	3.14E-06	2.96E-06	-1.64E-05	-5.75E-05	1.05E-03
330	644.12	196.80	351.32	96	69.07	-4.75E-05	339.44	-1.40E-07	3.66E-06	3.52E-06	-1.29E-05	-4.72E-05	1.24E-03
340	643.61	221.07	326.55	96	69.99	-3.54E-05	343.69	-1.03E-07	4.09E-06	3.99E-06	-8.91E-06	-3.52E-05	1.40E-03
350	643.30	246.93	300.37	96	70.97	-2.20E-05	348.32	-6.32E-08	4.41E-06	4.34E-06	-4.57E-06	-2.19E-05	1.52E-03
360	643.20	273.60	273.60	96	71.98	-7.51E-06	353.22	-2.13E-08	4.59E-06	4.57E-06	3.69E-10	-7.46E-06	1.61E-03

Tabla A 1.3 Resultados Termodinámicos obtenidos en el motor Stirling Tipo Beta.

RESULTADOS TERMODINÁMICOS DEL MOTOR BETA			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	77.33	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	65.77	KPa
Presión Promedio	$P_{PROM}$	71.34	KPa
Relación De Presión	$r_p$	1.17	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	383.15	°C
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	326.50	°C
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	656.94	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	643.20	cm <sup>3</sup>
Relación De Volúmenes	$r_v$	1.02	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	1.21E-4	KJ
Calor De Entrada	$Q_{IN}$	1.78E-2	KJ
Calor Regenerado	$Q_{REG}$	1.86E-3	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	0.68	%







## 2. MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO CON 90° EN SU FOCO CALIENTE Y SU FOCO FRÍO.

Tabla A 1.4 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [90°].

DATOS DEL MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_{PR}$	25	mm
Carrera del pistón	$L_{PR}$	10	mm
Diámetro del Desplazador	$D_{DR}$	120	mm
Alto del desplazador	$h_{DR}$	80	mm
Ángulo del Volumen Desplazado	$\alpha_{VD}$	32	°
Volumen muerto caliente	$V_{mHR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mLR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	39	cm <sup>3</sup>
Temperatura caliente	$T_{HR}$	150	°C
Temperatura frío	$T_{CR}$	28	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
$C_v$ del gas	$C_v$	0.72	KJ/(Kg * K)
Masa	$M_R$	0.0002267	Kg
Área de Transferencia de Calor	$A_{TC}$	0.00434	m <sup>2</sup>
Perímetro de Transferencia de Calor	$P_{TC}$	0.2664	m

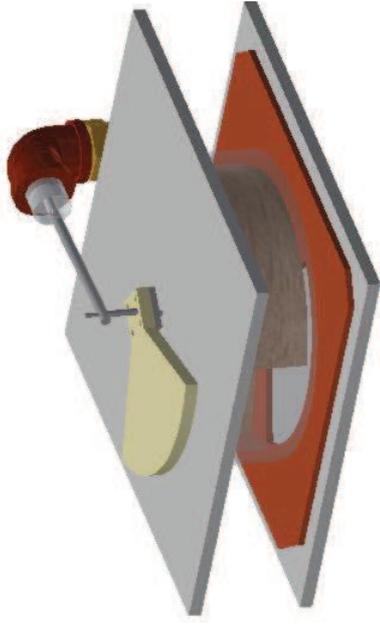


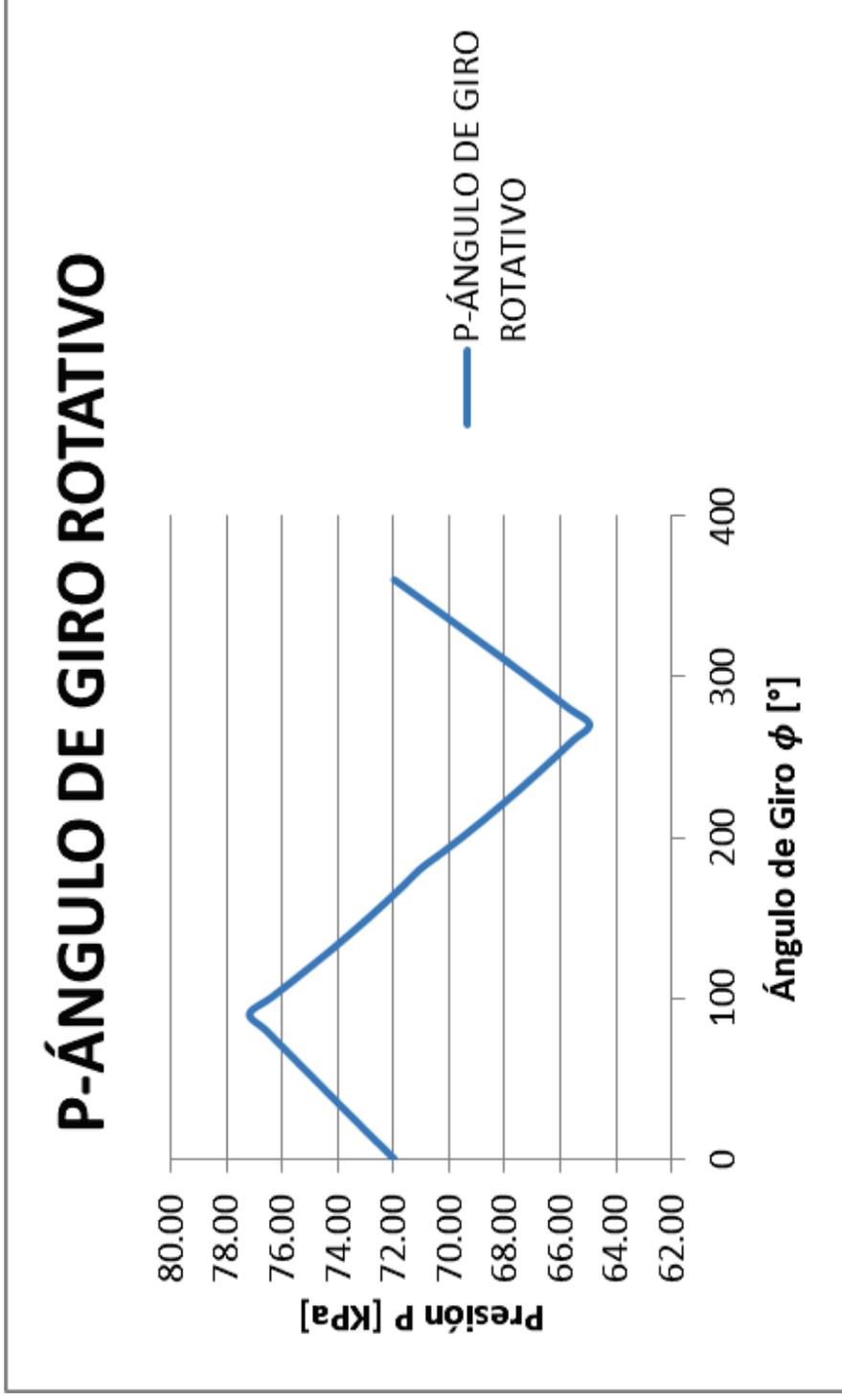
Tabla A 1.5 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [90°].

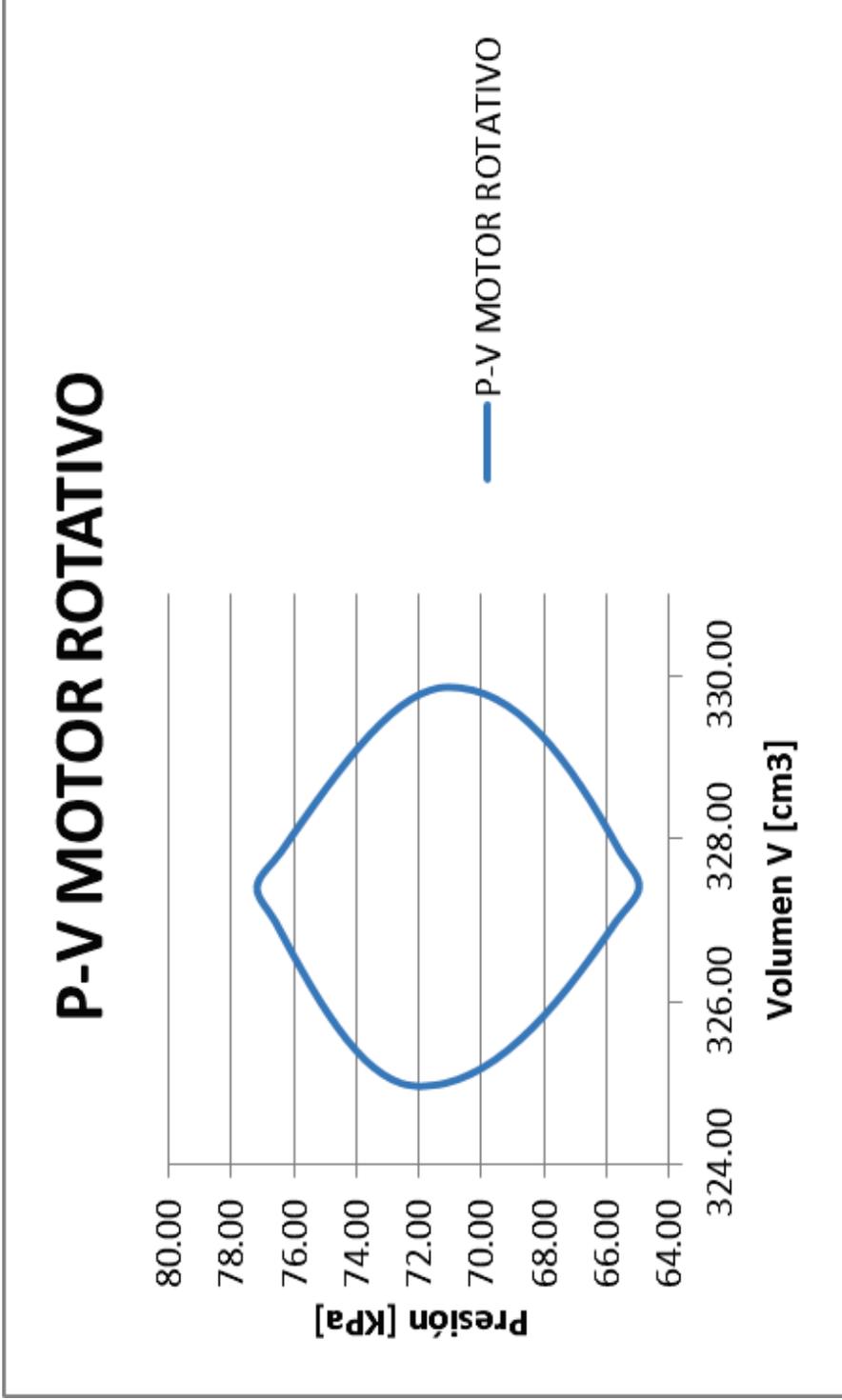
RESULTADOS MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	V HOT $V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	V COLD $V_C$ [cm <sup>3</sup> ]	V REG $V_{Reg}$ [cm <sup>3</sup> ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{Isot}}{Kg} * K$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{Isob}}{Kg} * K$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg} * K$	ENTROPÍA $S$ $\frac{KJ}{Kg} * K$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{Isot}$ [KJ]	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{Isoc}$ [KJ]
0	324.95	62.00	47.00	215.95	71.98	0.00E+00	365.11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	324.99	81.70	47.00	196.29	72.57	2.71E-06	368.14	7.35E-09	1.33E-06	1.34E-06	1.34E-06	2.70E-06	4.87E-04
20	325.10	101.47	47.00	176.63	73.16	8.10E-06	371.23	2.18E-08	1.34E-06	1.37E-06	2.70E-06	8.07E-06	4.97E-04
30	325.28	121.31	47.00	156.97	73.74	1.33E-05	374.38	3.56E-08	1.36E-06	1.39E-06	4.09E-06	1.33E-05	5.06E-04
40	325.53	141.22	47.00	137.31	74.31	1.82E-05	377.59	4.83E-08	1.37E-06	1.42E-06	5.51E-06	1.82E-05	5.16E-04
50	325.83	161.18	47.00	117.65	74.88	2.27E-05	380.85	5.95E-08	1.38E-06	1.44E-06	6.96E-06	2.26E-05	5.25E-04
60	326.18	181.20	47.00	97.98	75.46	2.64E-05	384.18	6.89E-08	1.40E-06	1.46E-06	8.42E-06	2.63E-05	5.34E-04
70	326.57	201.24	47.00	78.32	76.03	2.95E-05	387.55	7.61E-08	1.41E-06	1.48E-06	9.90E-06	2.94E-05	5.43E-04
80	326.98	221.32	47.00	58.66	76.60	3.17E-05	390.98	8.10E-08	1.42E-06	1.50E-06	1.14E-05	3.15E-05	5.51E-04
90	327.41	241.41	47.00	39.00	77.19	3.29E-05	394.46	8.35E-08	1.43E-06	1.51E-06	1.29E-05	3.28E-05	5.60E-04
100	327.83	222.17	47.00	58.66	76.42	3.26E-05	391.06	8.33E-08	-1.39E-06	-1.31E-06	1.16E-05	3.27E-05	-5.47E-04
110	328.25	202.92	47.00	78.32	75.67	3.13E-05	387.72	8.07E-08	-1.38E-06	-1.30E-06	1.03E-05	3.14E-05	-5.37E-04
120	328.63	183.65	47.00	97.98	74.94	2.91E-05	384.44	7.56E-08	-1.36E-06	-1.29E-06	9.01E-06	2.92E-05	-5.27E-04
130	328.98	164.34	47.00	117.65	74.24	2.60E-05	381.22	6.83E-08	-1.35E-06	-1.28E-06	7.73E-06	2.61E-05	-5.18E-04
140	329.29	144.98	47.00	137.31	73.55	2.23E-05	378.05	5.89E-08	-1.34E-06	-1.28E-06	6.45E-06	2.24E-05	-5.09E-04
150	329.53	125.56	47.00	156.97	72.89	1.79E-05	374.94	4.77E-08	-1.33E-06	-1.28E-06	5.17E-06	1.80E-05	-5.01E-04
160	329.71	106.08	47.00	176.63	72.26	1.31E-05	371.87	3.51E-08	-1.32E-06	-1.29E-06	3.88E-06	1.31E-05	-4.93E-04
170	329.82	86.53	47.00	196.29	71.64	7.93E-06	368.84	2.15E-08	-1.31E-06	-1.29E-06	2.59E-06	7.97E-06	-4.86E-04
180	329.86	66.91	47.00	215.95	71.06	2.65E-06	365.86	7.24E-09	-1.31E-06	-1.30E-06	1.29E-06	2.66E-06	-4.80E-04
190	329.82	66.87	66.66	196.29	70.28	-2.62E-06	361.82	-7.24E-09	-1.78E-06	-1.79E-06	-5.02E-07	-2.64E-06	-6.49E-04
200	329.71	66.76	86.32	176.63	69.53	-7.70E-06	357.86	-2.15E-08	-1.77E-06	-1.79E-06	-2.29E-06	-7.74E-06	-6.37E-04

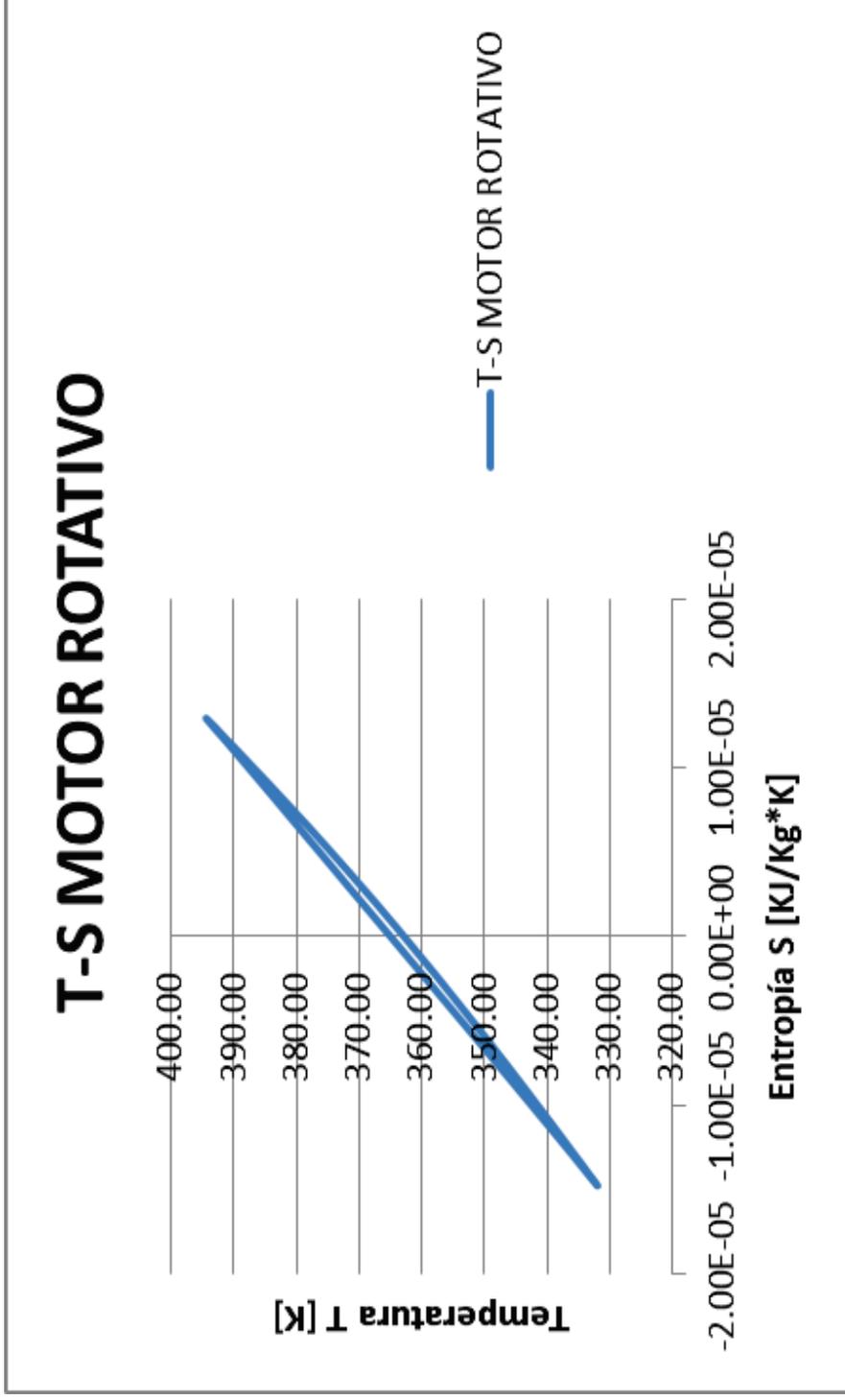
210	329.53	66.58	105.98	156.97	68.82	-1.24E-05	353.97	-3.51E-08	-1.76E-06	-1.79E-06	-4.08E-06	-1.25E-05	-6.25E-04
220	329.29	66.33	125.65	137.31	68.12	-1.67E-05	350.15	-4.77E-08	-1.75E-06	-1.79E-06	-5.88E-06	-1.68E-05	-6.14E-04
230	328.98	66.03	145.31	117.65	67.45	-2.04E-05	346.39	-5.89E-08	-1.73E-06	-1.79E-06	-7.67E-06	-2.05E-05	-6.04E-04
240	328.63	65.68	164.97	97.98	66.81	-2.34E-05	342.69	-6.83E-08	-1.72E-06	-1.79E-06	-9.46E-06	-2.35E-05	-5.94E-04
250	328.25	65.29	184.63	78.32	66.18	-2.57E-05	339.06	-7.56E-08	-1.71E-06	-1.79E-06	-1.12E-05	-2.58E-05	-5.84E-04
260	327.83	64.88	204.29	58.66	65.56	-2.71E-05	335.50	-8.07E-08	-1.70E-06	-1.78E-06	-1.30E-05	-2.72E-05	-5.74E-04
270	327.41	64.45	223.95	39.00	64.96	-2.77E-05	331.99	-8.33E-08	-1.69E-06	-1.77E-06	-1.48E-05	-2.78E-05	-5.63E-04
280	326.98	64.03	204.29	58.66	65.70	-2.80E-05	335.31	-8.34E-08	1.60E-06	1.52E-06	-1.33E-05	-2.78E-05	5.34E-04
290	326.57	63.61	184.63	78.32	66.45	-2.75E-05	338.72	-8.10E-08	1.62E-06	1.54E-06	-1.17E-05	-2.73E-05	5.47E-04
300	326.18	63.23	164.97	97.98	67.21	-2.61E-05	342.21	-7.61E-08	1.65E-06	1.57E-06	-1.02E-05	-2.59E-05	5.61E-04
310	325.83	62.88	145.31	117.65	67.99	-2.38E-05	345.78	-6.89E-08	1.67E-06	1.60E-06	-8.57E-06	-2.37E-05	5.75E-04
320	325.53	62.57	125.65	137.31	68.77	-2.08E-05	349.45	-5.95E-08	1.70E-06	1.64E-06	-6.93E-06	-2.07E-05	5.90E-04
330	325.28	62.33	105.98	156.97	69.57	-1.71E-05	353.22	-4.83E-08	1.72E-06	1.67E-06	-5.26E-06	-1.70E-05	6.05E-04
340	325.10	62.15	86.32	176.63	70.37	-1.27E-05	357.08	-3.56E-08	1.75E-06	1.71E-06	-3.55E-06	-1.27E-05	6.21E-04
350	324.99	62.04	66.66	196.29	71.17	-7.88E-06	361.04	-2.18E-08	1.77E-06	1.75E-06	-1.79E-06	-7.84E-06	6.37E-04
360	324.95	62.00	47.00	215.95	71.98	-2.68E-06	365.11	-7.35E-09	1.80E-06	1.79E-06	3.72E-10	-2.67E-06	6.54E-04

Tabla A 1.6 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo

RESULTADOS TERMODINÁMICO MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	78.56	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	65.30	KPa
Presión Media	$P_{PROM}$	72.08	KPa
Relación de Presión	$r_p$	1.20	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	392.30	°C
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	326.06	°C
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	329.86	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	324.95	cm <sup>3</sup>
Relación de Volumen	$r_V$	1.02	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	4.19E-05	KJ
Calor de entrada	$Q_{IN}$	7.96E-03	KJ
Calor de regeneración	$Q_{REG}$	3.27E-03	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	0.53	%







### 3. MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO CON 120° EN SU FOCO CALIENTE Y SU FOCO FRÍO.

Tabla A 1.7 Datos para el análisis matemático del Motor Stirling Rotativo [120°].

DATOS DEL MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_{PR}$	25	mm
Carrera del pistón	$L_{PR}$	10	mm
Diámetro del Desplazador	$D_{DR}$	120	mm
Alto del desplazador	$h_{DR}$	80	mm
Ángulo del Volumen Desplazado	$\alpha_{VD}$	32	°
Volumen muerto caliente	$V_{mHR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mLR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	39	cm <sup>3</sup>
Temperatura caliente	$T_{HR}$	150	°C
Temperatura frío	$T_{CR}$	28	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
$C_v$ del gas	$C_v$	0.72	KJ/(Kg * K)
Masa	$M_R$	0.0002267	Kg
Área de Transferencia de Calor	$A_{TC}$	0.00434	m <sup>2</sup>
Perímetro de Transferencia de Calor	$P_{TC}$	0.2664	m

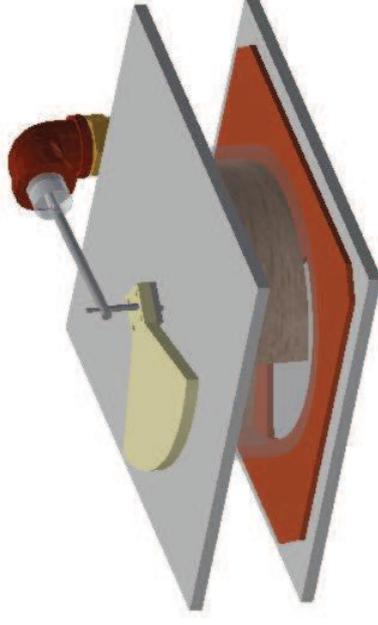


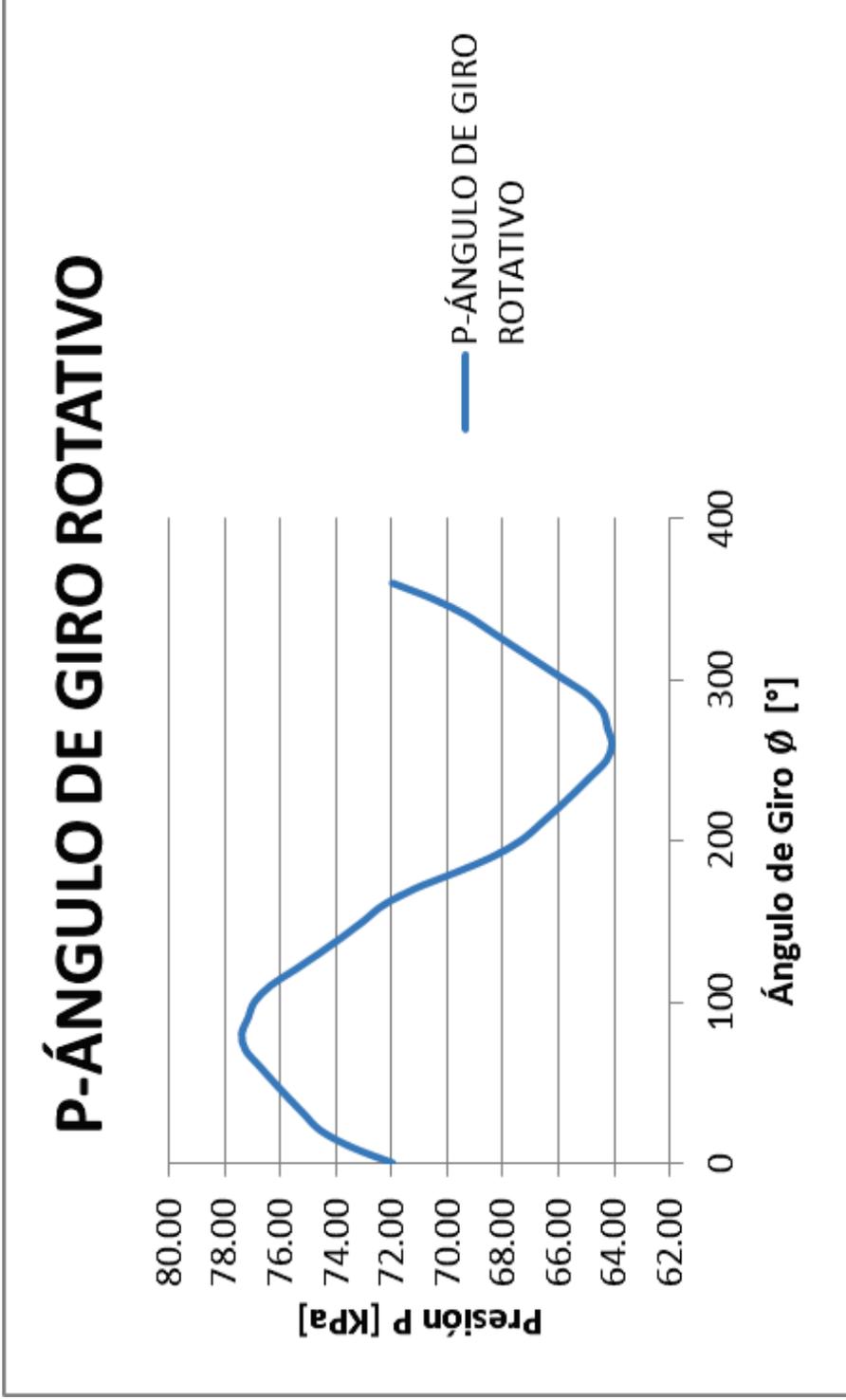
Tabla A 1. 8 Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [90°].

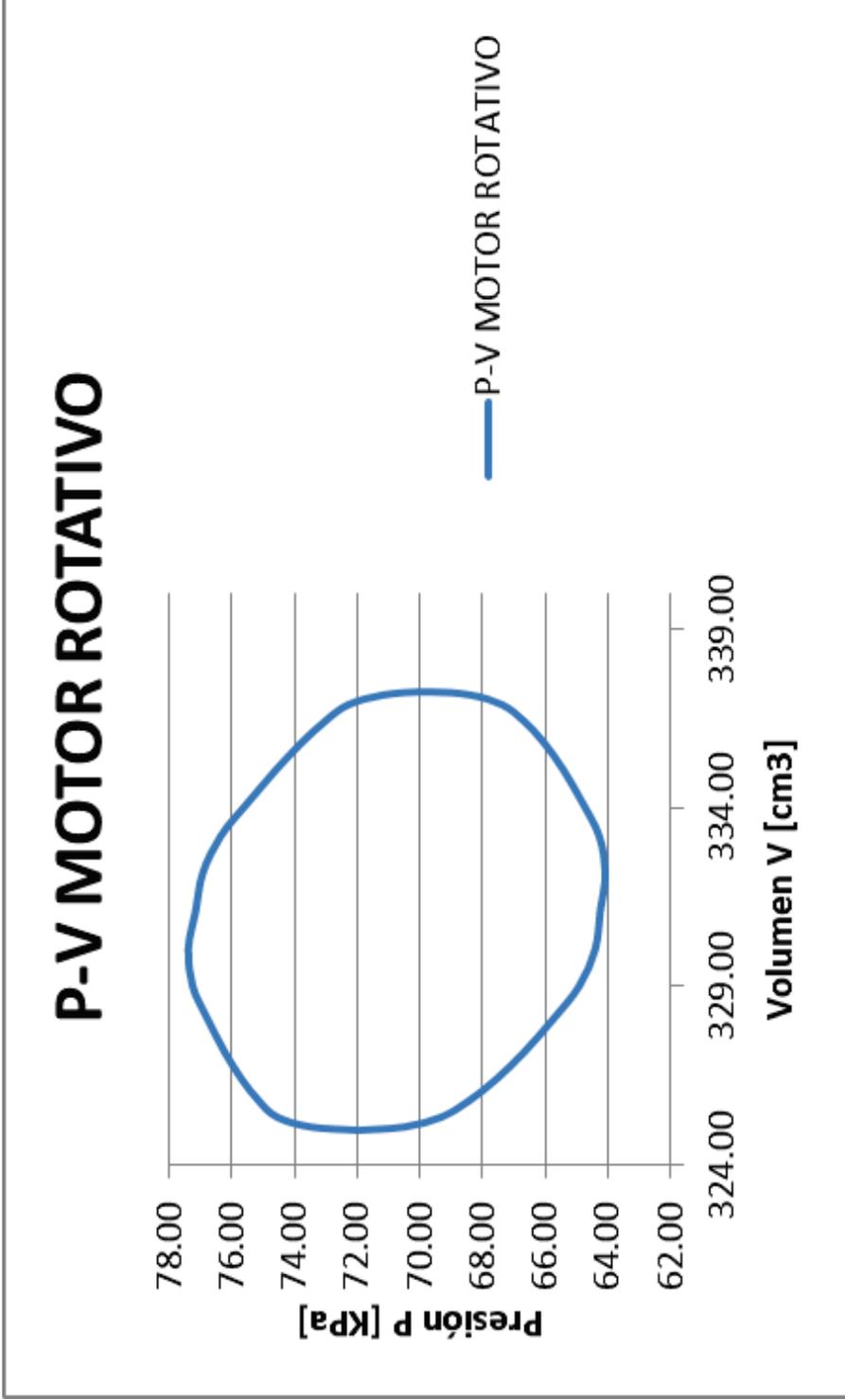
RESULTADOS MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	V HOT $V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	V COLD $V_C$ [cm <sup>3</sup> ]	V REG $V_{Reg}$ [cm <sup>3</sup> ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{Isot}}{Kg} * K$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{Isob}}{Kg} * K$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg} * K$	ENTROPÍA $S$ $\frac{KJ}{Kg} * K$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{Isot}$ [KJ]	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{Isoc}$ [KJ]
0	324.95	91.49	76.49	156.97	71.98	0.00E+00	359.45	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	325.05	111.25	56.83	156.97	73.50	6.85E-06	367.11	1.87E-08	3.44E-06	3.46E-06	3.46E-06	6.78E-06	1.25E-03
20	325.32	131.18	47.00	147.14	74.56	2.06E-05	372.76	5.54E-08	2.49E-06	2.55E-06	6.01E-06	2.05E-05	9.23E-04
30	325.77	151.30	47.00	127.48	75.15	3.40E-05	376.20	9.04E-08	1.50E-06	1.59E-06	7.60E-06	3.38E-05	5.61E-04
40	326.39	171.57	47.00	107.81	75.70	4.64E-05	379.70	1.22E-07	1.51E-06	1.64E-06	9.24E-06	4.63E-05	5.72E-04
50	327.14	191.99	47.00	88.15	76.24	5.77E-05	383.28	1.51E-07	1.53E-06	1.68E-06	1.09E-05	5.75E-05	5.84E-04
60	328.02	212.53	47.00	68.49	76.76	6.73E-05	386.92	1.74E-07	1.54E-06	1.72E-06	1.26E-05	6.70E-05	5.94E-04
70	328.99	233.16	47.00	48.83	77.26	7.49E-05	390.61	1.92E-07	1.55E-06	1.74E-06	1.44E-05	7.47E-05	6.03E-04
80	330.02	244.02	47.00	39.00	77.40	8.00E-05	392.53	2.04E-07	7.98E-07	1.00E-06	1.54E-05	7.99E-05	3.12E-04
90	331.09	245.09	47.00	39.00	77.17	8.22E-05	392.62	2.10E-07	3.79E-08	2.48E-07	1.56E-05	8.23E-05	1.49E-05
100	332.15	246.15	47.00	39.00	76.94	8.20E-05	392.71	2.09E-07	3.76E-08	2.47E-07	1.59E-05	8.21E-05	1.48E-05
110	333.19	237.36	47.00	48.83	76.36	7.89E-05	390.99	2.02E-07	-7.16E-07	-5.14E-07	1.54E-05	7.92E-05	-2.80E-04
120	334.16	218.66	47.00	68.49	75.47	7.32E-05	387.52	1.89E-07	-1.45E-06	-1.26E-06	1.41E-05	7.36E-05	-5.66E-04
130	335.03	199.88	47.00	88.15	74.61	6.54E-05	384.13	1.70E-07	-1.44E-06	-1.27E-06	1.28E-05	6.57E-05	-5.54E-04
140	335.79	180.97	47.00	107.81	73.80	5.58E-05	380.79	1.47E-07	-1.42E-06	-1.28E-06	1.16E-05	5.61E-05	-5.44E-04
150	336.40	161.93	47.00	127.48	73.03	4.48E-05	377.52	1.19E-07	-1.41E-06	-1.29E-06	1.03E-05	4.50E-05	-5.35E-04
160	336.85	142.72	47.00	147.14	72.31	3.27E-05	374.28	8.74E-08	-1.40E-06	-1.32E-06	8.94E-06	3.28E-05	-5.28E-04
170	337.13	123.33	56.83	156.97	71.20	1.97E-05	368.86	5.35E-08	-2.38E-06	-2.33E-06	6.61E-06	1.99E-05	-8.86E-04
180	337.22	103.76	76.49	156.97	69.74	6.50E-06	361.42	1.80E-08	-3.32E-06	-3.31E-06	3.31E-06	6.57E-06	-1.21E-03
190	337.13	84.01	96.15	156.97	68.38	-6.37E-06	354.25	-1.80E-08	-3.27E-06	-3.29E-06	1.90E-08	-6.44E-06	-1.17E-03
200	336.85	73.90	115.81	147.14	67.37	-1.86E-05	348.73	-5.35E-08	-2.56E-06	-2.62E-06	-2.60E-06	-1.88E-05	-9.01E-04

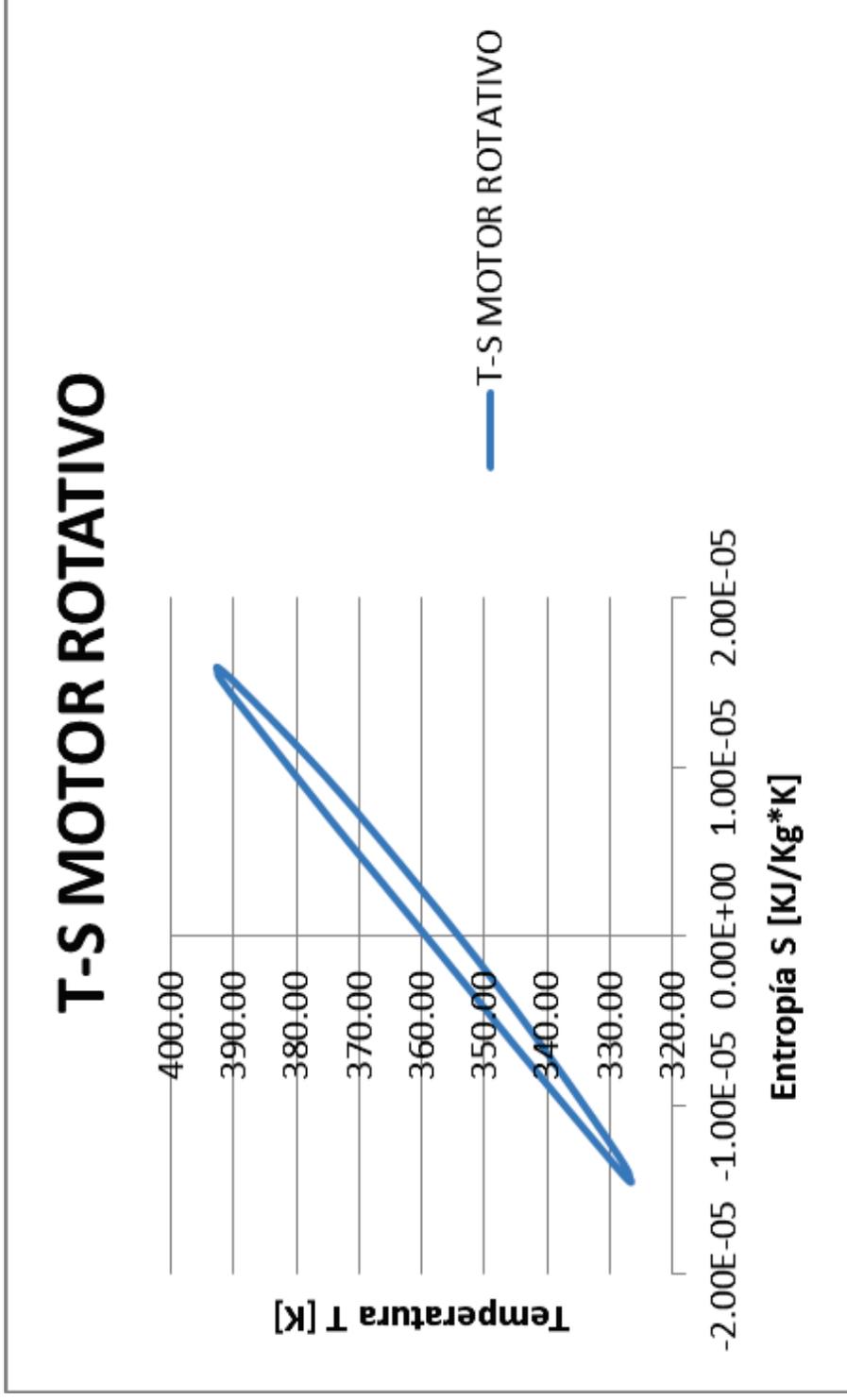
210	336.40	73.45	135.48	127.48	66.68	-3.01E-05	344.72	-8.74E-08	-1.89E-06	-1.98E-06	-4.58E-06	-3.03E-05	-6.55E-04
220	335.79	72.84	155.14	107.81	66.04	-4.05E-05	340.75	-1.19E-07	-1.89E-06	-2.01E-06	-6.58E-06	-4.07E-05	-6.47E-04
230	335.03	72.08	174.80	88.15	65.42	-4.95E-05	336.83	-1.47E-07	-1.89E-06	-2.04E-06	-8.62E-06	-4.97E-05	-6.40E-04
240	334.16	71.20	194.46	68.49	64.84	-5.68E-05	332.96	-1.70E-07	-1.89E-06	-2.06E-06	-1.07E-05	-5.71E-05	-6.32E-04
250	333.19	70.23	214.12	48.83	64.28	-6.23E-05	329.14	-1.89E-07	-1.89E-06	-2.07E-06	-1.28E-05	-6.26E-05	-6.24E-04
260	332.15	69.20	223.95	39.00	64.09	-6.62E-05	327.13	-2.02E-07	-1.00E-06	-1.20E-06	-1.40E-05	-6.63E-05	-3.28E-04
270	331.09	68.14	223.95	39.00	64.25	-6.85E-05	326.89	-2.09E-07	-1.19E-07	-3.28E-07	-1.43E-05	-6.84E-05	-3.89E-05
280	330.02	67.07	223.95	39.00	64.41	-6.86E-05	326.65	-2.10E-07	-1.20E-07	-3.29E-07	-1.46E-05	-6.85E-05	-3.91E-05
290	328.99	66.04	214.12	48.83	64.92	-6.71E-05	328.21	-2.04E-07	7.77E-07	5.73E-07	-1.40E-05	-6.68E-05	2.54E-04
300	328.02	65.07	194.46	68.49	65.79	-6.38E-05	331.64	-1.92E-07	1.70E-06	1.51E-06	-1.25E-05	-6.34E-05	5.60E-04
310	327.14	64.19	174.80	88.15	66.67	-5.84E-05	335.19	-1.74E-07	1.74E-06	1.56E-06	-1.10E-05	-5.80E-05	5.79E-04
320	326.39	63.44	155.14	107.81	67.56	-5.11E-05	338.86	-1.51E-07	1.78E-06	1.63E-06	-9.34E-06	-5.08E-05	5.99E-04
330	325.77	62.82	135.48	127.48	68.45	-4.20E-05	342.65	-1.22E-07	1.82E-06	1.70E-06	-7.65E-06	-4.17E-05	6.19E-04
340	325.32	62.37	115.81	147.14	69.33	-3.13E-05	346.58	-9.04E-08	1.86E-06	1.77E-06	-5.88E-06	-3.11E-05	6.41E-04
350	325.05	71.92	96.15	156.97	70.50	-1.95E-05	352.13	-5.54E-08	2.59E-06	2.54E-06	-3.34E-06	-1.94E-05	9.06E-04
360	324.95	91.49	76.49	156.97	71.98	-6.71E-06	359.45	-1.87E-08	3.36E-06	3.34E-06	3.47E-10	-6.64E-06	1.20E-03

Tabla A 1. 9 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo

RESULTADOS TERMODINÁMICO MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	77.40	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	64.09	KPa
Presión Media	$P_{PROM}$	70.81	KPa
Relación de Presión	$r_p$	1.21	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	392.71	°C
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	326.65	°C
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	337.22	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	324.95	cm <sup>3</sup>
Relación de Volumen	$r_v$	1.04	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	1.21E-04	KJ
Calor de entrada	$Q_{IN}$	8.48E-03	KJ
Calor de regeneración	$Q_{REG}$	3.24E-03	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	1.43	%







## ANEXO2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO.

Tabla A 2. 1Parámetros para el dimensionamiento del Motor Stirling Rotativo [120°].

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del Pistón	$D_{PR}$	25	mm
Carrera del pistón	$L_{PR}$	10	mm
Diámetro del Desplazador	$D_{DR}$	120	mm
Alto del desplazador	$h_{DR}$	80	mm
Ángulo del Volumen Desplazado	$\alpha_{VD}$	32	°
Volumen muerto caliente	$V_{mHR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto frío	$V_{mLR}$	47	cm <sup>3</sup>
Volumen muerto regenerador	$V_{mR}$	39	cm <sup>3</sup>
Temperatura caliente	$T_{HR}$	150	°C
Temperatura frío	$T_{CR}$	28	°C
Constante de gas	$R$	0.287	KJ/(Kg * K)
$C_v$ del gas	$C_v$	0.72	KJ/(Kg * K)
Masa	$M_R$	0.0002267	Kg
Área de Transferencia de Calor	$A_{TC}$	0.00434	m <sup>2</sup>
Perímetro de Transferencia de Calor	$P_{TC}$	0.2664	m

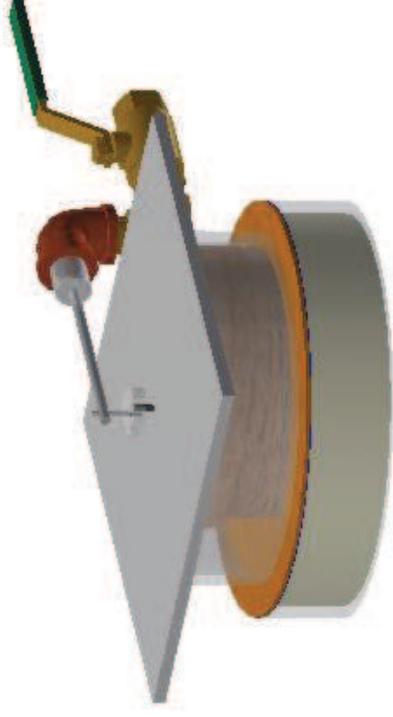


Tabla A 2. 2Resultados obtenidos para el motor Stirling de Desplazador Rotativo [90°].

RESULTADOS MOTOR STIRLING DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]													
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	V TOTAL $V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	V HOT $V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	V COLD $V_C$ [cm <sup>3</sup> ]	V REG $V_{Reg}$ [cm <sup>3</sup> ]	PRESIÓN $P$ [KPa]	DELTA TRABAJO $\Delta W$ [KJ]	TEMP $T$ [K]	DELTA S ISOTÉRM $\frac{\Delta S_{Isot}}{Kg} * K$	DELTA S ISOCOR $\frac{\Delta S_{Isob}}{Kg} * K$	DELTA S TOTAL $\frac{\Delta S_{TOTAL}}{Kg} * K$	ENTROPÍA $S$ $\frac{KJ}{Kg} * K$	DELTA Q ISOTÉRM $\Delta Q_{Isot}$ [KJ]	DELTA Q ISOCOR $\Delta Q_{Isoc}$ [KJ]
0	323.00	91.17	76.17	155.67	71.98	0.00E+00	347.80	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	323.05	110.67	56.72	155.67	72.86	4.08E-06	352.11	1.16E-08	2.07E-06	2.08E-06	2.08E-06	4.05E-06	7.23E-04
20	323.22	130.28	47.00	145.94	73.49	1.22E-05	355.31	3.44E-08	1.52E-06	1.55E-06	3.63E-06	1.22E-05	5.37E-04
30	323.49	149.99	47.00	126.50	73.84	2.00E-05	357.34	5.61E-08	9.53E-07	1.01E-06	4.64E-06	2.00E-05	3.40E-04
40	323.86	169.80	47.00	107.05	74.18	2.73E-05	359.39	7.60E-08	9.60E-07	1.04E-06	5.67E-06	2.72E-05	3.44E-04
50	324.31	189.70	47.00	87.61	74.51	3.38E-05	361.46	9.36E-08	9.66E-07	1.06E-06	6.73E-06	3.37E-05	3.48E-04
60	324.84	209.67	47.00	68.17	74.82	3.93E-05	363.56	1.08E-07	9.71E-07	1.08E-06	7.81E-06	3.92E-05	3.52E-04
70	325.42	229.70	47.00	48.72	75.12	4.37E-05	365.68	1.20E-07	9.75E-07	1.09E-06	8.91E-06	4.36E-05	3.55E-04
80	326.04	240.04	47.00	39.00	75.20	4.66E-05	366.76	1.27E-07	4.95E-07	6.23E-07	9.53E-06	4.66E-05	1.81E-04
90	326.68	240.68	47.00	39.00	75.06	4.80E-05	366.79	1.31E-07	1.39E-08	1.45E-07	9.68E-06	4.80E-05	5.10E-06
100	327.32	241.32	47.00	39.00	74.92	4.79E-05	366.82	1.31E-07	1.39E-08	1.45E-07	9.82E-06	4.79E-05	5.08E-06
110	327.94	232.22	47.00	48.72	74.57	4.62E-05	365.81	1.26E-07	-4.65E-07	-3.38E-07	9.48E-06	4.63E-05	-1.70E-04
120	328.52	213.35	47.00	68.17	74.02	4.31E-05	363.77	1.18E-07	-9.38E-07	-8.19E-07	8.66E-06	4.32E-05	-3.42E-04
130	329.05	194.44	47.00	87.61	73.49	3.86E-05	361.76	1.07E-07	-9.31E-07	-8.24E-07	7.84E-06	3.88E-05	-3.38E-04
140	329.50	175.45	47.00	107.05	72.99	3.31E-05	359.77	9.21E-08	-9.25E-07	-8.33E-07	7.01E-06	3.32E-05	-3.34E-04
150	329.87	156.37	47.00	126.50	72.51	2.67E-05	357.80	7.46E-08	-9.20E-07	-8.45E-07	6.16E-06	2.68E-05	-3.30E-04
160	330.14	137.20	47.00	145.94	72.05	1.95E-05	355.85	5.49E-08	-9.16E-07	-8.62E-07	5.30E-06	1.96E-05	-3.27E-04
170	330.31	117.92	56.72	155.67	71.39	1.19E-05	352.73	3.36E-08	-1.47E-06	-1.44E-06	3.86E-06	1.19E-05	-5.22E-04
180	330.36	98.53	76.17	155.67	70.52	3.94E-06	348.51	1.13E-08	-2.02E-06	-2.01E-06	1.85E-06	3.97E-06	-7.08E-04
190	330.31	79.03	95.61	155.67	69.70	-3.90E-06	344.38	-1.13E-08	-2.00E-06	-2.01E-06	-1.60E-07	-3.92E-06	-6.93E-04
200	330.14	69.14	115.05	145.94	69.10	-1.15E-05	341.23	-3.36E-08	-1.54E-06	-1.57E-06	-1.73E-06	-1.15E-05	-5.28E-04

210	329.87	68.87	134.50	126.50	68.70	-1.86E-05	339.01	-5.49E-08	-1.10E-06	-1.15E-06	-2.88E-06	-1.87E-05	-3.73E-04
220	329.50	68.50	153.94	107.05	68.33	-2.52E-05	336.80	-7.46E-08	-1.10E-06	-1.17E-06	-4.06E-06	-2.52E-05	-3.70E-04
230	329.05	68.05	173.39	87.61	67.98	-3.08E-05	334.61	-9.21E-08	-1.10E-06	-1.19E-06	-5.24E-06	-3.09E-05	-3.68E-04
240	328.52	67.52	192.83	68.17	67.64	-3.56E-05	332.42	-1.07E-07	-1.10E-06	-1.20E-06	-6.45E-06	-3.56E-05	-3.66E-04
250	327.94	66.94	212.28	48.72	67.32	-3.92E-05	330.26	-1.18E-07	-1.10E-06	-1.22E-06	-7.67E-06	-3.92E-05	-3.64E-04
260	327.32	66.32	222.00	39.00	67.22	-4.17E-05	329.13	-1.26E-07	-5.71E-07	-6.98E-07	-8.36E-06	-4.17E-05	-1.88E-04
270	326.68	65.68	222.00	39.00	67.33	-4.30E-05	329.04	-1.31E-07	-4.62E-08	-1.77E-07	-8.54E-06	-4.30E-05	-1.52E-05
280	326.04	65.04	222.00	39.00	67.45	-4.31E-05	328.95	-1.31E-07	-4.63E-08	-1.77E-07	-8.72E-06	-4.31E-05	-1.52E-05
290	325.42	64.42	212.28	48.72	67.77	-4.20E-05	329.90	-1.27E-07	4.85E-07	3.58E-07	-8.36E-06	-4.19E-05	1.60E-04
300	324.84	63.84	192.83	68.17	68.31	-3.97E-05	331.93	-1.20E-07	1.03E-06	9.06E-07	-7.45E-06	-3.96E-05	3.39E-04
310	324.31	63.32	173.39	87.61	68.84	-3.62E-05	333.99	-1.08E-07	1.04E-06	9.31E-07	-6.52E-06	-3.60E-05	3.46E-04
320	323.86	62.86	153.94	107.05	69.37	-3.15E-05	336.10	-9.36E-08	1.05E-06	9.60E-07	-5.56E-06	-3.14E-05	3.53E-04
330	323.49	62.49	134.50	126.50	69.90	-2.57E-05	338.25	-7.60E-08	1.07E-06	9.93E-07	-4.57E-06	-2.56E-05	3.60E-04
340	323.22	62.22	115.05	145.94	70.41	-1.91E-05	340.44	-5.61E-08	1.08E-06	1.03E-06	-3.54E-06	-1.90E-05	3.68E-04
350	323.05	71.78	95.61	155.67	71.10	-1.18E-05	343.61	-3.44E-08	1.55E-06	1.52E-06	-2.02E-06	-1.18E-05	5.31E-04
360	323.00	91.17	76.17	155.67	71.98	-4.03E-06	347.80	-1.16E-08	2.03E-06	2.02E-06	3.66E-10	-4.00E-06	7.03E-04

Tabla A 2. 3 Resultados Termodinámicos del motor Stirling de Desplazador Rotativo

RESULTADOS TERMODINÁMICO MOTOR DE DESPLAZADOR ROTATIVO [90°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión Máxima	$P_{MAX}$	77.40	KPa
Presión Mínima	$P_{MIN}$	64.09	KPa
Presión Media	$P_{PROM}$	70.81	KPa
Relación de Presión	$r_p$	1.21	-
Temperatura Máxima	$T_{MAX}$	392.71	°C
Temperatura Mínima	$T_{MIN}$	326.65	°C
Volumen Máximo	$V_{MAX}$	337.22	cm <sup>3</sup>
Volumen Mínimo	$V_{MIN}$	324.95	cm <sup>3</sup>
Relación de Volumen	$r_v$	1.04	-
Trabajo Neto	$W_{NETO}$	1.21E-04	KJ
Calor de entrada	$Q_{IN}$	8.48E-03	KJ
Calor de regeneración	$Q_{REG}$	3.24E-03	KJ
Eficiencia	$\eta_T$	1.43	%

Tabla A 2. 4 Datos para determinar el coeficiente de convección en el motor Stirling de Desplazador Rotativo.

DATOS PARA ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR [120°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Área de transversal de aire	$A_t$	0.002926	$m^2$
Perímetro transversal	$p_t$	0.23	$m$
Temperatura Foco Caliente	$T_{PH}$	300	$^{\circ}C$
Temperatura Foco Frío	$T_{PC}$	20	$^{\circ}C$
Temperatura del Aire Caliente	$T_H$	150	$^{\circ}C$
Temperatura del Aire Frío	$T_C$	35	$^{\circ}C$
Velocidad angular	$\omega$	35	$rpm$

Tabla A 2. 5 Resultados obtenidos para el coeficiente de convección dentro motor Stirling de Desplazador Rotativo

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DENTRO DEL MOTOR											
ANGULO DE GIRO $\phi$ [°]	TEMP. GLOBAL T [K]	DENSIDAD $\rho$ [ $\frac{Kg}{m^3}$ ]	CALOR ESP. $C_p$ [ $\frac{KJ}{KgK}$ ]	VISC. DINÁMICA $\mu$ [ $\frac{Ns}{m^2}$ ]	VISC. ESTÁTICA $\nu$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	COND. TÉRMICA $k$ [ $\frac{W}{ms}$ ]	DIFUSIVIDAD TÉRMICA $\alpha$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	PRANDL Pr	REINOLDS Re	FLUJO	COEF. CONV $h$ [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]
0	347.80	0.721	1.0089	2.07E-05	2.87E-05	0.030	2.96E-05	0.70	189.04	Laminar	4.11
10	352.11	0.712	1.0092	2.09E-05	2.94E-05	0.030	3.03E-05	0.70	184.98	Laminar	3.79
20	355.31	0.706	1.0095	2.11E-05	2.98E-05	0.030	3.08E-05	0.70	182.09	Laminar	3.80
30	357.34	0.702	1.0097	2.11E-05	3.01E-05	0.031	3.11E-05	0.70	180.30	Laminar	3.81
40	359.39	0.698	1.0099	2.12E-05	3.04E-05	0.031	3.15E-05	0.70	178.51	Laminar	3.82
50	361.46	0.694	1.0101	2.13E-05	3.07E-05	0.031	3.18E-05	0.70	176.73	Laminar	3.83
60	363.56	0.690	1.0104	2.14E-05	3.10E-05	0.031	3.22E-05	0.70	174.95	Laminar	3.84
70	365.68	0.686	1.0106	2.15E-05	3.14E-05	0.031	3.25E-05	0.70	173.19	Laminar	3.84
80	366.76	0.684	1.0107	2.16E-05	3.15E-05	0.031	3.27E-05	0.70	172.30	Laminar	3.85
90	366.79	0.684	1.0107	2.16E-05	3.15E-05	0.031	3.27E-05	0.70	172.27	Laminar	3.85
100	366.82	0.684	1.0107	2.16E-05	3.15E-05	0.031	3.27E-05	0.70	172.25	Laminar	3.85
110	365.81	0.686	1.0106	2.15E-05	3.14E-05	0.031	3.26E-05	0.70	173.08	Laminar	3.85
120	363.77	0.689	1.0104	2.14E-05	3.11E-05	0.031	3.22E-05	0.70	174.78	Laminar	3.84
130	361.76	0.693	1.0102	2.13E-05	3.08E-05	0.031	3.19E-05	0.70	176.48	Laminar	3.83
140	359.77	0.697	1.0100	2.12E-05	3.05E-05	0.031	3.15E-05	0.70	178.18	Laminar	3.82
150	357.80	0.701	1.0098	2.12E-05	3.02E-05	0.031	3.12E-05	0.70	179.89	Laminar	3.81
160	355.85	0.705	1.0096	2.11E-05	2.99E-05	0.030	3.09E-05	0.70	181.61	Laminar	3.81
170	352.73	0.711	1.0093	2.09E-05	2.94E-05	0.030	3.04E-05	0.70	184.41	Laminar	3.79
180	348.51	0.720	1.0089	2.07E-05	2.88E-05	0.030	2.97E-05	0.70	188.35	Laminar	4.11
190	344.38	0.728	1.0088	2.06E-05	2.82E-05	0.030	2.91E-05	0.70	192.42	Laminar	4.09
200	341.23	0.735	1.0086	2.04E-05	2.78E-05	0.029	2.86E-05	0.70	195.61	Laminar	4.69

210	339.01	0.740	1.0086	2.03E-05	2.74E-05	0.029	2.83E-05	0.70	197.91	Laminar	4.68
220	336.80	0.745	1.0085	2.02E-05	2.71E-05	0.029	2.79E-05	0.70	200.23	Laminar	4.67
230	334.61	0.750	1.0084	2.01E-05	2.68E-05	0.029	2.76E-05	0.70	202.59	Laminar	4.66
240	332.42	0.754	1.0083	2.00E-05	2.65E-05	0.029	2.73E-05	0.70	204.97	Laminar	4.65
250	330.26	0.759	1.0082	1.99E-05	2.62E-05	0.029	2.70E-05	0.70	207.37	Laminar	4.64
260	329.13	0.762	1.0082	1.98E-05	2.60E-05	0.028	2.68E-05	0.70	208.64	Laminar	4.63
270	329.04	0.762	1.0082	1.98E-05	2.60E-05	0.028	2.68E-05	0.70	208.74	Laminar	4.63
280	328.95	0.762	1.0082	1.98E-05	2.60E-05	0.028	2.68E-05	0.70	208.84	Laminar	4.63
290	329.90	0.760	1.0082	1.99E-05	2.61E-05	0.029	2.69E-05	0.70	207.77	Laminar	4.63
300	331.93	0.756	1.0083	2.00E-05	2.64E-05	0.029	2.72E-05	0.70	205.51	Laminar	4.64
310	333.99	0.751	1.0084	2.01E-05	2.67E-05	0.029	2.75E-05	0.70	203.25	Laminar	4.65
320	336.10	0.746	1.0084	2.02E-05	2.70E-05	0.029	2.78E-05	0.70	200.98	Laminar	4.66
330	338.25	0.741	1.0085	2.03E-05	2.73E-05	0.029	2.82E-05	0.70	198.71	Laminar	4.68
340	340.44	0.737	1.0086	2.04E-05	2.76E-05	0.029	2.85E-05	0.70	196.43	Laminar	4.69
350	343.61	0.730	1.0087	2.05E-05	2.81E-05	0.030	2.90E-05	0.70	193.20	Laminar	4.70
360	347.80	0.721	1.0089	2.07E-05	2.87E-05	0.030	2.96E-05	0.70	189.04	Laminar	4.11

Tabla A 2. 6 Resultado del coeficiente de convección promedio

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR [120°]			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Coefficiente de Convección Promedio	$h_c$	4.83	$W / (m^2 * K)$

## ANEXO3ESPECIFICACIONES DEL POLIURETANO DE EXPANSIÓN RÁPIDA BISON

### CONSTRUCTION FOAM UNIVERSAL POLYURETHANE FOAM WITH HIGH EXPANSION CAPACITY, FOR INDOORS AND OUTDOORS.



#### PRODUCT DESCRIPTION

Universal polyurethane foam with high expansion capacity, for indoors and outdoors.

#### FIELD OF APPLICATION

For quick and easy sealing, insulating and filling of large gaps, joints and cracks. Works against heat loss, cold draught, noise and humidity. Bonds well to many building materials, such as wood, concrete, stone, masonry, plasterwork, metals, glass and many synthetics, like polystyrol, polystyrene foam (tempex), PVC and rigid polyurethane foam. Does not bond to polyethylene foil, silicones or PTFE.

#### PROPERTIES

- High filling capacity
- High insulation value
- Bonds excellently to many surfaces
- For indoors and outdoors
- Paintable
- Resistant to water and many chemicals
- CFC- and HCFC free (ozone friendly)

#### PREPARATION

**Working conditions:** Spray can and ambient temperature should be between +5°C and +35°C.

**Safety:** Wear protective gear and gloves when using Bison Construction foam. Keep work area well ventilated.

**Preliminary treatment:** Surface should be free of dust and grease. Moistened surfaces: it will optimise bonding and yield.

#### APPLICATION

**Coverage:** 700 ml/40-45 litres of foam

#### Directions for use:

Shake aerosol spray can well before each use (10-20 times). Shake aerosol spray can well before use (10-20 times). Dispense foam with can upside down. Fill joint or gap for about 50% full. Foam will expand to 2-3 times its original volume. For filling large holes apply foam in layers and allow to fully expand before applying next layer. Moisten after each layer. After curing, foam can be sawn, drilled, painted or plastered.

**Stains/residue:** Remove fresh stains immediately with Bison Gun & Foam Cleaner or acetone. Cured stains can only be removed mechanically.

**Points of attention:** Bison Construction Foam has a high expansion capacity. If necessary, secure materials to prevent distortion.

#### CURE TIMES

**Skin over time:** approx. 10 minutes

**Dry/Cure time:** approx. 1.5 hours (bead size 30mm, at a temperature of 20°C and RH of 60%)

\* Curing time may vary depending on a.s. surface, product quantity used, humidity level and ambient temperature.

#### TECHNICAL PROPERTIES

- Moisture resistance:** Good
- Temperature resistance:** -40°C to +90°C
- UV resistance:** Moderate
- Chemicals resistance:** Good
- Paintability:** Good
- Filling capacity:** Very good

#### TECHNICAL SPECIFICATIONS

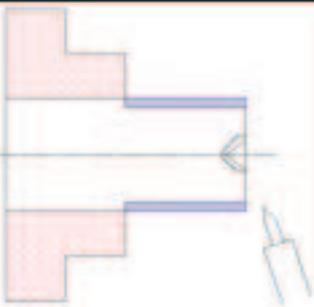
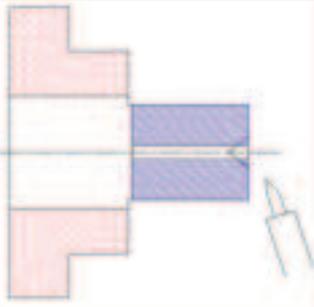
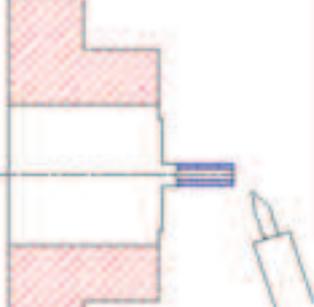
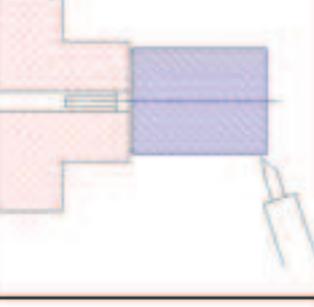
- Base:** PU Prepolymer
- Colour:** Cream
- Density:** approx. 0,025 g/cm<sup>3</sup>
- Flash point:** K1 (<21°C)
- Specifications:** Insulation value: 0,033 mW/m.K (DIN52612). Moisture absorption: 1%.

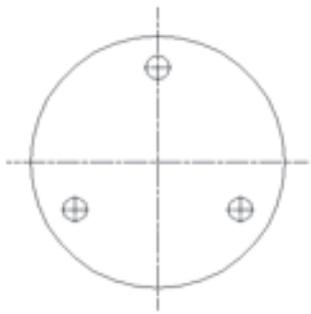
#### SHELF LIFE

At least 12 months after date of manufacture. Limited shelf life after opening. Store upright and well-closed at a temperature between +5°C and +25°C.

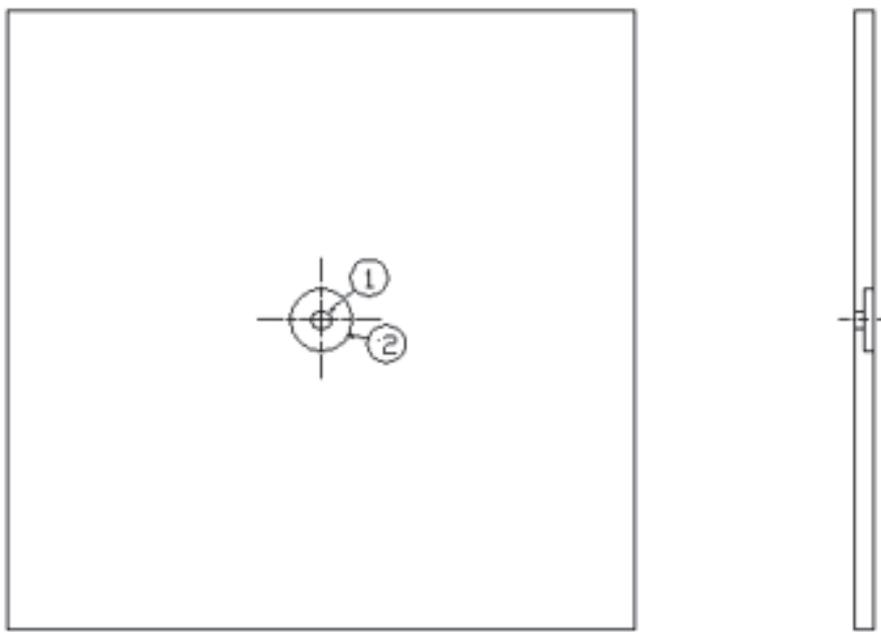
## ANEXO4HOJA DE PROCESOS DEL MAQUINADO DE LA BASE DEL EJE

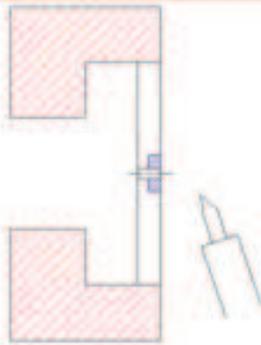
HOJA DE PROCESOS								
Nombre de la unidad: Base del cigüeñal				Tiempo de Duración:	Tiempo Total 125 min			
Fos.	Cant.	Denominación	Material	Dim. En bruto		Obs.		
1	1	Base del cigüeñal	Acero de bajo carbono	Ø 1 ¼ pulg x 80 mm				
Fase	Sub Fase	Nº	Operaciones	Croquis	N RPM	Utiles		Tiempo estimado
						Trab.	Cont.	
TORNO	10	11	Refrentar		420	C.A.R.		10 min
		12	Hacer centro		65	C.A.R.	BR.	5 min

TORNO	20	21	Cilindrar $\Phi 32 \times 20$ mm		180	C.A.R.	C	30 min
		22	Cilindrar $\Phi 5 \times 10$ mm		180	C.A.R.	C	30 min
		23	Cilindrar $\Phi 3 \times 15$ mm		180	C.A.R.	C	15min
	30	31	Refrentar		420	C.A.R.	C	30 min

TALADRO	40	41	Perforar 3 agujeros $\Phi 3\text{mm}$ a $120^\circ$ $r = 12\text{mm}$			BR.	C	5 min
	<b>CODIGO DE ÚTILES:</b> C.A.R. : Cuchilla de Acero Rápido			LABORATORIO DE MAQUINAS HERRAMIENTAS				
	M : Moletas C : Calibrador BR: Broca C.H.: Cuenta Hilos			INGENIERIA MECANICA  E.P.N.				

## ANEXO 5 HOJA DE PROCESOS DE LA PLACA SUPERIOR DEL MOTOR STIRLING

HOJA DE PROCESOS									
Nombre de la unidad: Placa superior					Tiempo de Duración:		Tiempo Total		
							50 min		
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Dim. En bruto		Obs.			
1	1	Placa superior	Acero de bajo carbono	200 x 200 mm					
									
Fase	Sub Fase	N°	Operaciones	Croquis	N RPM	Utiles		Tiempo estimado	
						Trab.	Cont.		
TORNO	10	11	Coger centro	+				10 min	

	12	Perforar $\Phi$ 3 mm * 6mm		180	BR.	BR.	15 min
	13	Cilindrar interior $\Phi$ 10 mm * 3mm		180	C.A.R.	C	25 min
<b>CODIGO DE UTILILES:</b>			<b>LABORATORIO DE MAQUINAS HERRAMIENTAS</b>				
C.A.R. : Cuchilla de Acero Rápido			INGENIERIA MECANICA				
M : Moletas			E.P.N.				
C : Calibrador							
BR: Broca							
C.H.: Cuenta Hilos							

## PLANOS