



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL DE LA EFICIENCIA
DEL MOTOR STIRLING M16-V4-D PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA
DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE
AMBATO”**

Autor: Jorge Sebastián Barroso García

Tutor: Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís, Mg.

AMBATO- ECUADOR

Septiembre – 2023

APROBACIÓN DE TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR STIRLING M16-V4-D PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, elaborado por el Sr. Jorge Sebastián Barroso García, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1312702457, estudiante de la Carrera de Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, septiembre 2023



.....
Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Sebastián Barroso García, con C.I. 1312702457, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR STIRLING M16-V4-D PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, así como también tablas, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del Trabajo Experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, septiembre 2023



.....
Jorge Sebastián Barroso García

C.I. 1312702457

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, septiembre 2023



.....
Jorge Sebastián Barroso García

C.I. 1312702457

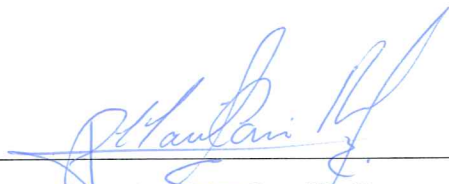
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el estudiante Jorge Sebastián Barroso García de la Carrera de Mecánica bajo el tema: “ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR STIRLING M16-V4-D PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”.

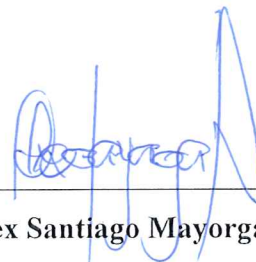
Ambato, septiembre 2023

Para constancia firman:



Ing. Carlos Mauricio Carrillo Rosero, Mg.

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Alex Santiago Mayorga Pardo, Mg.

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Con profundo amor y gratitud, hoy culmina un capítulo significativo en mi vida académica, y quiero aprovechar este momento para expresar mi más sincero agradecimiento a aquellos que han sido mi inspiración y apoyo incondicional a lo largo de este emocionante viaje.

A mis queridos abuelos, Polivio Barroso y Rosa Toinga, su legado de sabiduría y perseverancia ha sido el faro que me ha guiado en cada paso de este camino. Sus valores arraigados en la familia y el esfuerzo me han dado la fuerza para enfrentar cualquier desafío y superar obstáculos con valentía.

A mis amados padres, Jorge Barroso y Esther García, gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mis capacidades. Su apoyo incondicional y palabras alentadoras han sido el motor que me impulsó a no rendirme y seguir adelante.

A mis adorables hermanos, Joel y Carolina, cada uno de ustedes ha sido mi fuente de inspiración. Vuestra confianza en mí me ha dado la determinación de buscar siempre la excelencia y ser un ejemplo para ustedes, como ustedes lo han sido para mí.

A mi amada novia, Sara, tu amor inquebrantable y paciencia infinita me han sostenido en los momentos más desafiantes de esta travesía. Tener tu apoyo y comprensión ha sido una bendición que ha llenado mi vida de alegría y esperanza.

Y a mi preciosa hija, Danae, tú eres la luz de mi vida y la razón de cada paso que he dado para llegar hasta aquí. Mi deseo más profundo es que, a través de este logro, pueda inspirarte a perseguir tus sueños con pasión y convicción, así como tú has enriquecido mi existencia con tu amor y felicidad.

AGRADECIMIENTO

A mis queridos abuelos, Polivio Barroso y Rosa Toinga, agradezco por ser los pilares de nuestra familia y por transmitirme los valores de la perseverancia y la determinación. Vuestra sabiduría y amor han sido mi inspiración constante.

A mis amados padres, Jorge Barroso y Esther García, no tengo palabras suficientes para expresar cuánto les agradezco. Desde mis primeros pasos hasta este momento de graduación, siempre han estado a mi lado, brindándome su incondicional apoyo, paciencia y comprensión. Gracias por ser mis guías y por creer en mí cuando más lo necesitaba.

A la prestigiosa Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, mi más sincero agradecimiento por brindarme una sólida formación académica. Las herramientas y conocimientos adquiridos aquí me han permitido desarrollarme como un profesional competente y comprometido.

Quiero extender mi gratitud al Ing. Mg. Gonzalo López, cuya paciencia y valiosos conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis. Su guía y mentoría han sido invaluable en este proceso de aprendizaje. También hacer una mención especial al Ing. Mg. Santiago Cabrera cuyo conocimiento y orientación han enriquecido mi formación académica.

A mis queridos amigos, quienes han sido una fuente constante de motivación y diversión, les agradezco de corazón por estar presentes en mi vida universitaria. Vuestra compañía y ánimo me han impulsado a seguir adelante en los momentos buenos y malos, haciéndola más llevadera y emocionante.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PORTADA	i
APROBACIÓN DE TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	1
1.1.1. Fundamentación Teórica.....	2
1.1.1.1. Máquina térmica	2
1.1.1.2. Motor de combustión externa	3
1.1.1.3. Motor Stirling	4
1.1.1.4. Tipos de motores Stirling.....	4
1.1.1.4.1. Motor Tipo Alfa.....	5
1.1.1.4.2. Motor Tipo Beta	5
1.1.1.4.3. Motor Tipo Gamma	6
1.2. Principio de funcionamiento del motor Stirling	7

1.2.1.	Funcionamiento del motor Stirling con presión atmosférica.....	9
1.2.2.	Ciclo del motor Stirling	9
1.3.	Justificación	13
1.4.	Objetivos.....	14
1.4.1.	Objetivo General.....	14
1.4.2.	Objetivos Específicos	14
CAPÍTULO II.....		15
METODOLOGÍA.....		15
2.1.	Materiales	15
2.2.	Descripción de equipos e instrumentos aplicados	16
2.2.	Métodos	21
2.2.1.	Descripción de la metodología	21
2.3.	Ciclo de Carnot	24
2.3.1.	Eficiencia de Carnot.....	26
2.4.	Eficiencia térmica del motor Stirling.....	27
2.4.1.	Cálculo de la eficiencia del motor Stirling M16-V4-D	29
2.4.2.	Cálculo volumen mínimo de los cilindros (V_{min}).....	31
2.4.3.	Cálculo volumen máximo de los cilindros (V_{max}).....	31
2.4.4.	Cálculo de volumen específico (ν).....	32
2.4.5.	Cálculo de la masa del aire (m).....	32
2.5.	Análisis del ciclo ideal Stirling con los datos propuestos.....	33
2.5.1.	Cálculo para el proceso 1 - 2	33
2.5.2.	Calor de salida ($Q_{salida\ 1-2}$).....	34
2.5.3.	Cálculo para el proceso 2 - 3	34
2.5.4.	Calor en el regenerador ($Q_{reg\ 2-3}$).....	35
2.5.5.	Cálculo para el proceso 3 - 4	35

2.5.6.	Calor de entrada ($Q_{\text{entrada } 3-4}$).....	36
2.5.7.	Cálculo para el proceso 4 - 1	36
2.5.8.	Calor en el regenerador ($Q_{\text{reg } 4-1}$).....	37
2.5.9.	Trabajo neto (W_{neto})	37
2.5.10.	Eficiencia térmica (η_{ter}).....	37
2.5.11.	Potencia del motor (P_m).....	38
2.5.12.	Eficiencia de Carnot (η_{Carnot}).....	38
2.6.	Modelamiento del motor Stirling M16-V4-D usando software CAD.....	38
2.6.1.	Foco caliente.....	39
2.6.2.	Foco frío.....	41
2.6.3.	Pistón de potencia.....	42
2.6.4.	Volante de inercia.....	43
2.6.5.	Biela.....	44
2.6.6.	Poleas y banda de goma.....	44
2.6.7.	Extensión (Pistón – Biela)	45
2.6.8.	Soporte principal.....	46
2.6.9.	Soporte para el eje.....	46
2.6.10.	Eje.....	47
2.6.11.	Generador y LED.....	47
2.6.12.	Placa base.....	49
2.6.13.	Mechero de alcohol.....	49
2.6.14.	Armado del motor Stirling M16-V4-D.....	51
2.7.	Análisis mediante software de elementos finitos el comportamiento mecánico y termodinámico del motor Stirling.	52
	CAPÍTULO III.....	59
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59

CAPÍTULO IV	63
RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	63
4.1. Conclusiones.....	63
4.2. Recomendaciones	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de Motores Stirling.....	7
Tabla 2. Parámetros del motor.....	30
Tabla 3. Parámetros del Aire.	30
Tabla 4. Propiedades térmicas y físicas del Acero inoxidable 304.	40
Tabla 5. Propiedades térmicas y físicas del Latón.....	41
Tabla 6. Propiedades térmicas y físicas del acero AISI 52100.....	43
Tabla 7. Mediciones de la evaluación del motor.	59
Tabla 8. Resultados experimentales de la eficiencia del motor prototipo.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Máquina Térmica [2].....	3
Figura 2. Motor de combustión externa [4].	4
Figura 3. Motor Stirling Tipo Alfa [5].....	5
Figura 4. Motor Stirling Tipo Beta [5].	6
Figura 5. Motor Stirling Tipo Gamma [6].	6
Figura 6. Funcionamiento del motor Stirling [7].....	9
Figura 7. Diagrama P-v correspondiente al ciclo Stirling [8].....	10
Figura 8. Calentamiento de aire dentro del cilindro [9].....	11
Figura 9. Enfriamiento de aire dentro del cilindro [9].....	12
Figura 10. Conversión de la expansión del gas en movimiento [9].....	12
Figura 11. Conversión de la compresión del gas en movimiento [9].	12
Figura 12. Computador Portátil.	16
Figura 13. Motor Stirling M16-V4-D.	17
Figura 14. Tacómetro TESTO 470.	19
Figura 15. Pirómetro CEM DT-8867H.....	20
Figura 16. Descripción de la metodología del proyecto.	21
Figura 17. Diagrama P – v. Ciclo de Carnot.....	24
Figura 18. Ciclo ideal Stirling.	33
Figura 19. Cilindro foco caliente.	39
Figura 20. Base del cilindro.....	40
Figura 21. Cilindro foco frío.....	41
Figura 22. Base superior.	42
Figura 23. Pistón de potencia.....	42
Figura 24. Volante de inercia.....	43
Figura 25. Biela.	44
Figura 26. Polea.	45
Figura 27. Banda de goma.	45
Figura 28. Extensión entre el pistón y la biela.....	45
Figura 29. Soporte principal.	46
Figura 30. Soporte para el eje.	46
Figura 31. Eje.....	47
Figura 32. Generador.	48

Figura 33. LED.	48
Figura 34. Placa base.	49
Figura 35. Cuerpo del mechero de alcohol.	50
Figura 36. Tapa del mechero de alcohol.	50
Figura 37. Mechero.	50
Figura 38. Ensamble total del motor prototipo.	51
Figura 39. Render del ensamble total del motor Stirling M16-V4-D.	51
Figura 40. Condiciones iniciales.	52
Figura 41. Presión inicial del cilindro de 100000 Pa.	53
Figura 42. Temperatura del cilindro 325,15 K.	53
Figura 43. Análisis de la presión en la fase de compresión.	54
Figura 44. Análisis de la temperatura en la fase de compresión.	54
Figura 45. Análisis de la presión máxima.	55
Figura 46. Análisis de la temperatura en el punto 3 a 4.	55
Figura 47. Análisis de la presión del 3 a 4.	56
Figura 48. Análisis de la temperatura fase final.	56
Figura 49. Análisis de la presión del punto 4 - 1.	57
Figura 50. Eficiencia (%) vs Temperatura Alta (K).	61
Figura 51. Eficiencia vs Temperatura Baja.	61

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo aborda una importante problemática que restringía las posibilidades de investigación en el Laboratorio de Física de la Carrera de Mecánica: la ausencia de un motor Stirling. Esta carencia limita la realización de experimentos y estudios relacionados con máquinas térmicas avanzadas. Para solucionar este inconveniente, se llevó a cabo un análisis experimental exhaustivo del motor Stirling M16-V4-D, con el objetivo de evaluar su potencia de salida y eficiencia térmica en diferentes condiciones.

Los resultados obtenidos a través de los experimentos proporcionaron una valiosa referencia para comprender el comportamiento y el rendimiento real del motor. Sin embargo, para obtener una visión más completa, también se recurrió a simulaciones computacionales que modelaron el funcionamiento del motor bajo diversas situaciones y condiciones.

Los hallazgos del análisis experimental y las simulaciones computacionales demostraron que el motor Stirling M16-V4-D era una opción prometedora para el Laboratorio de Física. Su eficiencia y capacidad para operar con fuentes de calor externas lo hacían ideal para su implementación en dicho laboratorio. Al resolver la problemática inicial, este motor se convirtió en una valiosa herramienta educativa e investigativa para estudiantes y profesores.

Gracias a la incorporación del motor Stirling, los proyectos académicos y las prácticas en el campo de la termodinámica y las máquinas térmicas se enriquecieron considerablemente. Los estudiantes ahora tendrán la oportunidad de trabajar con una tecnología avanzada que les permitirá realizar investigaciones más complejas y profundizar en el estudio de máquinas térmicas, abriendo así nuevas posibilidades para la innovación y el desarrollo en este campo.

Palabras claves: Motor Stirling, análisis experimental, potencia de salida, eficiencia térmica, simulación computacional, termodinámica, máquinas térmicas.

ABSTRACT

This work addresses an important issue that limited research possibilities in the Physics Laboratory of the Mechanical Engineering Department: the absence of a Stirling engine. This deficiency restricts the execution of experiments and studies related to advanced thermal machines. To solve this problem, a comprehensive experimental analysis of the M16-V4-D Stirling engine was carried out, with the aim of evaluating its output power and thermal efficiency under different conditions.

The results obtained from the experiments provided valuable insight into understanding the behavior and actual performance of the engine. However, to obtain a more complete view, computational simulations were also employed to model the engine's operation under various situations and conditions.

The findings from the experimental analysis and computational simulations demonstrated that the M16-V4-D Stirling engine was a promising choice for the Physics Laboratory. Its efficiency and ability to operate with external heat sources made it ideal for implementation in the said laboratory. By addressing the initial issue, this engine became a valuable educational and research tool for students and professors.

Thanks to the incorporation of the Stirling engine, academic projects and practices in the field of thermodynamics and thermal machines have significantly enriched. Students will now have the opportunity to work with advanced technology that will allow them to conduct more complex research and delve deeper into the study of thermal machines, thus opening up new possibilities for innovation and development in this field.

Keywords: Stirling engine, experimental analysis, output power, thermal efficiency, computational simulation, thermodynamics, thermal machines.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En la actualidad, las universidades dedican gran parte de sus recursos a mejorar el aprendizaje de sus estudiantes, fortaleciendo la investigación, las prácticas en laboratorios y la capacitación en nuevas tecnologías. De esta manera, los estudiantes tienen la oportunidad de adquirir una formación teórico-práctica de alta calidad, lo que les permite desarrollar y demostrar todas sus habilidades y destrezas. Como resultado, las industrias reciben profesionales altamente competentes que pueden aportar al crecimiento y desarrollo de sus respectivas áreas [1].

Los laboratorios son una de las fuentes más ricas de conocimiento, ya que permiten la aplicación práctica de las teorías aprendidas en las aulas. En este proyecto, se ha adquirido un prototipo de motor Stirling que estará disponible en el laboratorio de física de la Universidad Técnica de Ambato en Tungurahua. La finalidad es brindar a los estudiantes la oportunidad de reconocer y consolidar sus conocimientos a través de una práctica guiada por el docente. Este tipo de experiencia en el laboratorio es fundamental para que los estudiantes puedan desarrollar habilidades prácticas y mejorar su comprensión de los conceptos teóricos. Con la implementación de este prototipo en el laboratorio, se espera que los estudiantes puedan profundizar en su aprendizaje y tener una formación más completa y enriquecedora [1].

Aunque el motor Stirling ha sido objeto de investigación durante décadas, su desarrollo y aplicación han sido limitados en comparación con los motores y combustibles convencionales. En la actualidad, existe una tendencia creciente hacia el uso de energías renovables y la implementación de medidas de ahorro energético, lo que ha generado un renovado interés en esta tecnología sostenible. En este contexto, el motor Stirling se presenta como una alternativa viable en pequeñas centrales de energía solar termoeléctrica para poblaciones aisladas [1].

A pesar de sus ventajas como un motor altamente eficiente y no contaminante, todavía no se ha logrado desarrollar un motor Stirling lo suficientemente pequeño y potente

para competir con otras tecnologías en aplicaciones más amplias, como en la y se espera que su potencial en áreas como la generación de energía y la refrigeración siga siendo explorado en el futuro [1].

Si en los próximos años se logra un mayor desarrollo de esta tecnología, el motor Stirling podría convertirse en una alternativa competitiva en diversas áreas, como la generación de energía eléctrica o la propulsión de vehículos en la automoción. Aunque actualmente existen limitaciones en términos de tamaño y potencia, el potencial del motor Stirling para ser una fuente de energía renovable y sostenible lo hace una tecnología prometedora. De continuar el avance en su investigación y desarrollo, se podrían encontrar nuevas aplicaciones para esta tecnología que permitan aprovechar al máximo su eficiencia y bajo impacto ambiental [1].

1.1.1. Fundamentación Teórica

1.1.1.1. Máquina térmica

Una máquina térmica es un conjunto de elementos que interactúan entre sí para convertir el calor en trabajo mecánico. El proceso se lleva a cabo a través de un ciclo termodinámico cerrado, en el que el calor se transfiere desde un cuerpo a alta temperatura hacia otro a baja temperatura, ganando y perdiendo calor en las diferentes etapas del ciclo. Al final del ciclo, la máquina vuelve al estado inicial sin haber sufrido cambios permanentes, aunque pueden haber ocurrido cambios temporales durante el proceso. Si en cambio se utiliza el ciclo inverso, utilizando trabajo para aumentar la energía interna del fluido, la máquina se convierte en una máquina térmica generadora [2].

Es importante destacar que estas máquinas funcionan con fluidos compresibles y producen un trabajo total positivo mientras intercambian calor a través de sus límites [2].

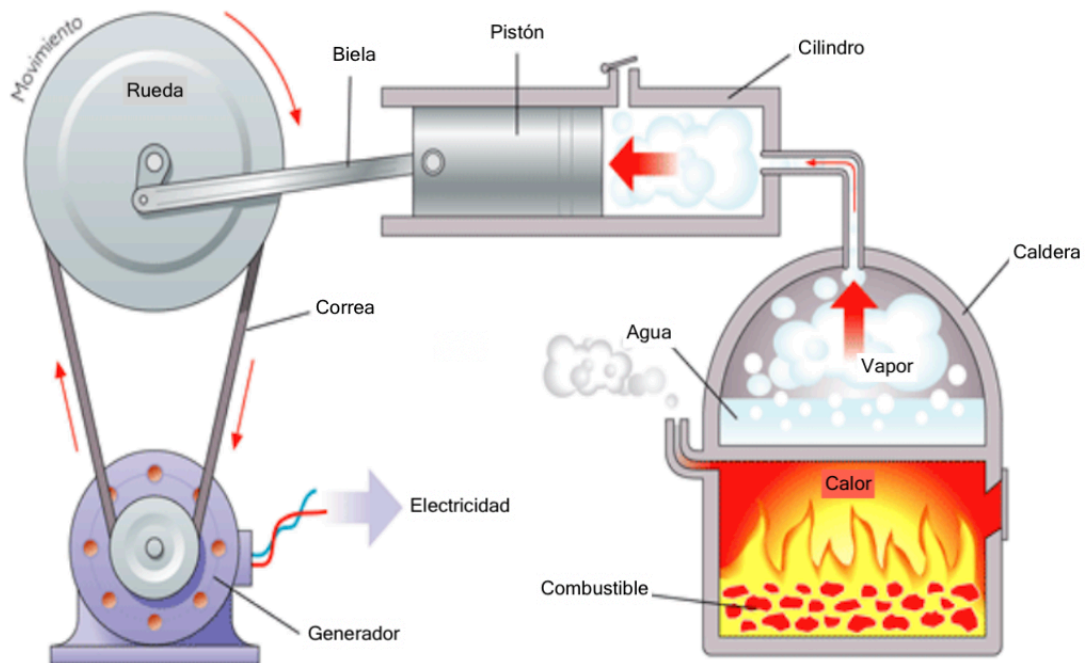


Figura 1. Máquina Térmica [2].

La segunda ley de la termodinámica establece que es imposible que una máquina térmica convierta en energía mecánica todo el calor que se transfiere durante su operación como se muestra en la figura 2. A partir de esta ley se introduce el concepto de eficiencia térmica (η), que se define como la relación entre el trabajo obtenido y el calor suministrado [2].

1.1.1.2. Motor de combustión externa

Las máquinas térmicas de combustión son aquellas que utilizan combustibles o la energía solar para calentar los fluidos de trabajo y así convertir la energía calorífica en energía mecánica como se muestra en la figura 2. Estas máquinas operan en un entorno abierto y están diseñadas para producir calor con una emisión reducida de contaminantes [3].

En los motores de combustión externa, como el ciclo termodinámico Stirling, también se puede utilizar gas como fluido de trabajo. Los gases más comunes utilizados son el aire, el hidrógeno y el helio [3].

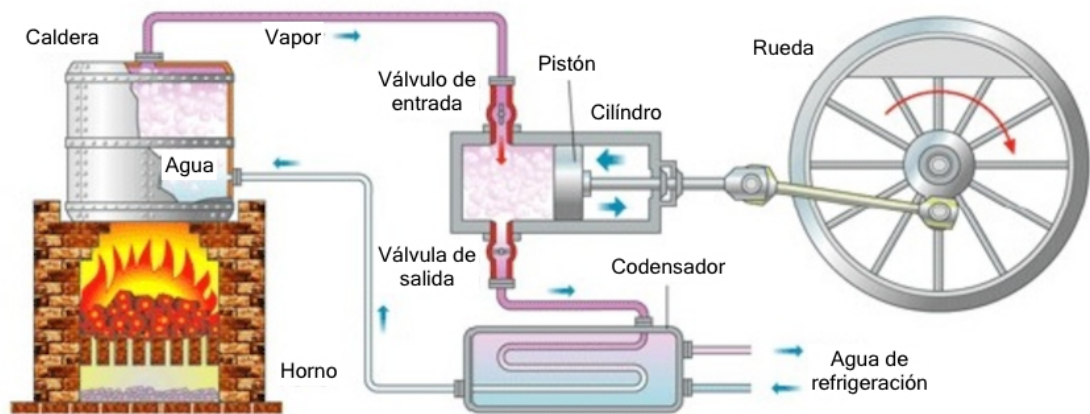


Figura 2. Motor de combustión externa [4].

1.1.1.3. Motor Stirling

Un motor de combustión externa es una máquina capaz de aprovechar diversas fuentes de energía, como el calor residual de origen industrial, fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles, la combustión de diferentes tipos de materiales, la energía solar térmica, el uso de la biomasa, la energía geotérmica e incluso la energía generada en procesos de fisión nuclear. Este motor tiene la capacidad de convertir el trabajo en calor o viceversa a través de un ciclo termodinámico regenerativo, que incluye la compresión y expansión cíclica de un fluido de trabajo, como el helio, hidrógeno, nitrógeno o aire, que se encuentra contenido en el interior del motor. El ciclo se produce entre dos temperaturas, la del foco frío y la del foco caliente, y es necesario que exista una diferencia de temperaturas entre los dos focos [5].

1.1.1.4. Tipos de motores Stirling

Aunque todos los motores Stirling operan de manera similar, se pueden clasificar en diferentes tipos en función de la posición del pistón de potencia y del desplazador.

Estos tipos son:

- Motor Stirling Tipo Alfa
- Motor Stirling Tipo Beta
- Motor Stirling Tipo Gamma

1.1.1.4.1. Motor Tipo Alfa

El motor RIDER, diseñado en Estados Unidos, consta de dos cilindros independientes conectados por un tubo en el que se sitúa el regenerador, encargado de almacenar y ceder calor. Cada uno de los cilindros tiene un pistón que se mueve desfasado 90 grados con respecto al otro como se puede observar en la figura 3.

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

Debido al desfase entre los dos pistones, el aire pasa de un cilindro a otro, calentándose o enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor [5].

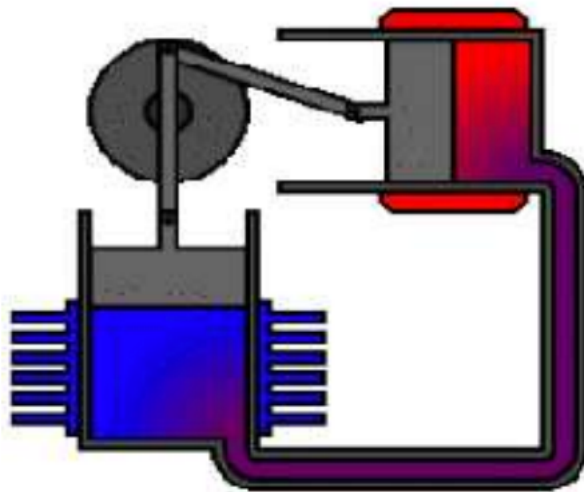


Figura 3. Motor Stirling Tipo Alfa [5].

1.1.1.4.2. Motor Tipo Beta

En la figura 4, se muestra el motor Stirling original consta de un cilindro con una zona caliente y una zona fría. En el interior del cilindro se encuentra el pistón desplazador, cuya misión es mover el aire de la zona fría a la caliente o viceversa.

En los motores pequeños, generalmente no se utiliza un regenerador, sino que se deja una pequeña holgura entre el pistón desplazador y el cilindro para permitir el paso del aire. El pistón de trabajo y el pistón desplazador están desfasados 90 grados y están conectados mediante dos bielas [5].

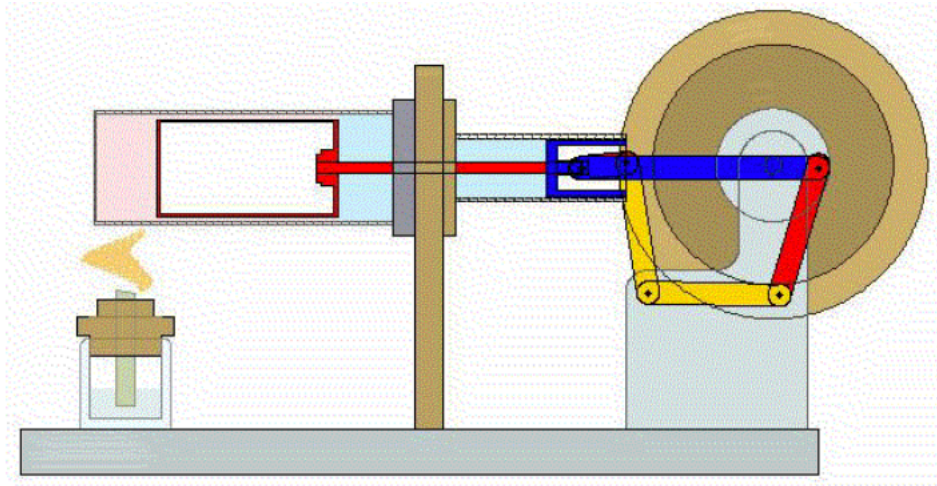


Figura 4. Motor Stirling Tipo Beta [5].

1.1.1.4.3. Motor Tipo Gamma

Este motor es una variante del motor beta, pero se diferencia en que posee dos cilindros separados unidos por un cigüeñal. Uno de los cilindros alberga el desplazador, mientras que en el otro se encuentra el pistón de potencia, ambos desfasados 90 grados tal como se observa en la figura 6 [6].

Los sistemas de enfriamiento y calentamiento son idénticos a los del motor beta, pero su potencia es menor y su eficiencia termodinámica es reducida debido a que la expansión de trabajo se realiza completamente a una temperatura más baja [6].

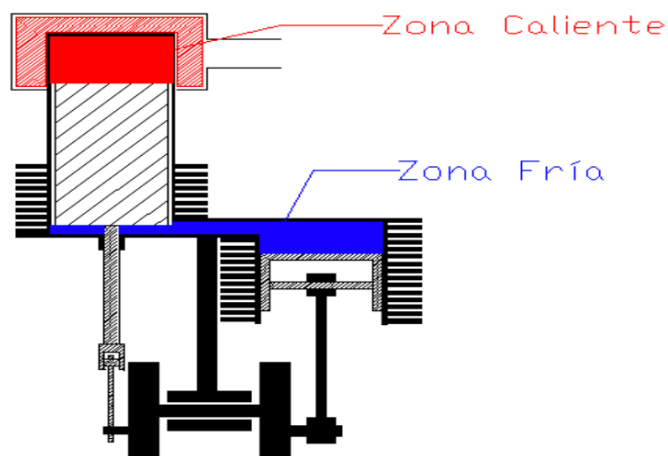


Figura 5. Motor Stirling Tipo Gamma [6].

A continuación, te presento una tabla comparativa de los tres tipos de motores Stirling.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de Motores Stirling

Tipo de motor	Ventajas	Desventajas
Alfa	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una alta relación entre potencia y volumen • Diseñado con mecanismos muy sencillos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es complicado sellar las cámaras de expansión y compresión.
Beta	<ul style="list-style-type: none"> • Es creado a partir del diseño original de Stirling. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede utilizar mecanismos complejos y grandes.
Gamma	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñado con mecanismos sencillos. • Las cámaras se pueden sellar de manera fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una relación de compresión baja.

1.2. Principio de funcionamiento del motor Stirling

El motor Stirling funciona aprovechando los cambios volumétricos del fluido de trabajo, que ocurren dentro de una cámara sellada, como resultado de los cambios de temperatura que experimenta. Estos cambios volumétricos son causados por el movimiento del fluido de trabajo entre la zona caliente y la zona fría en un cilindro cerrado [7].

El motor Stirling es un tipo de motor de ciclo cerrado que utiliza una masa fija de gas, conocido como "fluido de trabajo", comúnmente aire, hidrógeno o helio. Estos gases proporcionan mayor eficiencia del motor y energía a altas presiones. A diferencia de otros motores de pistón, el motor Stirling está sellado y no requiere válvulas [7].

El funcionamiento del motor Stirling se basa en cuatro procesos principales: enfriamiento, compresión, calentamiento y expansión. Estos procesos se logran moviendo el gas de ida y vuelta entre la zona fría y la zona caliente, a menudo mediante un regenerador ubicado entre el calentador y el enfriador [7].

Este motor es muy eficiente en la conversión de calor en energía mecánica, lo que lo hace ideal para su uso en aplicaciones sostenibles. Además, debido a su diseño sellado, el motor Stirling produce muy pocas emisiones, lo que lo hace más respetuoso con el medio ambiente que otros motores de combustión interna [7].

El intercambiador de calor de la zona caliente del motor Stirling está en contacto térmico con una fuente de calor externa, mientras que el intercambiador de calor de la zona fría está en contacto térmico con un disipador de calor externo, como las aletas de aire [7].

Cuando se produce un cambio en la temperatura del gas, esto provoca un cambio correspondiente en la presión del gas. A medida que el pistón se mueve dentro del cilindro, el gas se expande y se comprime alternativamente, lo que genera la energía mecánica necesaria para el funcionamiento del motor [7].

Este proceso de expansión y compresión del gas dentro del motor Stirling es lo que permite que el motor convierta el calor en energía mecánica de manera muy eficiente. Además, debido a que el motor Stirling funciona con un ciclo cerrado, no emite gases de escape, lo que lo hace más respetuoso con el medio ambiente que otros motores de combustión interna [7].

En el motor Stirling, cuando el gas dentro de la cámara sellada se calienta, su presión aumenta y actúa sobre el pistón para producir una carrera de trabajo. Por otro lado, cuando el gas se enfría, sufre una caída de presión, lo que significa que el pistón necesita menos esfuerzo para comprimir el gas en la carrera de retorno [7].

Este proceso de expansión y compresión del gas permite que el motor Stirling genere una potencia de salida neta. Al aprovechar los cambios de temperatura y presión del gas, el motor Stirling convierte la energía térmica en energía mecánica de manera muy eficiente [7].

Además, debido a su diseño sellado, el motor Stirling produce muy pocas emisiones, lo que lo hace más respetuoso con el medio ambiente que otros motores de combustión interna [7].

1.2.1. Funcionamiento del motor Stirling con presión atmosférica

En el caso de un motor Stirling en el que uno de los lados del pistón está abierto a la atmósfera, el funcionamiento es ligeramente diferente. A medida que el gas sellado dentro del motor entra en contacto con la zona caliente, se expande, realizando trabajo tanto en el pistón como en la atmósfera [7].

Por otro lado, cuando el gas entra en contacto con la zona fría, su presión cae por debajo de la presión atmosférica, lo que provoca que la atmósfera empuje el pistón y realice trabajo sobre el gas. De esta manera, se genera la energía mecánica necesaria para el funcionamiento del motor [7].

Es importante destacar que el motor Stirling es muy versátil y se puede diseñar para operar de diferentes maneras según las necesidades específicas de una aplicación determinada. De hecho, esta flexibilidad es una de las principales ventajas del motor Stirling en comparación con otros motores térmicos [7].

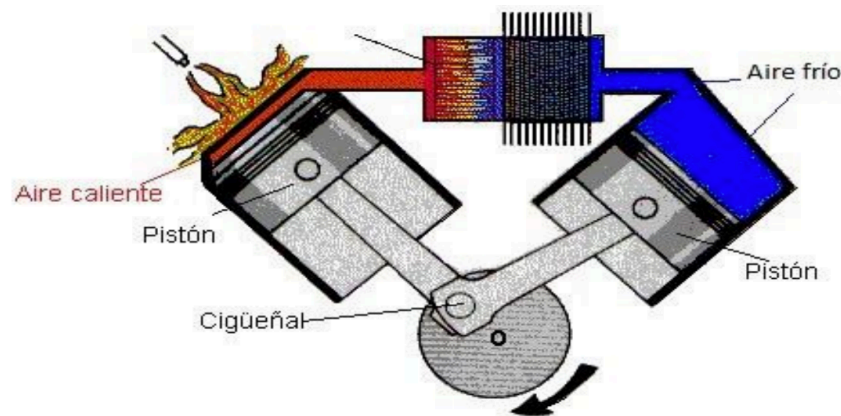


Figura 6. Funcionamiento del motor Stirling [7].

1.2.2. Ciclo del motor Stirling

El motor Stirling funciona mediante la utilización de la diferencia de temperatura entre su zona caliente y su zona fría para establecer un ciclo en una masa fija de gas, que se calienta y se expande, y posteriormente se enfría y se comprime. De esta manera, se produce la conversión de energía térmica en energía mecánica [8].

Es importante destacar que cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre las fuentes caliente y fría, mayor será la eficiencia térmica del motor Stirling. Aunque su eficiencia teórica máxima es equivalente a la del ciclo de Carnot, la eficiencia de los motores reales es menor debido a la fricción y otras pérdidas [8].

No obstante, a pesar de estas limitaciones, el motor Stirling sigue siendo una alternativa interesante para una amplia variedad de aplicaciones debido a su fiabilidad, bajo nivel de ruido y vibración, y su capacidad para funcionar con una amplia variedad de combustibles. Además, el motor Stirling es considerado una tecnología respetuosa con el medio ambiente, ya que no emite gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos [8].

En la figura 7, se muestra los procesos dentro del ciclo ideal termodinámico Stirling cuando:

- Calentamiento del aire \longrightarrow Aumento de presión
- Enfriamiento del aire \longrightarrow Disminución de presión

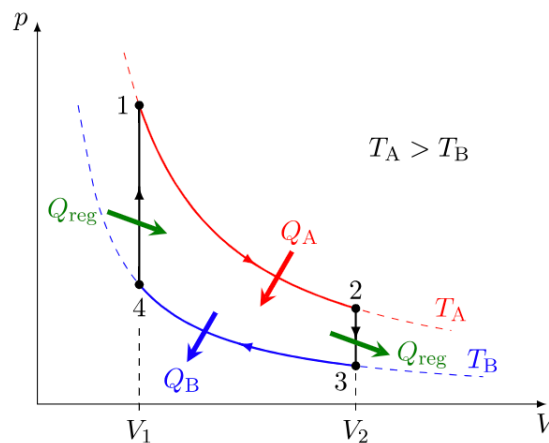


Figura 7. Diagrama P-v correspondiente al ciclo Stirling [8].

En la misma figura 7 se muestra el diagrama P-v del ciclo Stirling, el cual se configura de cuatro procesos que pueden ser reversibles en su totalidad.

Estos procesos son los siguientes:

- 1-2 Expansión a $T = \text{constante}$ (obtiene calor de una fuente caliente externa)
- 2-3 Regeneración a $v = \text{constante}$ (transfiere el calor interno del fluido de trabajo al regenerador)
- 3-4 Compresión a $T = \text{constante}$ (la fuente fría cede calor al exterior)
- 4-1 Regeneración a $v = \text{constante}$ (el gas absorbe calor del regenerador, aumenta su temperatura y presión)

El principio de funcionamiento del motor Stirling se muestra a continuación:

1. Cuando se introduce aire en un cilindro y se calienta, la temperatura del aire aumenta y, como resultado, su presión también se incrementa. Si una de las tapas del cilindro es un pistón hermético, el aire ejerce una fuerza sobre él, provocando su movimiento. Este movimiento del pistón permite que el gas se expanda y aumente su volumen dentro del cilindro hasta alcanzar una posición final determinada [9].



Figura 8. Calentamiento de aire dentro del cilindro [9].

2. Si el cilindro con el aire en su estado de expansión se enfría rápidamente, la temperatura del gas disminuye y, como resultado, su presión también se reduce. Entonces, el pistón se mueve hacia su posición inicial debido a la disminución de la fuerza ejercida por el gas sobre él como se muestra en la figura 9. Esta contracción del volumen interior del cilindro lleva al gas a su estado inicial y el pistón regresa a su posición original [9].

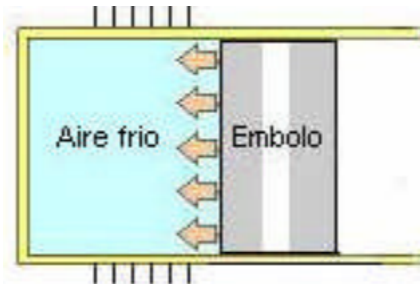


Figura 9. Enfriamiento de aire dentro del cilindro [9].

3. Si repetimos el proceso del estado 1, pero ahora conectando el émbolo a un volante, el aumento de la presión hará que el émbolo se mueva y provoque la rotación del volante. De esta manera, se logra convertir el cambio volumétrico en movimiento.

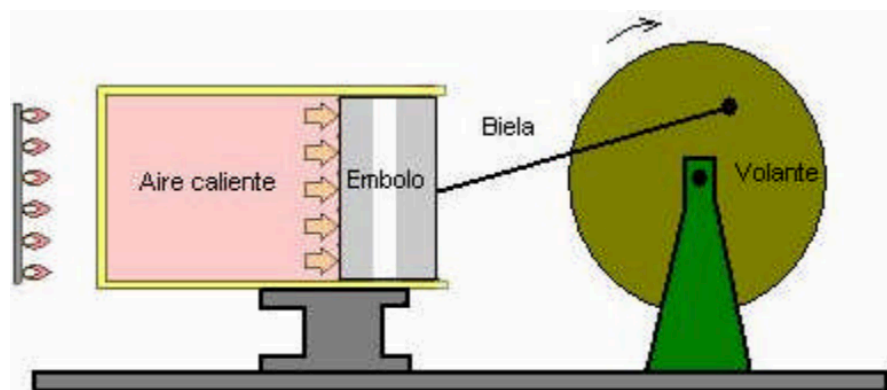


Figura 10. Conversión de la expansión del gas en movimiento [9].

4. Si se repite el proceso del estado 2, y se enfría rápidamente el cilindro, el pistón regresa a su posición inicial gracias al efecto del movimiento del volante, lo que produce una disminución en la presión y el volumen del gas.

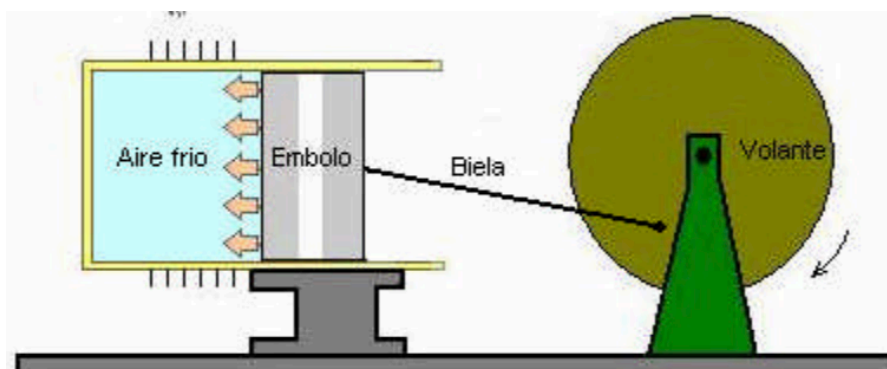


Figura 11. Conversión de la compresión del gas en movimiento [9].

En los motores, la cantidad de gas en su interior es fija y no debe variar. Si por alguna razón esta cantidad de gas varía, el circuito no funcionará adecuadamente debido a la pérdida de compresión y, por consiguiente, de energía [9].

1.3. Justificación

A mediados del siglo XX se comenzaron a desarrollar nuevas propuestas para la creación de sistemas en los cuales la energía se pudiese producir de manera más eficiente y sostenible ambientalmente, con el fin de reducir el consumo energético de la población y disminuir las emisiones de efecto invernadero ocasionadas por el uso de combustibles fósiles. [10]

Esta situación llevo a buscar métodos para aprovechar diferentes clases de energía, tales como fuentes energéticas disponibles en el ambiente, que se pueden aprovechar para la generación de energía mecánica. Estas se basan en que la generación energética depende de la corriente del viento, radiación solar, el calor de la tierra, el caudal del agua, entre otras. [11]

De acuerdo con lo anterior y con el fin de obtener energía gracias a una fuente térmica, se realiza el estudio de transferencia de calor calculando la eficiencia y diferentes aspectos característicos del motor, con el fin de validar que material es más apto para ser implementado como intercambiador de calor. [11]

Hoy en día la investigación sobre el motor Stirling y sus posibles aplicaciones no está muy desarrollada, ya que los motores y combustibles convencionales han ganado terreno a lo largo de las décadas. Además, no se ha obtenido un motor lo suficientemente pequeño y potente para reemplazar a otras tecnologías en muchas aplicaciones, como en la automoción. Sin embargo, comienza a verse una tendencia al uso de energías renovables y una implementación de medidas de ahorro energético. En este ámbito, el motor Stirling se presenta como una alternativa tecnológica sostenible que se está comenzando a implementar principalmente en pequeñas centrales de energía solar termoelectrica para poblaciones aisladas. [12]

Si el desarrollo de esta tecnología cobra más importancia en los próximos años, ésta se podrá convertir en una alternativa competente en muchas áreas, como en la generación eléctrica o en la automoción de vehículos. [13]

La poca actividad que se realiza en nuestro país referente a la construcción de motores de ciclo Stirling, se lleva a cabo de manera experimental, de esta manera es muy difícil establecer condiciones óptimas de operación, ya que es complejo y laborioso estudiar a detalle el comportamiento de la presión y la temperatura, en las cámaras de calentamiento.

Enfriamiento y regenerador de este tipo de motores, parámetros de vital importancia en el diseño térmico, ante tal situación es necesario contar con un estudio térmico que nos permita estudiar a detalle los parámetros ya mencionados.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar experimental y computacionalmente de la eficiencia del motor Stirling M16- V4-D para el laboratorio de física de la Carrera de Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Evaluar experimentalmente la eficiencia del prototipo de motor Stirling modelo M16-V4-D.
- Modelar el motor Stirling utilizando software CAD.
- Analizar mediante software de elementos finitos el comportamiento mecánico y termodinámico del motor Stirling.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo experimental, se usará una metodología secuenciada ordenada que permitirá tanto al docente y al alumno cumplir con los objetivos establecidos. Las tres etapas de enfoque son: adquirir el motor para su evaluación experimental, uso de software para modelar y simular el comportamiento del motor y finalmente realizar un análisis del diseño mecánico del motor Stirling.

En la primera etapa se obtendrá el motor Stirling M16-V4-D para evaluar experimentalmente su comportamiento. También se considera investigar profundamente acerca de los antecedentes del motor y como es su funcionamiento.

La segunda etapa se centra en el uso de software específico para modelar cada una de las partes que conforman el motor, con esto se pretende conocer el funcionamiento mecánico de cada pieza que conforma el motor, con fines académicos se tendrá una base de datos para que los estudiantes tengan acceso a los diferentes elementos que tiene el motor Stirling así mismo puedan practicar el ensamble de piezas dentro del software CAD.

En la tercera etapa se realizará un análisis del comportamiento mecánico y termodinámico del motor Stirling mediante software de elementos finitos, con ello se pretende conocer las características del motor las cuales pueden relacionarse con su eficiencia.

2.1. Materiales

Para realizar experimentos y mediciones de temperatura en un motor Stirling M16-V4-D, necesitarás los siguientes materiales:

- Motor Stirling M16-V4-D
- Laboratorio FICM
- Tacómetro

- Pirómetro
- Alcohol 96%
- Encendedor
- Equipo de protección personal

2.2. Descripción de equipos e instrumentos aplicados

La descripción de equipos e instrumentos aplicados se refiere a la explicación detallada de los dispositivos utilizados en un experimento o investigación científica. Esta descripción proporciona información sobre las características, funciones y especificaciones técnicas de los equipos e instrumentos utilizados en el estudio.

Computador portátil

Se trata de un dispositivo informático altamente portátil, diseñado para facilitar el modelado mecánico en software CAD y simulaciones en software de elementos finitos. Su portabilidad y potencia lo convierten en una herramienta imprescindible para profesionales y entusiastas de la ingeniería y el diseño. En la figura 12 se puede apreciar una imagen de referencia de este importante equipo.



Figura 12. Computador Portátil.

Motor Stirling M16-V4-D

El motor Stirling M16-V4-D fabricado por Sunnytech es un dispositivo de generación de energía térmica que opera según el ciclo Stirling. Este tipo de motor se basa en la expansión y contracción de un fluido, generalmente aire o gas, dentro de un sistema cerrado.

El motor Stirling M16-V4-D se caracteriza por los siguientes aspectos:

1. Diseño y construcción: El motor tiene un diseño compacto y está construido con materiales de alta calidad para garantizar su durabilidad y rendimiento. Suele estar compuesto por cilindros, pistones y un volante de inercia.
2. Configuración: El motor M16-V4-D tiene una configuración de 4 cilindros en V, lo que le proporciona una mayor eficiencia y potencia en comparación con los motores Stirling de un solo cilindro.
3. Fuente de calor: El motor Stirling M16-V4-D puede ser alimentado por una variedad de fuentes de calor, como quemadores de gas, energía solar, energía geotérmica o cualquier otra fuente térmica disponible.
4. Generación de energía: Este motor puede transformar la energía térmica en energía mecánica mediante el movimiento alternativo de los pistones. El movimiento del volante de inercia puede ser utilizado para accionar dispositivos mecánicos o generar electricidad mediante un generador acoplado.
5. Eficiencia y bajo impacto ambiental: Los motores Stirling son conocidos por su alta eficiencia térmica y su baja emisión de contaminantes, lo que los convierte en una opción favorable desde el punto de vista ambiental.



Figura 13. Motor Stirling M16-V4-D.

Tacómetro TESTO 470

El tacómetro Testo 470 es un instrumento de medición utilizado para determinar la velocidad de rotación de objetos en movimiento, como motores, máquinas y dispositivos industriales. El Testo 470 ofrece una precisión y fiabilidad excepcionales en sus mediciones, lo que lo convierte en una herramienta popular en aplicaciones industriales y de mantenimiento.

Características principales del tacómetro Testo 470:

1. **Rango de medición amplio:** El Testo 470 es capaz de medir velocidades de rotación en un rango amplio, lo que permite su uso en diversas aplicaciones. Puede medir desde velocidades bajas, como RPM (revoluciones por minuto) de motores pequeños, hasta velocidades más altas, como RPM de maquinaria industrial de gran escala.
2. **Mecanismo de medición sin contacto:** El tacómetro Testo 470 utiliza un mecanismo de medición sin contacto, lo que significa que no es necesario que el instrumento entre en contacto directo con el objeto en movimiento. Esto facilita la medición y minimiza el riesgo de daños o lesiones.
3. **Pantalla retroiluminada:** El instrumento está equipado con una pantalla retroiluminada de alta visibilidad, lo que permite una lectura clara y precisa incluso en condiciones de iluminación desfavorables.
4. **Funciones adicionales:** El Testo 470 ofrece características adicionales para mejorar la experiencia de uso. Esto puede incluir la capacidad de almacenar y recuperar mediciones, funciones de valor mínimo y máximo, así como opciones para configurar unidades de medida específicas según las necesidades del usuario.
5. **Diseño ergonómico y resistente:** El diseño del Testo 470 se enfoca en la comodidad del usuario y en su durabilidad. El instrumento es liviano, fácil de sostener y cuenta con una carcasa resistente que protege contra golpes y vibraciones en entornos industriales.



Figura 14. Tacómetro TESTO 470.

Pirómetro digital CEM DT-8867H

El pirómetro digital CEM DT-8867H es un dispositivo de medición de temperatura sin contacto diseñado para ofrecer mediciones precisas y rápidas en diversas aplicaciones industriales y domésticas. Este pirómetro utiliza la tecnología de infrarrojos para medir la temperatura de objetos y superficies sin necesidad de contacto físico.

Características principales del pirómetro digital CEM DT-8867H:

1. **Medición sin contacto:** El DT-8867H permite la medición de temperatura sin tener que hacer contacto directo con el objeto. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde el contacto físico no es posible o deseado, o cuando se trata de objetos calientes o en movimiento.
2. **Rango de temperatura amplio:** El pirómetro puede medir temperaturas en un rango amplio, desde temperaturas bajas hasta altas. Esto lo hace adecuado para diversas aplicaciones, como control de calidad, mantenimiento industrial, HVAC, procesos de fabricación, seguridad y muchas otras.
3. **Alta precisión y respuesta rápida:** El DT-8867H ofrece una alta precisión en sus mediciones, lo que garantiza resultados confiables. Además, su respuesta rápida permite obtener lecturas casi instantáneas, lo que es especialmente útil en situaciones donde el tiempo es crucial.

4. Pantalla retroiluminada: El pirómetro está equipado con una pantalla LCD retroiluminada, lo que facilita la lectura de las mediciones incluso en condiciones de poca iluminación.
5. Funciones adicionales: El CEM DT-8867H puede ofrecer funciones adicionales, como la capacidad de retención de lectura (hold) para facilitar la toma de datos, ajuste de emisividad para adaptarse a diferentes superficies, y selección de unidades de temperatura (Celsius o Fahrenheit).
6. Diseño ergonómico y duradero: El pirómetro cuenta con un diseño ergonómico y compacto que permite un manejo cómodo y seguro. Además, está construido con materiales duraderos y de alta calidad, lo que lo hace resistente a condiciones ambientales adversas.



Figura 15. Pirómetro CEM DT-8867H.

2.2. Métodos

2.2.1. Descripción de la metodología

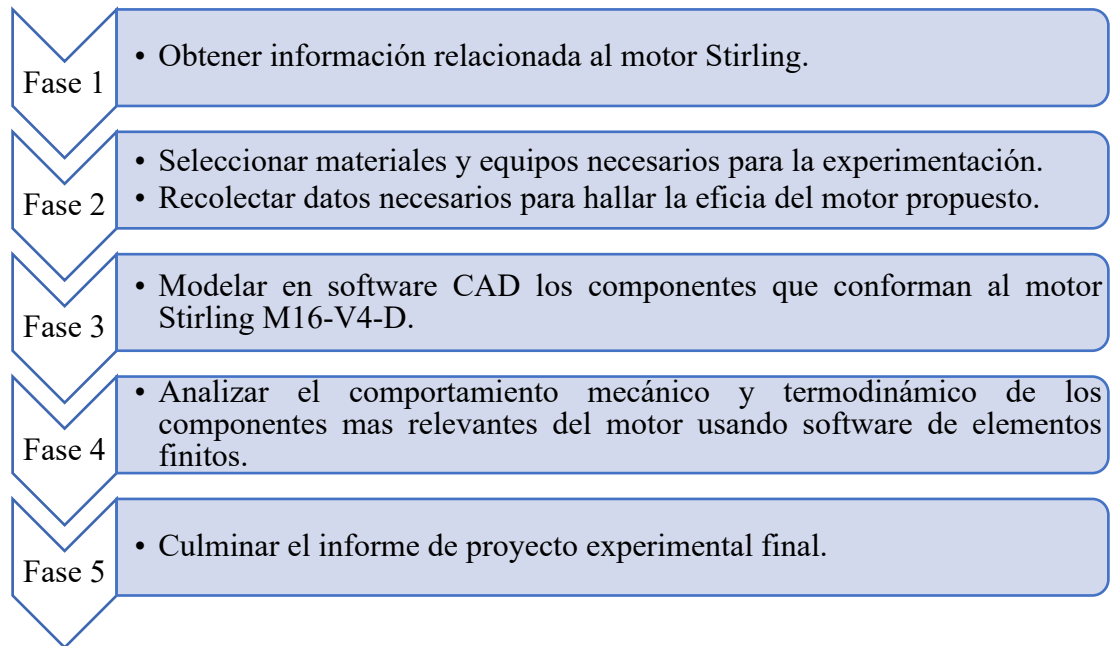


Figura 16. Descripción de la metodología del proyecto.

Fase 1: En la primera fase del proyecto, se llevará a cabo una exhaustiva exploración y análisis bibliográfico con el objetivo de obtener información relevante y asegurar un sólido desarrollo del marco teórico. Para lograrlo, se recopilará una amplia gama de fuentes, como libros, artículos científicos y documentos técnicos relacionados con el tema propuesto. Este proceso de recopilación y análisis permitirá obtener una base sólida de conocimientos y antecedentes para respaldar la investigación y comprender en profundidad el contexto temático.

Fase 2: Se llevará a cabo una selección de los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo la experimentación. Esta selección se basará en los requerimientos específicos del motor propuesto y en los criterios de eficiencia y confiabilidad.

Además, se realizará una exhaustiva recolección de datos que serán fundamentales para determinar la eficiencia del motor propuesto. Esta recolección de datos se realizará a través de diversas fuentes, como pruebas de rendimiento, mediciones de temperatura, análisis de componentes y cualquier otro parámetro relevante para evaluar la eficiencia del motor.

La recopilación de datos se llevará a cabo utilizando una variedad de técnicas y herramientas, como sensores de temperatura, medidores de flujo, equipos de análisis de gases y sistemas de adquisición de datos. Estos instrumentos permitirán obtener mediciones precisas y confiables que serán analizadas en profundidad.

El objetivo de esta fase es adquirir información sólida y relevante que servirá como base para evaluar y determinar la eficiencia del motor propuesto. La adecuada selección de materiales y equipos, junto con la recolección precisa de datos, garantizará un enfoque riguroso y preciso en el estudio de eficiencia del motor.

Fase 3: Se llevará a cabo el modelado en software CAD de los componentes que conforman el motor Stirling M16-V4-D. Este proceso de modelado permitirá crear representaciones digitales precisas y detalladas de cada componente del motor.

Para ello, se utilizará un software CAD especializado que proporciona herramientas y funciones específicas para el diseño y modelado de sistemas mecánicos. Cada componente, como cilindros, pistones, volante de inercia y otros elementos, será modelado con precisión, teniendo en cuenta las dimensiones, geometría y características técnicas correspondientes.

El modelado en CAD proporciona numerosas ventajas, ya que permite visualizar los componentes en 3D, realizar modificaciones y ajustes virtuales, evaluar la interferencia entre piezas y optimizar el diseño en términos de funcionamiento y ensamblaje.

Una vez que se hayan modelado todos los componentes, se procederá a la creación de un ensamblaje completo del motor en el software CAD. Esto permitirá verificar la compatibilidad y ajuste entre las diferentes partes, así como visualizar el funcionamiento general del motor.

Fase 4: En la etapa cuatro del proyecto, se llevará a cabo un análisis del comportamiento mecánico y termodinámico de los componentes más relevantes del motor utilizando software de elementos finitos. Este enfoque de análisis numérico

permite simular y evaluar el rendimiento de los componentes en condiciones de funcionamiento realistas.

Mediante el uso de software de elementos finitos, se creará un modelo virtual de los componentes clave del motor, como son el cilindro - pistón, biela y el volante de inercia. Este modelo tendrá en cuenta las propiedades de los materiales, geometría y condiciones específicas para simular su comportamiento.

El análisis de elementos finitos permitirá evaluar aspectos como tensiones, deformaciones, vibraciones en el volante de inercia y la biela. Esto proporcionará información crucial sobre la resistencia, durabilidad de los componentes mencionados.

Además, el software de elementos finitos facilitará la identificación de posibles áreas de mejora o puntos críticos en el diseño, lo que permitirá realizar ajustes virtuales y optimizar la geometría y las características de los componentes para lograr un mejor rendimiento global del motor.

Fase 5: En la fase final del proyecto experimental, se llevará a cabo la culminación del informe final. Este informe es el resultado de todo el trabajo de investigación, experimentación y análisis realizado a lo largo del proyecto.

El informe de proyecto experimental final será una documentación exhaustiva que recopilará y presentará de manera organizada todos los aspectos relevantes del proyecto. Incluirá una descripción detallada de los objetivos del proyecto, la metodología utilizada, los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas.

Además, el informe final contendrá análisis y discusiones sobre los datos recopilados durante la experimentación, así como una revisión crítica de los resultados obtenidos en comparación con los objetivos planteados inicialmente. También se abordarán posibles limitaciones o desafíos encontrados durante el proceso y se propondrán recomendaciones para futuros trabajos relacionados.

El informe final será redactado de manera clara y concisa, utilizando un lenguaje técnico apropiado para el campo de estudio. Se incluirán gráficos, tablas y otras representaciones visuales para respaldar y mejorar la comprensión de los resultados

La culminación del informe de proyecto experimental final no solo representa el final del trabajo, sino también una oportunidad para compartir los hallazgos y contribuir al conocimiento científico o técnico en el área de estudio específica en especial a los estudiantes de la Universidad Técnica de Ambato.

2.3. Ciclo de Carnot

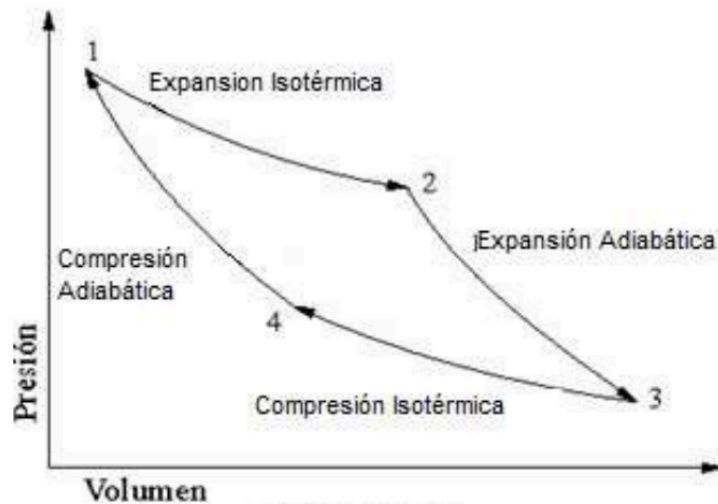


Figura 17. Diagrama P – v. Ciclo de Carnot.

La máquina térmica más eficiente entre un depósito de alta temperatura y uno de baja temperatura es la máquina de Carnot. Se trata de una máquina ideal que utiliza procesos reversibles en su ciclo de operación, lo que le confiere el nombre de máquina reversible. En este sentido, analizaremos la eficiencia de la máquina de Carnot y también exploraremos su operación en sentido inverso [14].

La máquina de Carnot resulta sumamente útil, ya que su eficiencia establece el límite máximo posible para cualquier máquina real. Si la eficiencia de una máquina real es

considerablemente menor que la eficiencia de una máquina de Carnot que opera en los mismos rangos de temperatura, se abren posibilidades para realizar mejoras [14].

Determinar la eficiencia de la máquina de Carnot nos permite comprender el rendimiento óptimo que podría alcanzar una máquina térmica en condiciones ideales. Asimismo, al evaluar su funcionamiento invertido, podemos explorar la viabilidad de emplearla como un refrigerador o una bomba de calor eficiente.

Usando la figura 17 como referencia, el ciclo de Carnot se compone de cuatro procesos reversibles que utilizan un gas ideal como sustancia de trabajo. Estos procesos son:

1-2 Expansión Isotérmica: Se realiza una transferencia de calor de manera reversible desde el depósito de alta temperatura hacia una temperatura constante T_H . Durante este proceso, el pistón ubicado en el cilindro es empujado, lo que provoca un aumento en el volumen del sistema.

2-3 Expansión Adiabática Reversible: El cilindro se encuentra completamente aislado, lo que implica que no hay transferencia de calor durante este proceso reversible. El pistón sigue siendo empujado, lo que resulta en un incremento en el volumen del sistema.

3-4 Compresión Isotérmica: Se realiza una transferencia de calor de manera reversible hacia el depósito de baja temperatura, manteniendo una temperatura constante T_L . Durante este proceso, el pistón comprime la sustancia de trabajo, lo que provoca una reducción en el volumen del sistema.

4-1 Compresión Adiabática Reversible: El cilindro se encuentra totalmente aislado, lo que impide cualquier transferencia de calor durante este proceso reversible. Mientras tanto, el pistón sigue comprimiendo la sustancia de trabajo hasta que se alcanzan nuevamente el volumen, la temperatura y la presión originales, completando así el ciclo.

El principio de conservación de la energía, que establece que la energía no puede ser creada ni destruida, solo puede ser transferida o convertida de una forma a otra. En el

caso de un sistema termodinámico, el trabajo y el calor son formas de transferencia de energía, y la igualdad entre la salida de trabajo neto y la transferencia neta de calor es una consecuencia directa de este principio.

$$W_{neto} = Q_H - Q_L \quad (1)$$

En el contexto de la transferencia de calor hacia el depósito de baja temperatura, se asume que Q_L tiene un valor positivo. Esta consideración nos permite expresar la eficiencia térmica del ciclo de Carnot de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (2)$$

2.3.1. Eficiencia de Carnot

Dado que la eficiencia de la máquina de Carnot se basa exclusivamente en las temperaturas de los dos depósitos, el propósito de esta sección es establecer dicha relación. Supondremos que la sustancia de trabajo es un gas ideal y procederemos a realizar los cálculos necesarios para los cuatro procesos involucrados. A continuación, se detalla para cada uno de ellos:

$$1-2 \quad Q_H = W_{1-2} = \int_{V_2}^{V_1} p dV = mRT_H \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

$$2-3 \quad Q_{2-3} = 0 \quad (4)$$

$$3-4 \quad Q_L = W_{3-4} = - \int_{V_3}^{V_4} p dV = -mRT_L \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (5)$$

$$4-1 \quad Q_{4-1} = 0 \quad (6)$$

Mientras ocurren los procesos adiabáticos reversibles 2-3 y 4-1:

$$\frac{T_L}{T_H} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{K-1} \quad (7)$$

$$\frac{T_L}{T_H} = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{K-1} \quad (8)$$

Por lo tanto, vemos que:

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4} \quad \text{o} \quad \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \quad (9)$$

Reconociendo que:

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = -\ln \frac{V_1}{V_2} \quad (10)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (11)$$

Reemplazando $\frac{Q_L}{Q_H}$ con $\frac{T_L}{T_H}$, podemos aplicar esta sustitución en todas las máquinas o refrigeradores reversibles. Observamos que la eficiencia térmica de una máquina de Carnot depende únicamente de la temperatura absoluta alta o baja de los depósitos. El uso de un gas ideal para realizar los cálculos no es relevante, ya que hemos demostrado que la eficiencia de Carnot es independiente de la sustancia de trabajo.

2.4. Eficiencia térmica del motor Stirling

La eficiencia del ciclo se define como la relación entre el trabajo neto realizado y el calor suministrado. A continuación, se detalla la transferencia de calor para cada uno de los cuatro procesos involucrados:

$$3-4 \quad Q_H = W_{3-4} = \int_{V_3}^{V_4} p dV = mRT_H \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (12)$$

$$4-1 \quad W = 0 = Q \quad (13)$$

$$1-2 \quad Q_L = -W_{1-2} = -\int_{V_1}^{V_2} p dV = -mRT_L \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (14)$$

$$2-3 \quad W = 0 = Q \quad (15)$$

Por lo tanto, vemos que:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \quad (16)$$

Esto ocurre porque tienen la misma relación de compresión

Reconociendo que:

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = -\ln \frac{V_1}{V_2} \quad (17)$$

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} \quad (18)$$

También se puede calcular la eficiencia con la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{R * (T_{max} - T_{min}) * \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)}{R * (T_{max}) * \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)} \quad (19)$$

2.4.1. Cálculo de la eficiencia del motor Stirling M16-V4-D

El objetivo del cálculo consiste en determinar la potencia y la eficiencia del motor a partir de la obtención de las temperaturas.

En los siguientes puntos, presentaremos un cálculo simplificado del motor Stirling, utilizando los siguientes conceptos e hipótesis básicas:

- El ciclo no presenta ninguna fricción, lo que significa que el fluido de trabajo no experimenta ninguna pérdida de presión al fluir a través de tuberías o dispositivos como los intercambiadores de calor (regenerador).
- Los procesos de expansión y compresión se llevan a cabo en forma de cuasiequilibrio.
- El fluido de trabajo consiste en aire que circula de manera continua en un circuito cerrado, y su comportamiento se asemeja siempre al de un gas ideal.
- Las tuberías que conectan los diferentes componentes de un sistema están cuidadosamente aisladas, lo que resulta en una transferencia de calor insignificante a través de ellas.

La longitud máxima ($L_{\text{máx}}$) se alcanza cuando el cigüeñal está a 0° , lo que corresponde al volumen máximo. Por otro lado, al girar el cigüeñal 180° se obtiene la longitud mínima ($L_{\text{mín}}$) y, en consecuencia, el volumen mínimo.

Se utilizará Aire como fluido de trabajo considerado como gas ideal. En muchos motores Stirling, las presiones de trabajo suelen oscilar entre 100 kPa y 1000 kPa, aunque esto puede variar considerablemente. Como referencia, se considerará una presión de trabajo inicial de 100 kPa.

Los parámetros físicos aplicados al motor Stirling están representados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del motor.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN	UNIDAD
$T_{\text{máx}}$	Temperatura foco caliente	°K
$T_{\text{mín}}$	Temperatura foco frío	°K
P	Presión atmosférica	kPa
$L_{\text{máx}}$	Longitud máxima	cm
$L_{\text{mín}}$	Longitud mínima	cm
$\varnothing_{\text{pistón}}$	Diámetro del pistón	cm
$C_{\text{pistón}}$	Carrera del pistón	cm
T_{amb}	Temperatura ambiente	°K
n	Revoluciones por minuto	RPM

Datos propuestos:

$$T_{\text{máx}} = 176 \text{ °C} = 449.15 \text{ °K}$$

$$T_{\text{mín}} = 52 \text{ °C} = 325.15 \text{ °K}$$

$$P = 100 \text{ kPa}$$

$$L_{\text{máx}} (\theta = 0^\circ) = 2.5 \text{ cm}$$

$$L_{\text{mín}} (\theta = 180^\circ) = 0.5 \text{ cm}$$

$$\varnothing_{\text{pistón}} = 1.875 \text{ cm}$$

$$C_{\text{pistón}} = 3 \text{ cm}$$

$$T_{\text{amb}} = 25 \text{ °C}$$

$$n = 1170 \text{ rpm}$$

En la tabla 3 se indican los parámetros del aire aplicados al motor Stirling.

Tabla 3. Parámetros del Aire.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN	UNIDAD
M	Masa molar	kg/kmol
C_p	Calor específico a presión constante	kJ/kg · K
C_v	Calor específico a volumen constante	kJ/kg · K
R_u	Constante universal de los gases	kPa · m ³ /kmol · K

Datos para el fluido de trabajo (Aire):

$$M = 28.97 \text{ kg/kmol}$$

$$C_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$C_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$R_u = 8.31447 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

2.4.2. Cálculo volumen mínimo de los cilindros (V_{min}).

$$V_{min} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) (L_{min}) \quad (20)$$

$$V_{min} = \left(\frac{\pi (1.875 \text{ cm})^2}{4} \right) (0.5 \text{ cm})$$
$$V = 1.38 \text{ cm}^3$$

Los 8 cilindros de trabajo tienen las mismas dimensiones, por lo tanto:

$$V_{min} = 1.38 \text{ cm}^3 \cdot (8)$$

$$V_{min} = 11.04 \text{ cm}^3$$

El volumen mínimo de 11.04 cm^3 se presenta cuando el cigüeñal está en 0° .

2.4.3. Cálculo volumen máximo de los cilindros (V_{max}).

$$V_{max} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) (L_{max}) \quad (21)$$

$$V_{max} = \left(\frac{\pi (1.875 \text{ cm})^2}{4} \right) (2.5 \text{ cm})$$

$$V_{max} = 6.90 \text{ cm}^3$$

Los 8 cilindros de trabajo tienen las mismas dimensiones, por lo tanto:

$$V_{max} = 6.90 \text{ cm}^3 \cdot (8)$$

$$V_{max} = 55.22 \text{ cm}^3$$

El volumen máximo de 55.22 cm³ se presenta cuando el cigüeñal realiza un giro de 180°.

2.4.4. Cálculo de volumen específico (ν).

$$\nu_1 = \frac{R_u T_{amb}}{PM} \quad (22)$$

$$\nu_1 = \frac{(8.31447 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K})(298.15 \text{ }^\circ\text{K})}{(100 \text{ kPa})(28.97 \text{ kg/kmol})}$$

$$\nu_1 = 0.86 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2.4.5. Cálculo de la masa del aire (m).

El volumen específico también se obtiene de:

$$\nu = \frac{V_{\text{máx}}}{m} \quad (23)$$

Despejando la masa m , resulta:

$$m = \frac{V_{\text{máx}}}{\nu} \quad (24)$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$0.86 \text{ m}^3/\text{kg} = 860 \text{ cm}^3/\text{g}$$

$$m = \frac{55.22 \text{ cm}^3}{860 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}}$$

$$m = 0.06 \text{ g}$$

2.5. Análisis del ciclo ideal Stirling con los datos propuestos

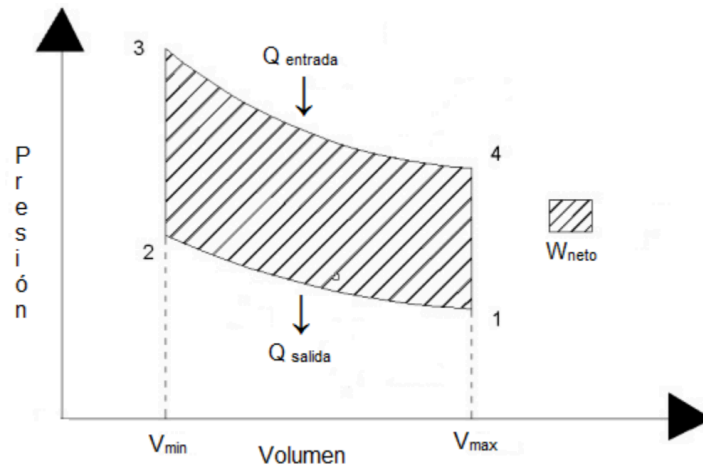


Figura 18. Ciclo ideal Stirling.

2.5.1. Cálculo para el proceso 1 - 2

Durante el proceso isotérmico que se lleva a cabo entre estos dos puntos, se cumple la igualdad de calor y trabajo, $Q = W$. Por lo tanto, es posible aplicar la siguiente fórmula:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (25)$$

Datos:

Punto 1

$$P_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$V_1 = 55.22 \text{ cm}^3$$

Punto 2

$$P_2 = \text{¿? kPa}$$

$$V_2 = 11.04 \text{ cm}^3$$

De la ecuación 25 se despeja P_2 :

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{(100 \text{ kPa})(55.22 \text{ cm}^3)}{11.04 \text{ cm}^3}$$

$$P_2 = 500.18 \text{ kPa}$$

2.5.2. Calor de salida ($Q_{\text{salida } 1-2}$)

$$Q_{\text{salida } 1-2} = P_1 V_{\text{max}} \left(\ln \frac{V_{\text{min}}}{V_{\text{max}}} \right) \quad (26)$$

$$Q_{\text{salida } 1-2} = (100 \text{ kPa})(55.22 \text{ cm}^3) \left(\ln \frac{11.04 \text{ cm}^3}{55.22 \text{ cm}^3} \right)$$

$$Q_{\text{salida } 1-2} = -0.0088 \text{ kJ}$$

2.5.3. Cálculo para el proceso 2 - 3

Este proceso es isométrico, lo que implica que el volumen se mantiene constante y, como resultado, el trabajo realizado durante el proceso es cero.

Datos:

Punto 2

$$P_2 = 500.18 \text{ kPa}$$

$$T_2 = T_{\text{mín}} = 52 \text{ °C} + 273.15 = 325.15 \text{ °K}$$

$$V_2 = 11.04 \text{ cm}^3$$

Punto 3

$$P_3 = \text{¿? kPa}$$

$$T_3 = T_{\text{máx}} = 176 \text{ °C} + 273.15 = 449.15 \text{ °K}$$

$$V_3 = V_2 = 11.04 \text{ cm}^3$$

Para este proceso se aplica la siguiente formula:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} \quad (27)$$

De la ecuación 27 se despeja P_3 :

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

$$P_3 = (449.15 \text{ °K}) \cdot \frac{500.18 \text{ kPa}}{325.15 \text{ °K}}$$

$$P_3 = 690.93 \text{ kPa}$$

2.5.4. Calor en el regenerador ($Q_{reg\ 2-3}$)

$$Q_{reg\ 2-3} = mC_v(T_3 - T_2) \quad (28)$$

$$Q_{reg\ 2-3} = mC_v(T_3 - T_2)$$

$$Q_{reg\ 2-3} = (0.00006kg)(0.718kJ/(kg * K)(449.15^\circ K - 325.15^\circ K)$$

$$Q_{reg\ 2-3} = 0.005kJ$$

2.5.5. Cálculo para el proceso 3 - 4

Una vez más, estamos ante un proceso isotérmico, pero esta vez a la temperatura máxima del sistema.

Datos:

Punto 3

$$P_3 = 690.93 \text{ kPa}$$

$$V_3 = 11.04 \text{ cm}^3$$

$$T_3 = T_{\text{máx}} = 176 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 449.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Punto 4

$$P_4 = \text{¿? kPa}$$

$$V_4 = 55.22 \text{ cm}^3$$

$$T_3 = T_4 = 176 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 449.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Por lo tanto, podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$P_3V_3 = P_4V_4 \quad (29)$$

De la ecuación 29 se despeja P_4 :

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

$$P_4 = \frac{(690.93 \text{ kPa})(11.04 \text{ cm}^3)}{55.22 \text{ cm}^3}$$

$$P_4 = 137.98 \text{ kPa}$$

2.5.6. Calor de entrada ($Q_{\text{entrada } 3-4}$)

$$Q_{\text{entrada } 3-4} = P_3 V_{\text{min}} \left(\ln \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right) \quad (30)$$

$$Q_{\text{entrada } 3-4} = (690.93 \text{ kPa})(11.04 \text{ cm}^3) \left(\ln \frac{55.22 \text{ cm}^3}{11.04 \text{ cm}^3} \right)$$

$$Q_{\text{entrada } 3-4} = 0.0122 \text{ kJ}$$

2.5.7. Cálculo para el proceso 4 - 1

Entre estos dos puntos se lleva a cabo un proceso isométrico, lo que significa que el volumen se mantiene constante y el trabajo realizado es igual a cero ($W=0$).

Datos:

Punto 4

$$P_4 = 137.98 \text{ kPa}$$

$$V_4 = 55.22 \text{ cm}^3$$

$$T_4 = T_{\text{máx}} = 176 \text{ °C} + 273.15 = 449.15 \text{ °K}$$

Punto 1

$$P_1 = \text{¿? kPa}$$

$$V_1 = 55.22 \text{ cm}^3$$

$$T_1 = 52 \text{ °C} + 273.15 = 325.15 \text{ °K}$$

Para este tipo de proceso, podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$\frac{P_4}{T_4} = \frac{P_1}{T_1} \quad (31)$$

De la ecuación 31 se despeja P_1 :

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

$$P_1 = (325.15 \text{ °K}) \cdot \frac{137.98 \text{ kPa}}{449.15 \text{ °K}}$$

$$P_1 = 99.89 \text{ kPa}$$

2.5.8. Calor en el regenerador ($Q_{reg\ 4-1}$)

$$Q_{reg\ 4-1} = mC_v(T_1 - T_4) \quad (32)$$

$$Q_{reg\ 4-1} = mC_v(T_1 - T_4)$$

$$Q_{reg\ 4-1} = (0.00006 \text{ kg})(0.718 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K}))(325.15 \text{ °K} - 449.15 \text{ °K})$$

$$Q_{reg\ 4-1} = -0.005 \text{ kJ}$$

Utilizando los resultados obtenidos del ciclo ideal del proceso Stirling anterior, es posible calcular la eficiencia y la potencia del motor Stirling.

2.5.9. Trabajo neto (W_{neto})

$$W_{neto} = Q_{entrada\ 3-4} - Q_{salida\ 1-2} \quad (33)$$

$$W_{neto} = 0.0122 \text{ kJ} - 0.0088 \text{ kJ}$$

$$W_{neto} = 0.0034 \text{ kJ}$$

2.5.10. Eficiencia térmica (η_{ter})

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} \quad (34)$$

$$\eta_{ter} = \frac{0.0034 \text{ kJ}}{0.0122 \text{ kJ}}$$

$$\eta_{ter} = 0.2786 \cdot 100\%$$

$$\eta_{ter} = 27.86\% \approx 28\%$$

2.5.11. Potencia del motor (P_m)

$$P_m = W_{neto} \cdot (n) \quad (35)$$

Se sabe que 1170 rpm equivalen a 19.5 ciclo/s.

$$P_m = 0.0034 \text{ kJ} \cdot (19.5 \text{ ciclo/s})$$

$$P_m = 0.0663 \text{ kW}$$

2.5.12. Eficiencia de Carnot (η_{Carnot})

Usando la ecuación 11, podemos hallar la eficiencia de Carnot

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{mín}}{T_{máx}}$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{325.15^\circ\text{K}}{449.15^\circ\text{K}}$$

$$\eta_{Carnot} = 0.2760 \cdot 100\%$$

$$\eta_{Carnot} = 27.60\% \approx 28\%$$

2.6. Modelamiento del motor Stirling M16-V4-D usando software CAD

El modelamiento CAD del motor Stirling M16-V4-D es un proceso que involucra la creación de un modelo tridimensional del motor utilizando software especializado de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). El motor Stirling M16-V4-D, desarrollado por Sunnytech, es un motor térmico que opera mediante ciclos de compresión y expansión de gas, y se destaca por su eficiencia y versatilidad.

El objetivo del modelamiento CAD es representar de manera precisa y detallada todos los componentes y características del motor Stirling M16-V4-D en un entorno virtual. Esto incluye el diseño y modelado de las piezas individuales, así como su ensamblaje correcto para recrear el motor en su totalidad.

2.6.1. Foco caliente

El "foco caliente" en el motor Stirling es el punto donde se suministra calor al gas de trabajo para iniciar el ciclo termodinámico y proporcionar la energía necesaria para que el motor funcione.

El foco caliente es la fuente de calor externa que se utiliza para calentar el gas de trabajo dentro del motor Stirling. Al suministrar calor al gas, se produce una expansión térmica, lo que provoca que el pistón se desplace y el motor comience a operar.

La función principal del foco caliente es transferir energía térmica al gas de trabajo, lo que aumenta su temperatura y presión. El calor suministrado puede provenir de diferentes fuentes, como quemadores de combustible, energía solar concentrada u otras fuentes de calor.

Una vez que el gas de trabajo se ha calentado en el foco caliente y ha realizado trabajo en la fase de expansión, se dirige hacia el foco frío, donde se enfría antes de ser comprimido nuevamente.

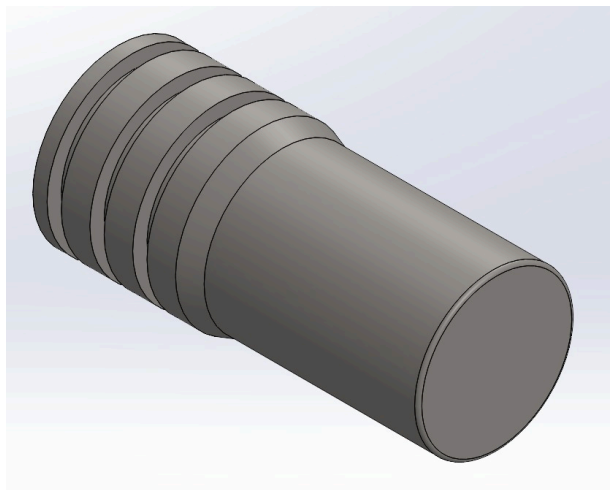


Figura 19. Cilindro foco caliente.

La figura 19 hace referencia a la pieza del motor que estará en contacto directo con la fuente de calor externa. Este elemento está construido en acero inoxidable 304, posee buena resistencia a la corrosión por factores del medio ambiente, resistencia al desgaste y alta durabilidad.

Su uso es muy frecuente dentro de la industria alimentaria, industria química, construcción e incluso dentro de la industria de la medicina. En la tabla 4 se indican algunas de las propiedades de este metal.

Tabla 4. Propiedades térmicas y físicas del Acero inoxidable 304.

PROPIEDADES TÉRMICAS Y FÍSICAS		
Conductividad Térmica (W/m · K)	Dilatación Térmica (°C⁻¹)	Punto de Fusión (°C)
14-19	16-17 (10) ⁻⁶	1400-1455

La figura 20 hace referencia a la base del cilindro del foco caliente, esta es una pieza importante pues su diseño ayuda en lo posible a evitar fugas del aire cuando trabaja el cilindro y el pistón. También posee un orificio en su construcción es cual servirá de regenerador. Esta pieza está construida de Latón, este tiene una buena maquinabilidad, alta resistencia a la oxidación y corrosión, buena resistencia al desgaste.

Tienes diferentes aplicaciones como pueden ser en la industria automotriz, industria eléctrica, construcción y en la fabricación de municiones. Algunas de sus propiedades de indican en la tabla 5.

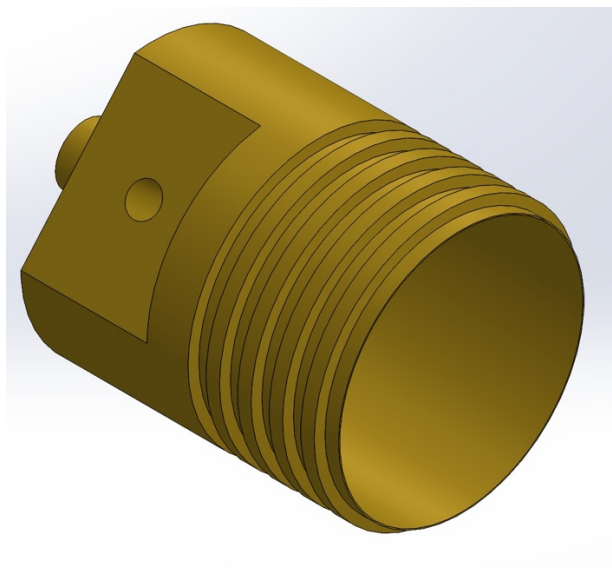


Figura 20. Base del cilindro.

Tabla 5. Propiedades térmicas y físicas del Latón.

PROPIEDADES TÉRMICAS Y FÍSICAS		
Conductividad Térmica (W/m · K)	Dilatación Térmica (°C⁻¹)	Punto de Fusión (°C)
109-120	18-20 (10) ⁻⁶	900-940

2.6.2. Foco frío

En el contexto del motor Stirling, el "foco frío" se refiere a una de las partes esenciales del ciclo termodinámico del motor. El foco frío es el punto donde el gas de trabajo se enfría antes de volver a ser comprimido en el ciclo de funcionamiento del motor.

El enfriamiento puede lograrse mediante diversos métodos, como la transferencia de calor al ambiente circundante, el uso de un sistema de enfriamiento por aire o un intercambiador de calor. El objetivo es reducir la temperatura del gas de trabajo para que pueda ser comprimido eficientemente en la siguiente etapa del ciclo.

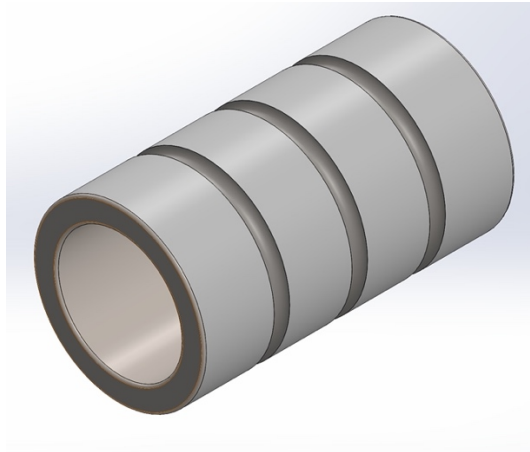


Figura 21. Cilindro foco frío.

La figura 21 se muestra el cilindro del foco frío, este elemento se encuentra fuera del alcance de la fuente de calor por lo tanto cuando el gas de trabajo entre en él, este tenderá a enfriarse. Este está construido de acero inoxidable 304.

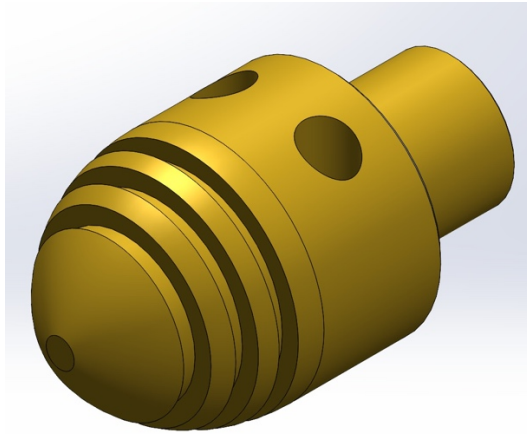


Figura 22. Base superior.

La base superior como se muestra en la figura 22 es la encargada de anclarse al soporte ya que este elemento también posee un orificio que sirve de regenerador que permite el flujo del aire entre en foco caliente y foco frío. Esta construido de latón.

2.6.3. Pistón de potencia

Dentro de un motor Stirling tipo alfa, el "pistón de potencia" es una de las partes clave que participa en el ciclo termodinámico del motor. El motor Stirling tipo alfa se compone de dos cilindros conectados por un conducto de calor llamado "regenerador".

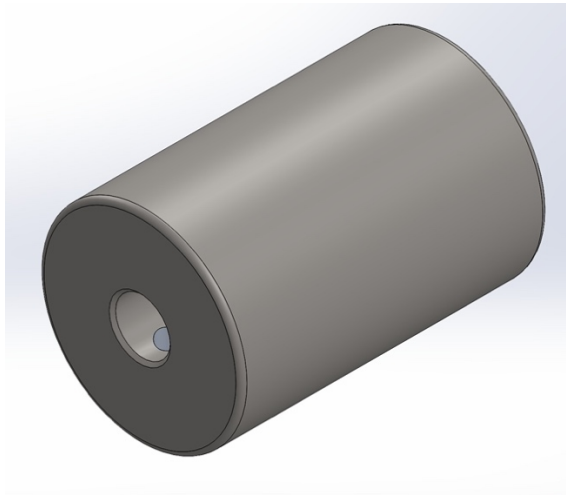


Figura 23. Pistón de potencia.

La figura 23 indica el pistón de potencia, este se encuentra en uno de los cilindros y desempeña un papel fundamental en la generación de trabajo. Este está construido de Acero AISI 52100, tiene buena resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga por

rodadura. Su principal aplicación es para construir elementos como rodamientos. La tabla 6 indica algunas de sus propiedades.

Tabla 6. Propiedades térmicas y físicas del acero AISI 52100.

PROPIEDADES TÉRMICAS Y FÍSICAS		
Conductividad Térmica (W/m · K)	Dilatación Térmica (°C⁻¹)	Punto de Fusión (°C)
44	12 (10) ⁻⁶	1470-1480

El movimiento alternativo del pistón de potencia es lo que impulsa el ciclo de trabajo del motor Stirling tipo alfa y permite la conversión de energía térmica en trabajo mecánico. La sincronización y el diseño adecuados del pistón de potencia son fundamentales para garantizar un funcionamiento eficiente y optimizar la producción de energía en el motor Stirling.

2.6.4. Volante de inercia

El volante de inercia actúa como un dispositivo de almacenamiento de energía cinética. Durante el ciclo de funcionamiento del motor Stirling, cuando el pistón caliente se expande y el pistón frío se contrae, el volante almacena energía mecánica. Luego, cuando los pistones invierten sus movimientos y el pistón caliente se contrae mientras que el pistón frío se expande, el volante libera la energía almacenada para mantener el movimiento del motor y suavizar las fluctuaciones de velocidad.

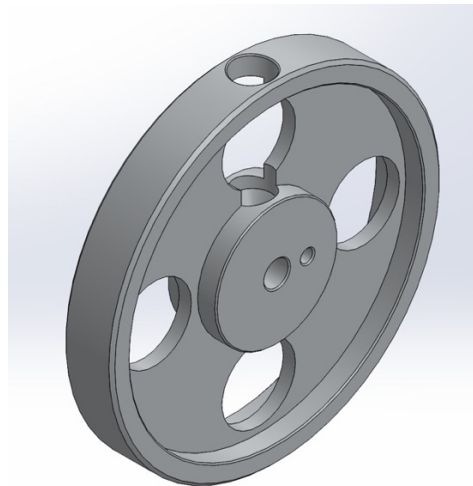


Figura 24. Volante de inercia.

El volante de inercia está construido de Acero AISI 52100.

2.6.5. Biela

La función principal de la biela en un motor Stirling tipo alfa es convertir el movimiento lineal del pistón en un movimiento rotativo en el eje. La biela está conectada en un extremo al pistón y en el otro extremo al volante.

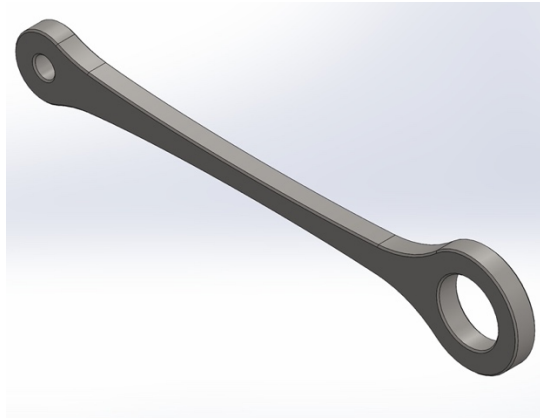


Figura 25. Biela.

La biela está elaborada en Acero AISI 52100.

2.6.6. Poleas y banda de goma

En un motor Stirling tipo alfa convencional, no se utilizan ruedas de conducción o bandas de goma como parte de su funcionamiento. Sin embargo, en algunos diseños personalizados o experimentales, se podrían implementar elementos adicionales para transmitir el movimiento o la energía generada por el motor a otros componentes o sistemas externos.

La figura 26 y 27 se puede observar los elementos polea y banda de goma, en este caso, las poleas junto con la banda de goma, transmiten el movimiento o la energía generada por el motor al eje el cual estará conectado al generador usando este mismo sistema.

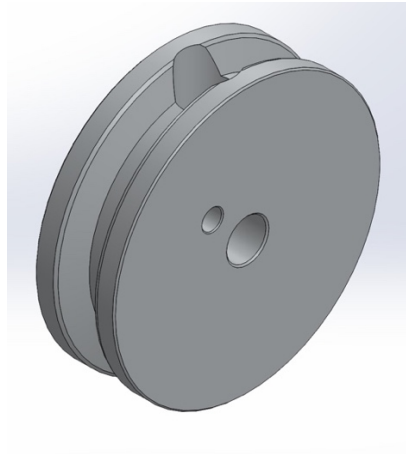


Figura 26. Polea.

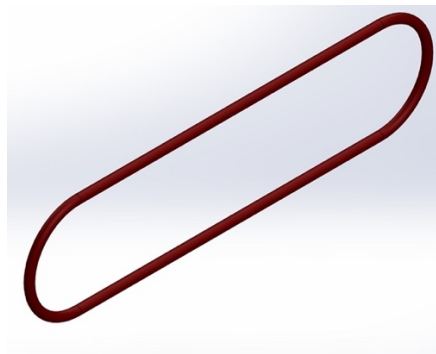


Figura 27. Banda de goma.

La polea está construida con Acero AISI 52100.

2.6.7. Extensión (Pistón – Biela)

La figura 28 indica una extensión que une el pistón y la biela en el foco caliente, dado este caso, su función es ayudar a transformar el movimiento lineal del pistón a movimiento rotatorio usando la biela la cual está conectada al volante.

Este elemento está construido en Acero inoxidable 304.

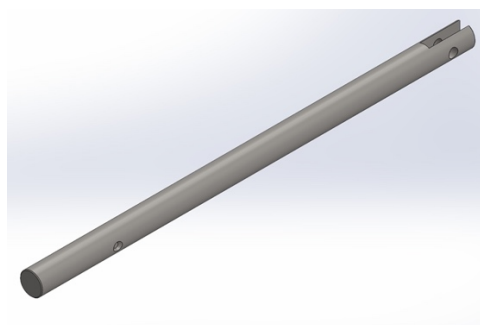


Figura 28. Extensión entre el pistón y la biela.

2.6.8. Soporte principal

El soporte proporciona un marco rígido y estable para sostener y alinear correctamente los diferentes componentes del motor Stirling, como el cilindro, el pistón, el volante y el generador eléctrico. Ayuda a mantener todas las partes en su lugar y asegura la estabilidad durante el funcionamiento.

Esta pieza está construida en Latón.

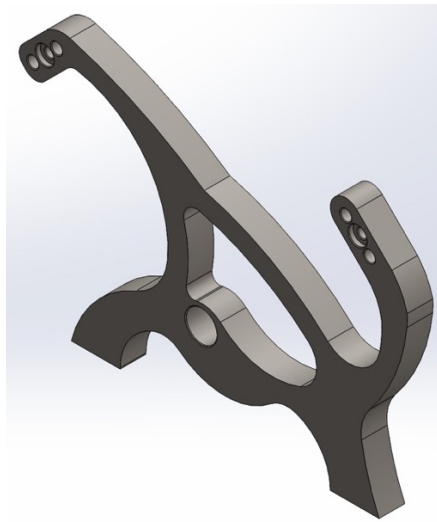


Figura 29. Soporte principal.

2.6.9. Soporte para el eje

La figura 30 muestra el soporte para el eje, este ayuda a mantener el eje en una posición estable y alineada correctamente con los demás componentes del motor. Esto asegura un movimiento suave y controlado del eje y evita vibraciones o desalineaciones que podrían afectar el rendimiento del motor.

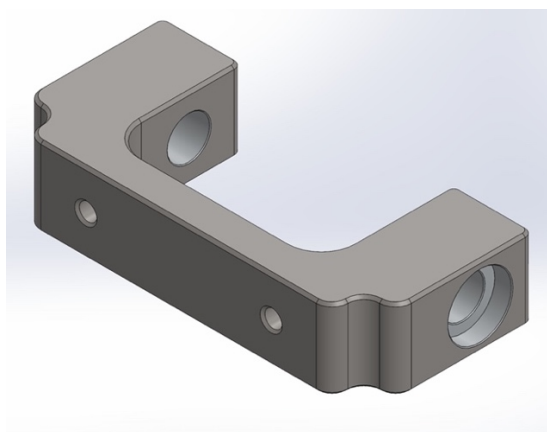


Figura 30. Soporte para el eje.

Este componente está elaborado en Latón.

2.6.10. Eje

El eje como se indica en la figura 31, actúa como un elemento de transmisión de potencia dentro del motor Stirling. Las poleas están montadas en el eje y se utilizan para transmitir la energía generada por el movimiento del pistón al volante u otros componentes conectados. El eje permite que la potencia mecánica se transfiera de forma eficiente entre las diferentes partes del motor.

El eje también proporciona estabilidad y soporte estructural para las poleas y los componentes conectados. Ayuda a mantener las poleas en su lugar y evita que se desalineen o se deslicen durante el funcionamiento.

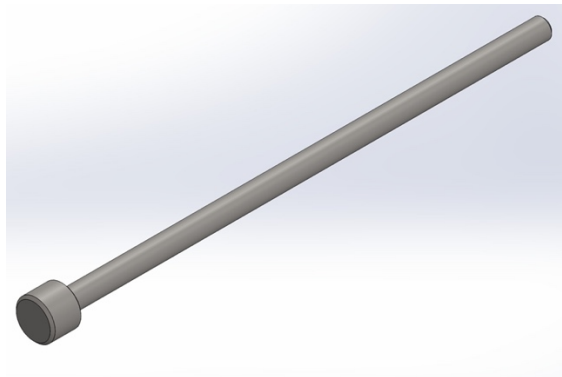


Figura 31. Eje.

El eje está construido en Acero AISI 52100.

2.6.11. Generador y LED

La figura 32 muestra al generador, este es un componente que convierte la energía mecánica generada por el motor Stirling en energía eléctrica. La función principal del generador es transformar el movimiento lineal o rotatorio del motor en electricidad utilizable. Esto se logra mediante la inducción electromagnética o mediante otros principios de generación de energía.

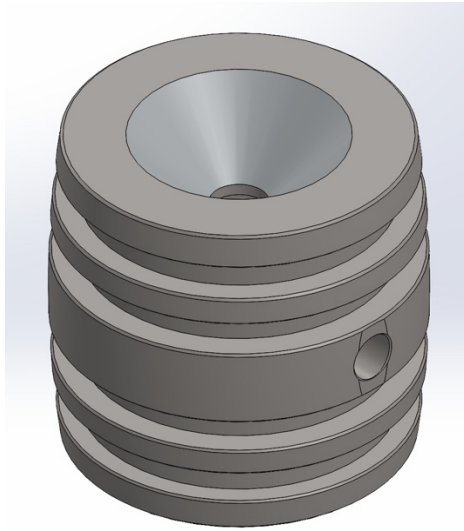


Figura 32. Generador.

Este está construido en acero inoxidable 304.

La figura 33 indica al LED (Light Emitting Diode), es un dispositivo electrónico que emite luz cuando se le aplica una corriente eléctrica. En el contexto del motor Stirling M16-V4-D, el LED puede utilizarse para indicar el estado o el funcionamiento del motor Stirling. Por ejemplo, puede iluminarse cuando el motor está en funcionamiento o cuando se alcanzan ciertas condiciones o parámetros específicos.

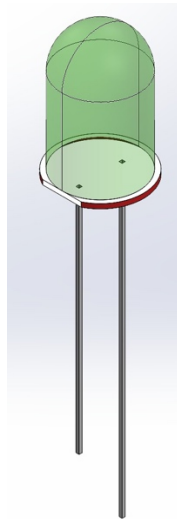


Figura 33. LED.

2.6.12. Placa base

La figura 34 muestra la placa base la actúa como una base sólida donde se sujetan los diferentes componentes del motor, como el cilindro, el pistón, el volante, el generador y otros elementos. Los pernos se utilizan para asegurar los componentes a la placa, manteniéndolos en su posición adecuada y evitando movimientos no deseados durante el funcionamiento del motor.

La placa base garantiza que los componentes del motor estén alineados correctamente y se mantengan en posición estable. Esto es esencial para el funcionamiento eficiente y seguro del motor, evitando vibraciones excesivas y garantizando que los componentes se muevan de manera coordinada.

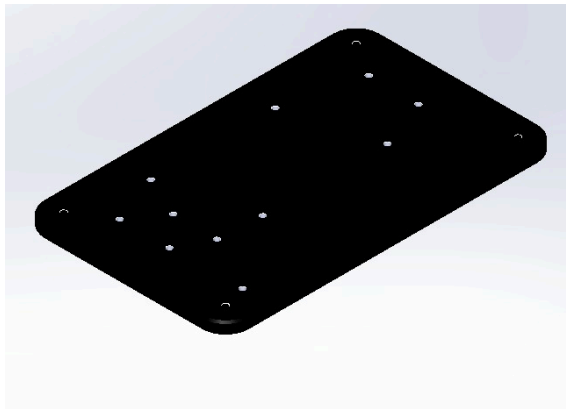


Figura 34. Placa base.

Este componente está elaborado en Latón.

2.6.13. Mechero de alcohol

La figura 35, 36 y 37 muestran los elementos que conforman al mechero de alcohol. El mechero de alcohol se utiliza para proporcionar la fuente de calor necesaria para calentar el aire o el gas de trabajo dentro del motor Stirling. El alcohol se quema en el mechero, generando una llama que calienta el cilindro del motor.

El mechero de alcohol puede tener un diseño que permita ajustar la cantidad de alcohol quemado y, por lo tanto, la temperatura de la llama. Esto permite controlar la cantidad

de calor suministrado al motor y, por lo tanto, controlar la velocidad y el rendimiento del motor Stirling.

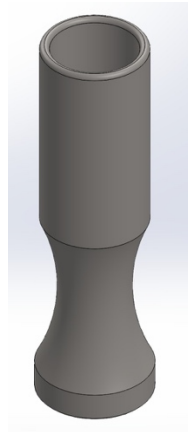


Figura 35. Cuerpo del mechero de alcohol.

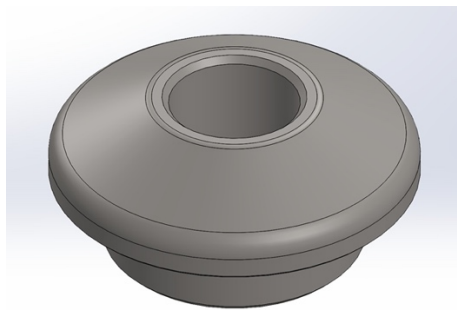


Figura 36. Tapa del mechero de alcohol.



Figura 37. Mechero.

Es importante tener en cuenta que el uso de un mechero de alcohol puede variar dependiendo del diseño y la configuración específica del motor Stirling en cuestión. En algunos casos, se pueden utilizar otras fuentes de calor, como quemadores de gas natural o eléctricos, en lugar de un mechero de alcohol. Sin embargo, la función

principal de suministrar calor para la expansión y contracción del gas se mantiene en todos los casos.

El cuerpo y tapa que conforman el mechero de alcohol están elaborados de Acero inoxidable 304.

2.6.14. Armado del motor Stirling M16-V4-D

Una vez obtenido todos los elementos relevantes del motor Stirling, se puede crear un ensamble con estos elementos, establecer relaciones de posición y dar forma al diseño virtual del prototipo tal como se muestra en la figura 38.

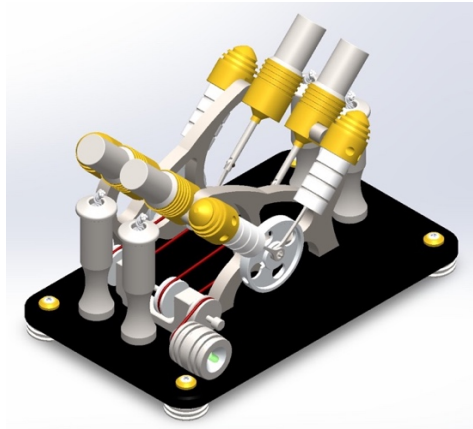


Figura 38. Ensamble total del motor prototipo.

Para una mejor vista a detalle y calidad de imagen se procedió a realizar un render del ensamble total del motor. Esto se indica en la figura 39.

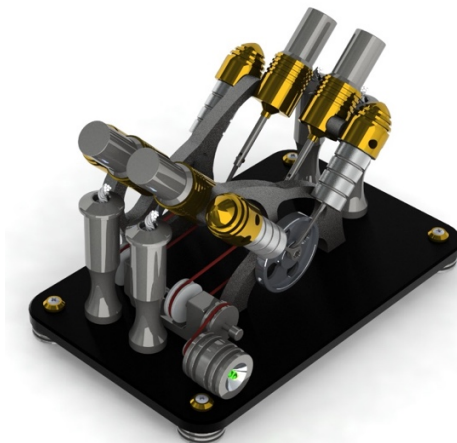


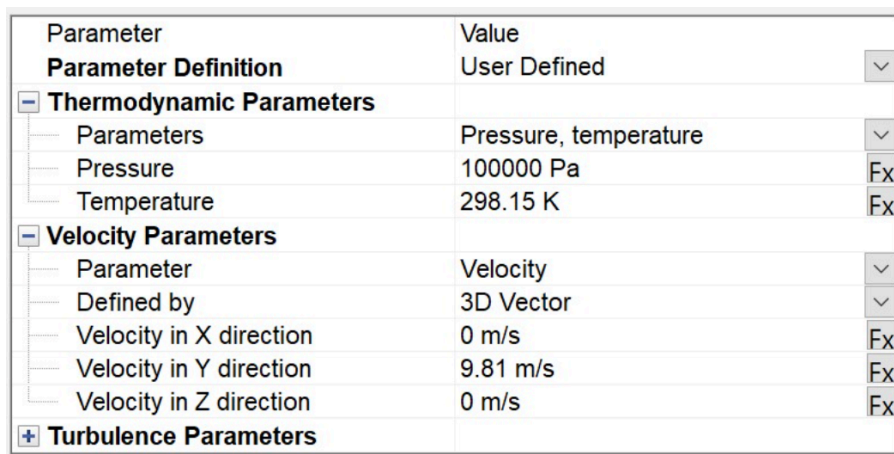
Figura 39. Render del ensamble total del motor Stirling M16-V4-D.

2.7. Análisis mediante software de elementos finitos el comportamiento mecánico y termodinámico del motor Stirling.

Como parte del proceso de validación del cálculo de la eficiencia del motor Stirling, se lleva a cabo el modelado y análisis dinámico de fluidos computacionales del cilindro utilizando el software SolidWorks, utilizando una licencia estudiantil del programa.

Utilizando técnicas de diseño termodinámico y transferencia de calor, se llevaron a cabo cálculos de los parámetros fundamentales del motor Stirling diseñado, incluyendo las áreas necesarias para la transferencia de calor. Con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo de fluidos, se empleó un enfoque de análisis bidimensional del flujo.

Dentro del software utilizado, se establecieron las condiciones iniciales pertinentes, tales como el tipo de análisis a realizar y la naturaleza laminar o turbulenta del fluido en estudio.



Parameter	Value	
Parameter Definition	User Defined	▼
Thermodynamic Parameters		
Parameters	Pressure, temperature	▼
Pressure	100000 Pa	Fx
Temperature	298.15 K	Fx
Velocity Parameters		
Parameter	Velocity	▼
Defined by	3D Vector	▼
Velocity in X direction	0 m/s	Fx
Velocity in Y direction	9.81 m/s	Fx
Velocity in Z direction	0 m/s	Fx
Turbulence Parameters		

Figura 40. Condiciones iniciales.

La figura 40 muestra las condiciones iniciales en la parte de termodinámica se establecen con una presión de 100000 Pa y una temperatura inicial de 298,15°K . Se localizan dentro de las geometrías, las condiciones iniciales y la localización de la temperatura de trabajo.

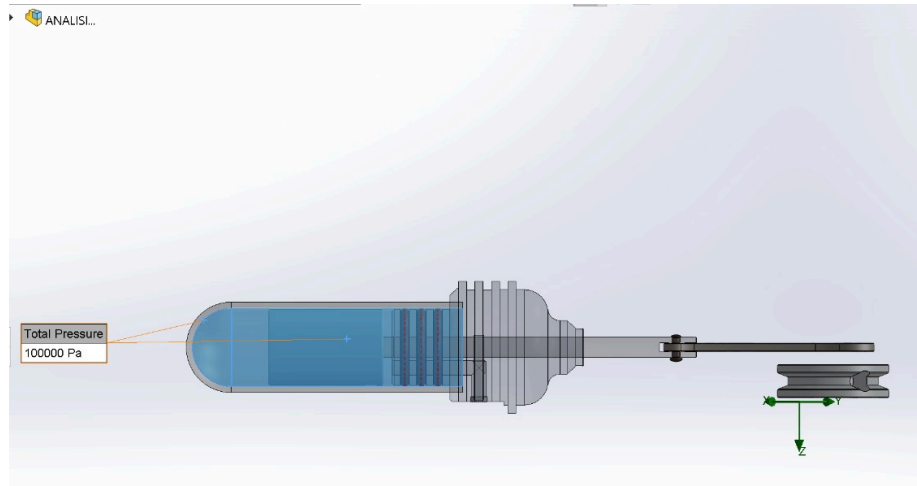


Figura 41. Presión inicial del cilindro de 100000 Pa.

La figura 42 hace referencia a la temperatura del foco frío, está se puede interpretar como la temperatura del calor de sale del sistema.

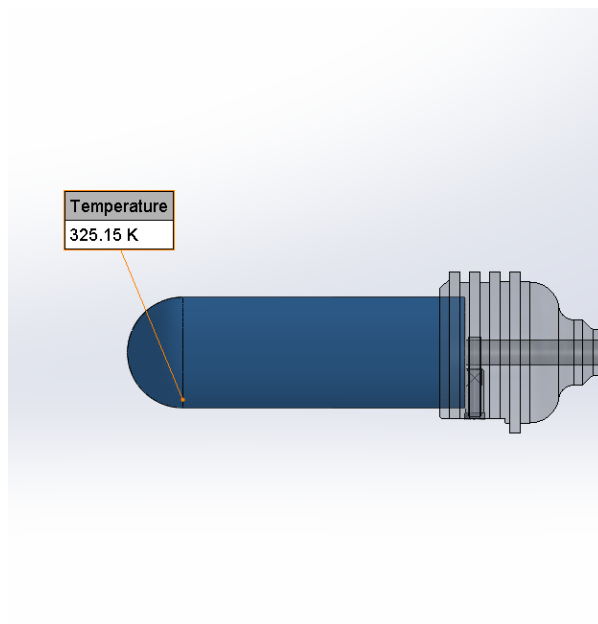


Figura 42. Temperatura del cilindro 325,15 K.

El análisis computacional del proceso 1-2 del ciclo Stirling arroja una presión en el Punto 2 de $P_2 = 500.883 \text{ kPa}$.

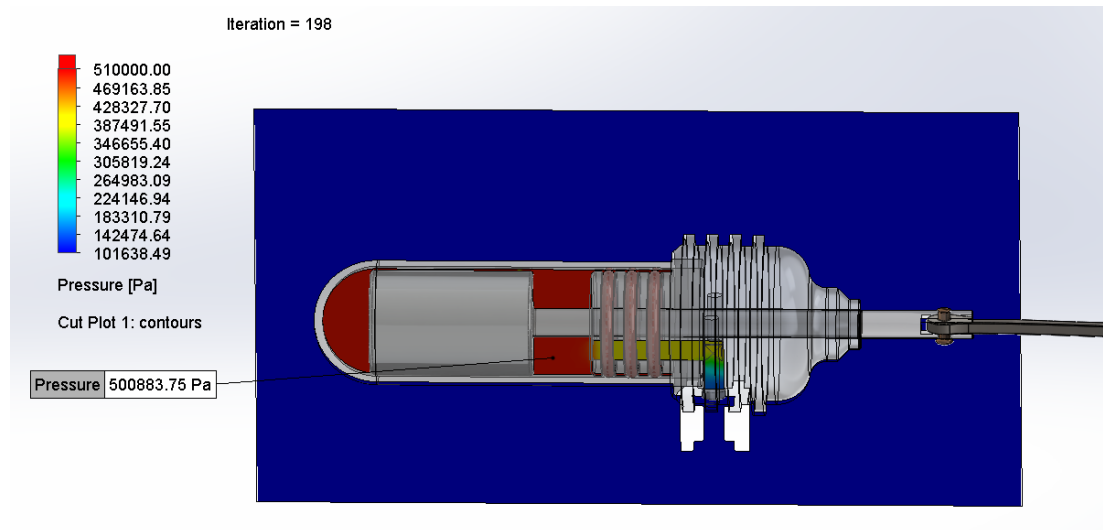


Figura 43. Análisis de la presión en la fase de compresión.

Para la etapa 2-3 en la cual se ejecuta un proceso isométrico, se obtiene una presión resultante de 690.593 kPa y el software trabaja con una temperatura de 325.05 K.

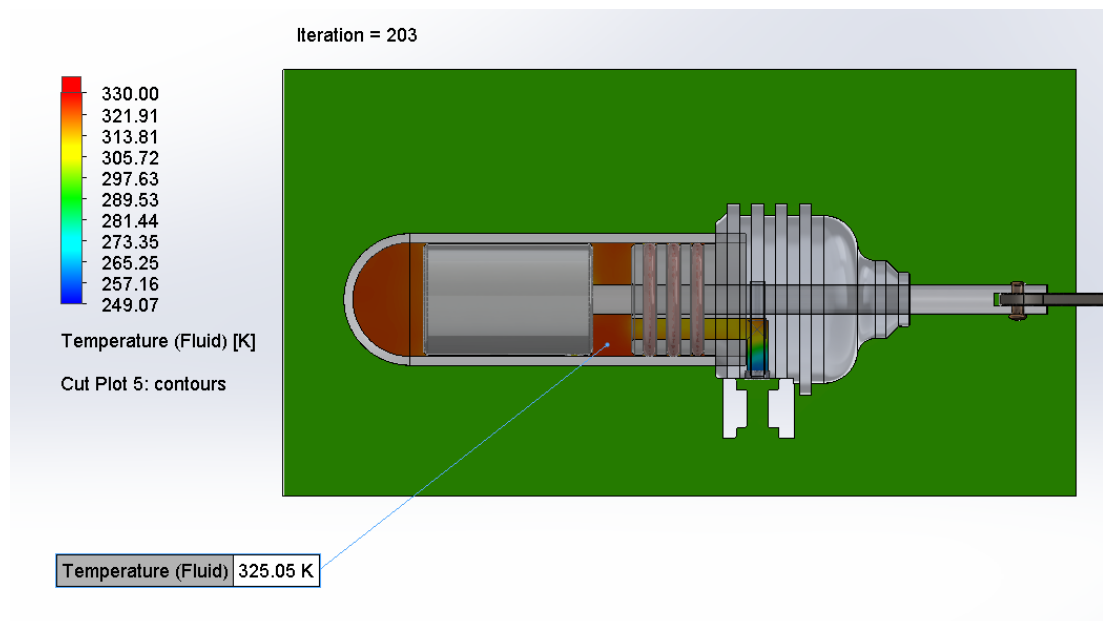


Figura 44. Análisis de la temperatura en la fase de compresión.

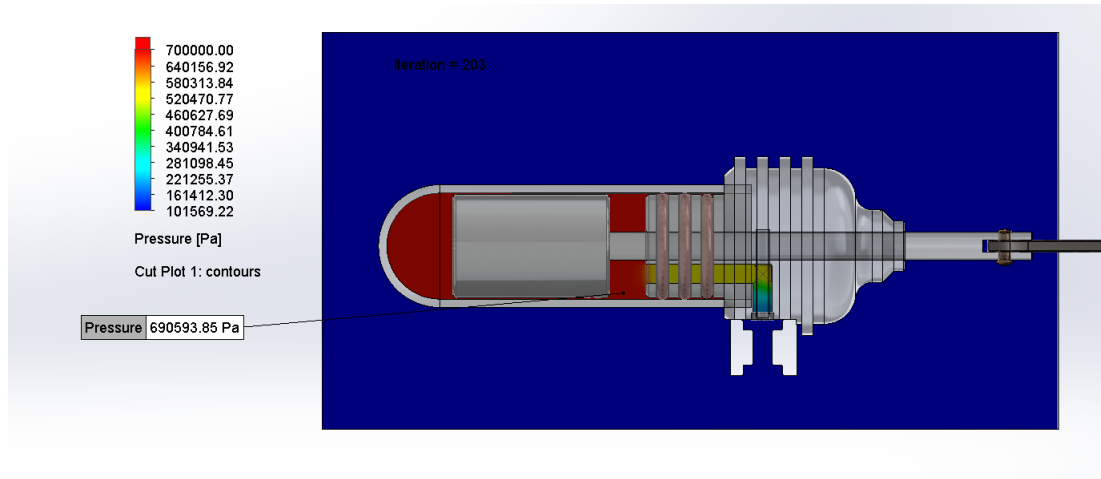


Figura 45. Análisis de la presión máxima.

De igual manera el proceso isotérmico que se ejecuta en la etapa 3-4 a una temperatura de 448.80 K arroja un resultado de presión de 137.80 KPa

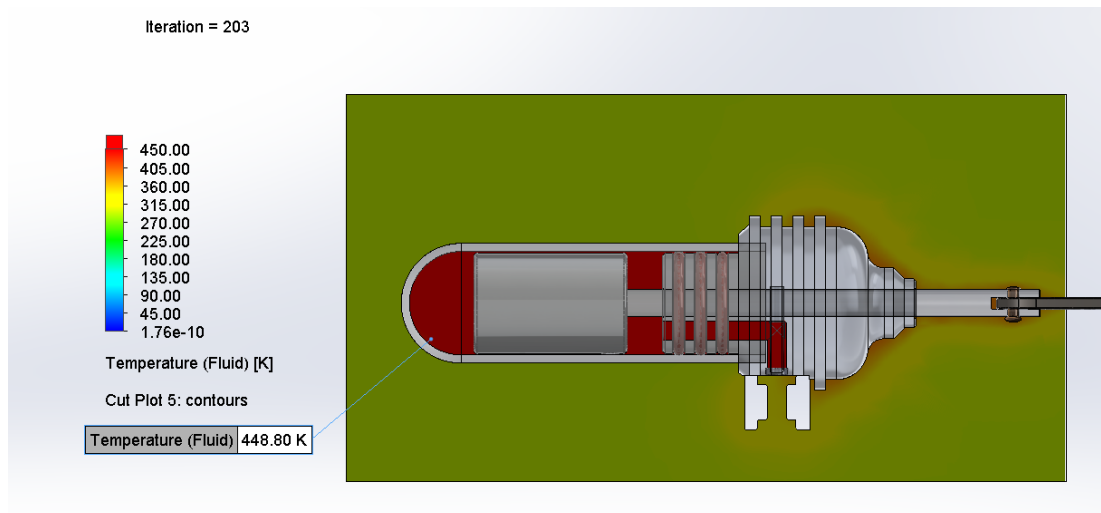


Figura 46. Análisis de la temperatura en el punto 3 a 4.

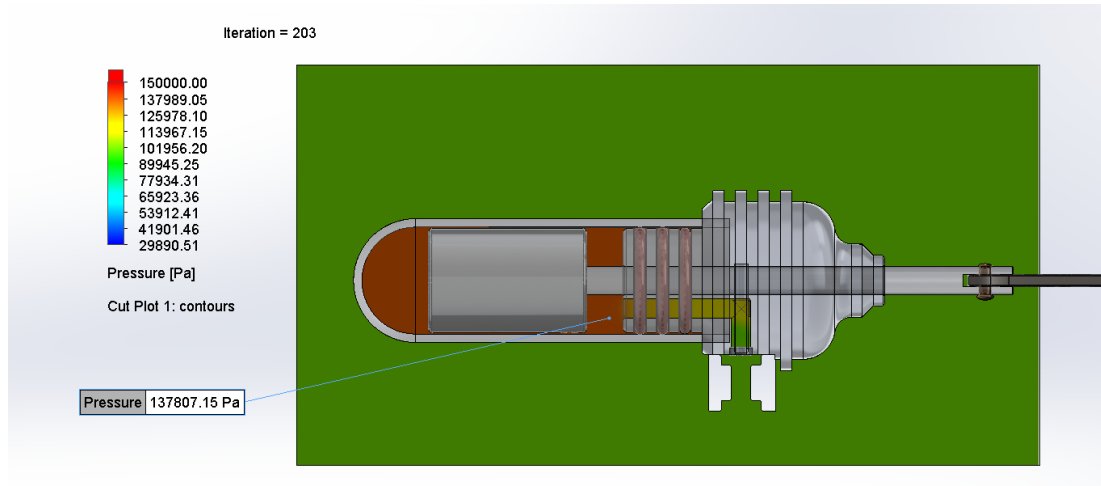


Figura 47. Análisis de la presión del 3 a 4.

El ciclo finaliza entonces con una temperatura de 449.14 K y una presión de 100 KPa.

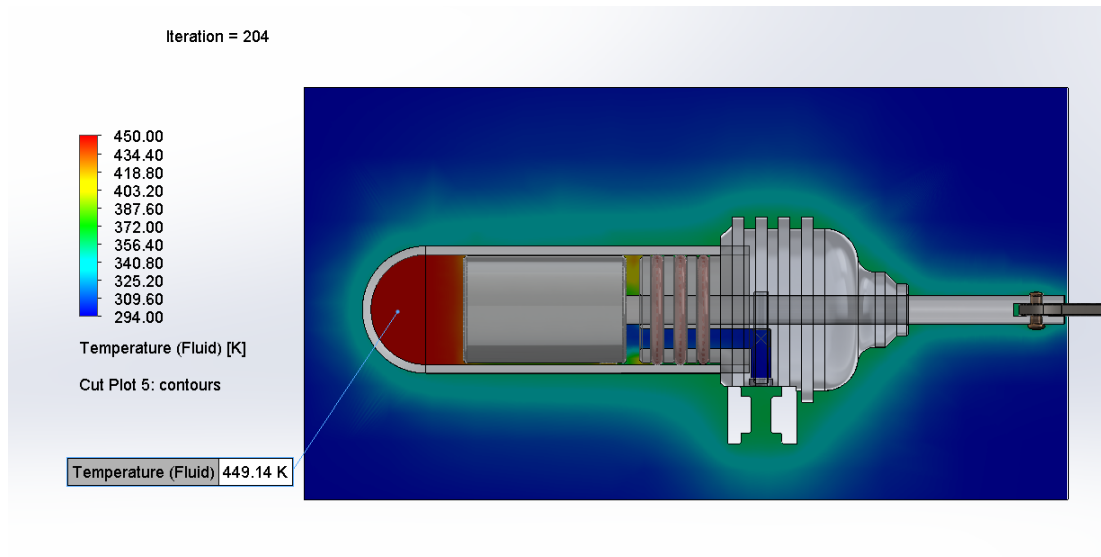


Figura 48. Análisis de la temperatura fase final.

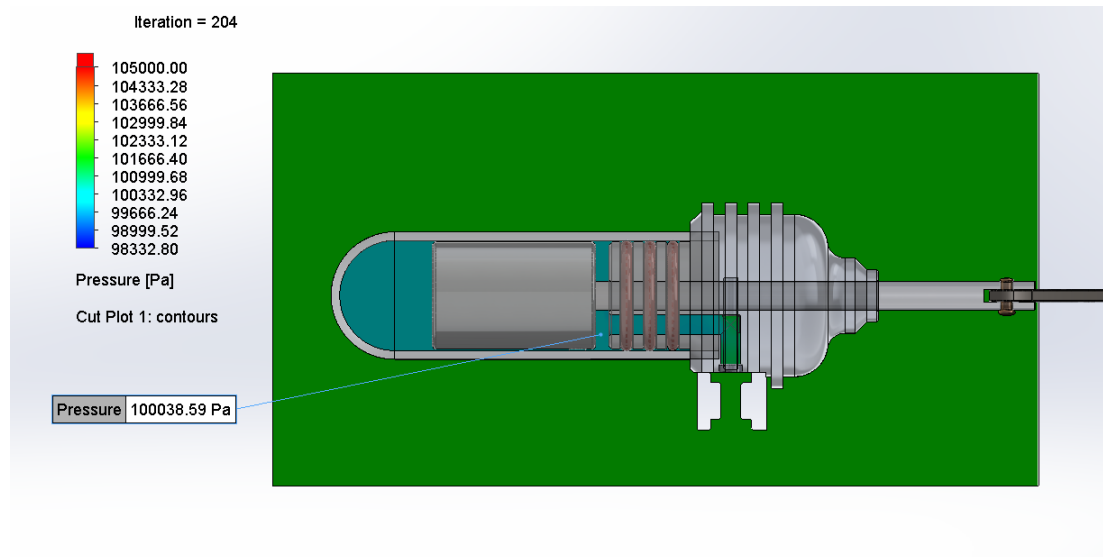


Figura 49. Análisis de la presión del punto 4 - 1.

Recalculando los datos de calor y trabajo con los datos obtenidos en el software se obtiene:

Calor de salida (Q salida 1 – 2)

$$Q_{salida1-2} = P_1 V_{max} \left(\ln \frac{V_{min}}{V_{max}} \right)$$

$$Q_{salida1-2} = (100 \text{ KPa})(55.22 \text{ cm}^3) \left(\ln \frac{11.04 \text{ cm}^3}{55.22 \text{ cm}^3} \right)$$

$$Q_{salida1-2} = -0.0088 \text{ KJ}$$

Calor en regenerador (Qreg 2 – 3)

$$Q_{reg 2-3} = m C_v (T_3 - T_2)$$

$$Q_{reg 2-3} = (0.00006 \text{ Kg}) \left(0.718 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}} \right) (449.14^\circ\text{K} - 325.15^\circ\text{K})$$

$$Q_{reg 2-3} = 0.005 \text{ KJ}$$

Calor de entrada (Q entrada 3 – 4)

$$Q_{entrada 3-4} = P_3 V_{min} \left(\ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \right)$$

$$Q_{entrada\ 3-4} = (690.593\text{ KPa})(11.04\text{ cm}^3)\left(\ln \frac{55.22\text{ cm}^3}{11.04\text{ cm}^3}\right)$$

$$Q_{salida\ 3-4} = 0.0122\text{ KJ}$$

Calor en regenerador (Qreg 4 – 1)

$$Q_{reg\ 4-1} = m C_v(T_1 - T_4)$$

$$Q_{reg\ 4-1} = (0.00006\text{ Kg})(0.718 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}})(325.15^\circ\text{K} - 449.14^\circ\text{K})$$

$$Q_{reg\ 4-1} = -0.005\text{ KJ}$$

Trabajo neto (Wneto)

$$W_{neto} = Q_{entrada\ 3-4} - Q_{salida\ 1-2}$$

$$W_{neto} = 0.0122\text{ KJ} - 0.0088\text{ KJ}$$

$$W_{neto} = 0.0034\text{ KJ}$$

Eficiencia térmica

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$$

$$\eta_{ter} = \frac{0.0034\text{ KJ}}{0.0122\text{ KJ}}$$

$$\eta_{ter} = 0.2786 * 100\%$$

$$\eta_{ter} = 27.86\% \approx 28\%$$

Potencia del motor (Pm)

$$P_m = W_{neto} * (n)$$

$$P_m = 0.0034\text{ KJ} * (19.5\text{ ciclos/s})$$

$$P_m = 0.0663\text{ KW}$$

Eficiencia de Carnot

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{325.15^\circ\text{K}}{449.14^\circ\text{K}}$$

$$\eta_{Carnot} = 0.2760 * 100\% = 27.60\% \approx 28\%$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

3.1.1. Evaluación del funcionamiento del motor

Con el fin de evaluar y verificar el correcto funcionamiento del motor prototipo, fue necesario realizar una evaluación del motor. Esta evaluación permitió obtener parámetros cruciales para el cálculo y análisis del motor, como la temperatura en el foco frío y el foco caliente, así como las RPM (revoluciones por minuto) a las que opera el motor. Estos datos son esenciales para comprender y optimizar el rendimiento del motor Stirling en diferentes condiciones de funcionamiento.

Se procede a realizar las mediciones de temperatura en los focos en grados Celsius y también las revoluciones por minuto cuando el motor está en marcha.

Tabla 7. Mediciones de la evaluación del motor.

No. Medición	Tiempo (min)	Velocidad del motor (RPM)	Temperatura foco caliente (°C)	Temperatura foco frío (°C)
1	1	1158	160.4	43.5
2	2	1155	162.7	43.8
3	3	1164	165.2	49.0
4	4	1166	177.1	50.1
5	5	1170	176	52

La tabla 7 indica los resultados del tacómetro y pirómetro, se obtuvo un resultado de 1170 RPM y unas temperaturas de 176 °C en el foco caliente y 52 °C el foco frío. Estos datos sirven de referencia para realizar los correspondientes cálculos termodinámicos ya que varían insignificadamente cuando el motor continuo su funcionamiento prolongado es decir pasados los 5 minutos.

Una vez obtenidas las temperaturas en los focos, se puede obtener la eficiencia térmica del motor prototipo. Estas eficiencias se indican en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados experimentales y computacionales de la eficiencia del motor prototipo.

Parámetro	Resultado
Eficiencia térmica	27.86 %
Potencia del motor	0.0663 kW
Eficiencia de Carnot	27.60 %

El análisis de los resultados experimentales y computacionales revelan datos importantes sobre el desempeño del motor Stirling en estudio. La eficiencia térmica obtenida fue de 27,86%, lo cual indica la capacidad del motor para convertir el calor recibido en energía útil. Esta eficiencia refleja el porcentaje de energía térmica que se convierte en trabajo mecánico, y una eficiencia del 27,86% es un valor alentador para un motor de este tipo.

Por otro lado, la potencia del motor registrada fue de 0,00663 kW, lo cual representa la cantidad de trabajo mecánico producido por el motor en una unidad de tiempo. Este valor proporciona información sobre la capacidad de generación de energía del motor Stirling y puede ser utilizado para comparar su rendimiento con otros motores o sistemas similares.

Además, se calculó la eficiencia de Carnot, que es una medida teórica de la máxima eficiencia posible de un motor operando entre dos temperaturas. En este caso, se obtuvo una eficiencia de Carnot de 27,60%. Al compararla con la eficiencia térmica del motor, se puede evaluar el nivel de aprovechamiento del calor y determinar qué porcentaje de la eficiencia máxima se ha logrado alcanzar.

Es correcto afirmar que la eficiencia térmica tiende a aumentar cuando la temperatura promedio a la cual se suministra calor al sistema se incrementa o cuando la temperatura promedio a la cual el calor se rechaza del sistema se reduce.

La eficiencia térmica de un motor se basa en la diferencia de temperatura entre la fuente caliente y la fuente fría. Cuanto mayor sea esta diferencia de temperatura, mayor será la eficiencia térmica del motor. Si se incrementa la temperatura promedio de la

fuente caliente, la diferencia de temperatura entre las fuentes aumentará, lo que resultará en un aumento de la eficiencia térmica. Esto se muestra en la figura 50.

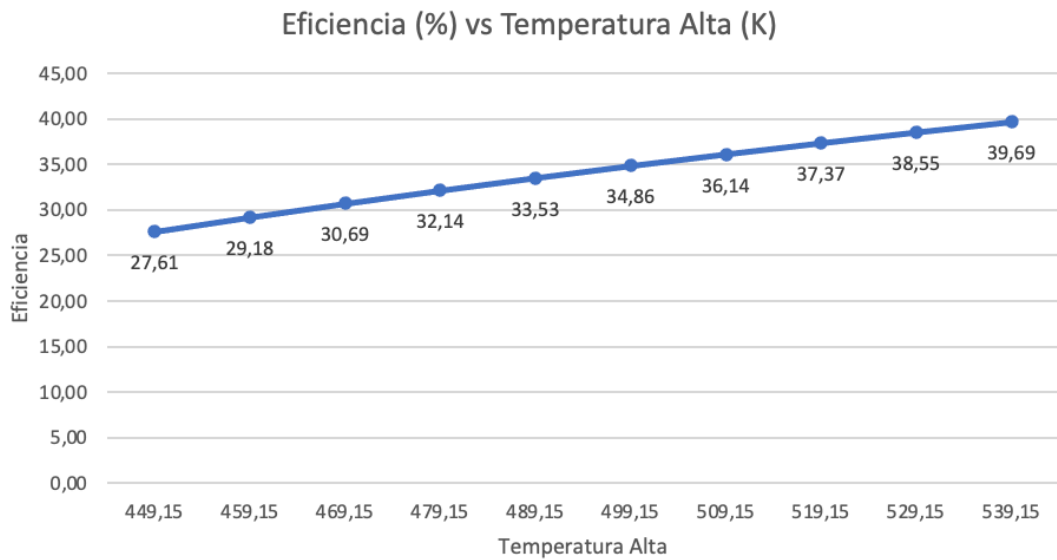


Figura 50. Eficiencia (%) vs Temperatura Alta (K).

De manera similar, si se reduce la temperatura promedio a la cual el calor se rechaza del sistema (es decir, la temperatura promedio de la fuente fría), la diferencia de temperatura entre las fuentes también se incrementará, lo que a su vez aumentará la eficiencia térmica del motor. Esto se indica en la figura 51.

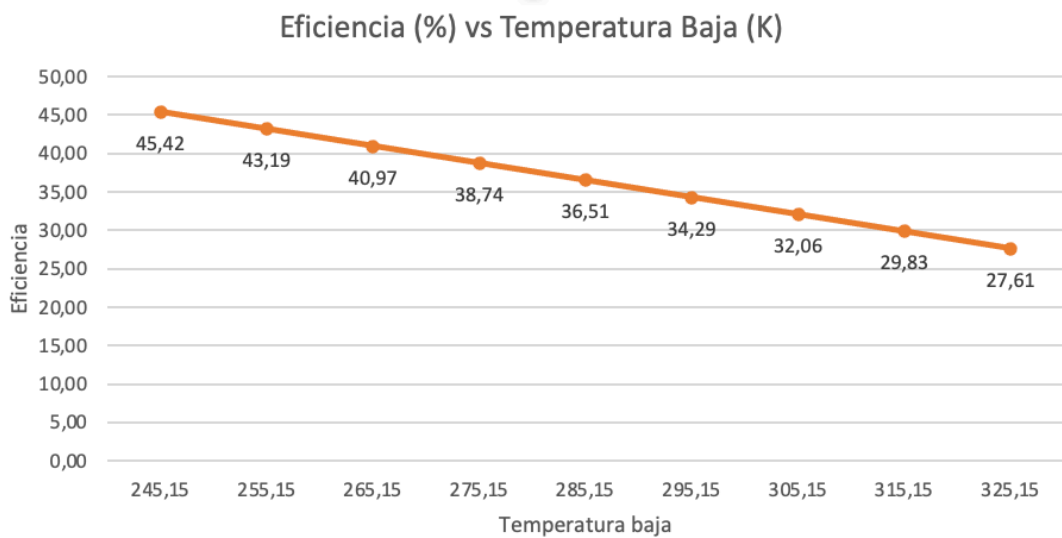


Figura 51. Eficiencia vs Temperatura Baja.

Estos resultados indican que el motor Stirling modelo M16-V4-D presenta una eficiencia térmica considerable. Sin embargo, existe un margen de mejora para acercarse aún más a la eficiencia de Carnot. Estos datos proporcionan una base sólida para el análisis y la optimización del rendimiento del motor, permitiendo identificar posibles áreas de mejora y establecer metas para futuras investigaciones o modificaciones en el diseño.

CAPÍTULO IV

RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

- Para realizar el estudio termodinámico, se determinaron experimentalmente las temperaturas del foco caliente y frío, las cuales resultaron ser 176°C y 52°C, respectivamente.
- La eficiencia térmica del 27,80% muestra cómo el motor convierte la energía térmica en trabajo mecánico. Esta eficiencia es una medida crucial para evaluar el rendimiento del motor y su capacidad para convertir calor en trabajo útil. A través de pruebas experimentales, se puede determinar qué mejoras son necesarias para aumentar la eficiencia térmica y, por lo tanto, optimizar el funcionamiento del motor.
- La eficiencia de Carnot del 27,60% representa el límite máximo teórico para la eficiencia de cualquier motor de calor operando entre dos temperaturas dadas. Al comparar la eficiencia térmica obtenida con la de Carnot, se puede identificar la pérdida de eficiencia debido a diversos factores, como resistencia mecánica, fricción, fugas de gas o ineficiencias termodinámicas. El objetivo de la ingeniería mecánica y termodinámica es reducir esta brecha tanto como sea posible.
- El uso de software CAD para modelar el motor Stirling permite un diseño más preciso y detallado. Estas herramientas proporcionan una representación visual del motor, lo que facilita la identificación de posibles problemas de diseño y permite realizar modificaciones virtuales para optimizar su rendimiento antes de la construcción física. Es fundamental ajustar y perfeccionar el diseño mediante simulaciones y análisis antes de pasar a la etapa de prototipado, lo que puede ahorrar tiempo y recursos en el proceso de desarrollo.
- El análisis mediante software de elementos finitos proporciona información valiosa sobre el comportamiento mecánico y termodinámico del motor Stirling bajo diferentes condiciones. Este tipo de análisis ayuda a comprender cómo se comportan partes del dispositivo frente a las distintas temperaturas.
- Con los resultados de la simulación y análisis, la ingeniería mecánica y de diseño de máquinas puede enfocarse en mejorar aspectos específicos del motor Stirling. Esto podría incluir la optimización de materiales, reducción de fricciones, ajuste de geometrías, entre otros.

4.2. Recomendaciones

- Para aumentar la confiabilidad de los resultados, es recomendable repetir las mediciones experimentales de temperatura varias veces y tomar el promedio de los valores obtenidos. Esto ayudará a reducir posibles errores experimentales y garantizar una mayor precisión en los datos.
- Para asegurar mediciones precisas y confiables, es fundamental verificar que los sensores de temperatura utilizados estén debidamente calibrados y sean de alta precisión. Los sensores calibrados desempeñan un papel crucial al garantizar resultados exactos y evitar errores sistemáticos en las mediciones.
- Para obtener una visión más completa del comportamiento termodinámico del motor Stirling, considera realizar mediciones en un rango más amplio de temperaturas. Esto permitirá analizar cómo varía la eficiencia térmica en diferentes condiciones de operación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Varela, «Estudio y modelización de un motor Stirling, tesis de Pregado,» Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2014.
- [2] Z. Black y G. Hartley, Termodinámica, p. 269.
- [3] Jaime, «jaimemotordiesel,» [En línea]. Available: <http://jaimemotordiesel.blogspot.com>.
- [4] Google, «Google Sites,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/termaqins/2-clasificacion/2-1-combustion-externa>. [Último acceso: 12 abril 2023].
- [5] M. S. J. Hernández, «Diseño y prototipo de un motor Stirling,» Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2013.
- [6] P. Chávez y D. Orquea, «Modelamiento energético y mecánico de un motor Stirling tipo Beta para la generación de 70 We para el DECEM-UGI,» Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí - Ecuador, 2012.
- [7] R. F. Javier, «Diseño y construcción de un prototipo de motor Stirling tipo alfa de alta presión de trabajo,» Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, 2013.
- [8] J. L. M. Tarrillo, «El motor Stirling ideal,» wordpress, 6 Octubre 2012. [En línea]. Available: <https://jmirez.wordpress.com/2012/10/06/j517-el-motor-stirling-ideal/>. [Último acceso: 12 Abril 2023].
- [9] V. Agüero Zamora, «Diseño y construcción de un motor Stirling para la generación de energía eléctrica,» Universidad Nacional de Ingeniería, Peru, 2006.
- [10] G. David, «Desarrollo de motores stirling para aplicaciones solares,» 2013.
- [11] S. C. Sánchez, El Motor Stirling y su implemetación en buques mercantes, 2010, p. 137.
- [12] A. Duato, «Tipos de Motor Stirling,» 2016.
- [13] C. d. ingeniero, 21 04 2016. [En línea]. Available: <https://cuadernodelingeniero.wordpress.com/2016/04/21/los-motores-stirling/>. [Último acceso: 7 05 2023].

[14] Y. CENGEL, Termodinámica (Sexta ed.), México DF: Mc Graw Hill Interamericana Editores, 2009.

ANEXOS

Anexo 1. Guía de funcionamiento y mantenimiento

Guía de funcionamiento del Motor Stirling M16-V4-D.

1. Verificar el suministro de calor: Asegúrate de que el motor Stirling reciba un suministro constante de calor en el foco caliente. Esta fuente de calor puede ser una llama, una resistencia eléctrica o cualquier otra fuente térmica adecuada.
2. Monitorear la temperatura: Durante el funcionamiento, supervisa continuamente las temperaturas del foco caliente y del foco frío utilizando termómetros confiables. Asegúrate de que la temperatura del foco caliente sea mayor que la del foco frío para generar la diferencia de temperatura necesaria para que el motor funcione.
3. Lubricación: Si el motor Stirling tiene partes móviles, asegúrate de lubricar adecuadamente los componentes móviles según las recomendaciones del fabricante. Una lubricación adecuada reducirá la fricción y mejorará la eficiencia del motor.
4. Evitar sobrecargas: Evita someter el motor a cargas excesivas que puedan afectar su funcionamiento y provocar daños en sus componentes. Operar el motor dentro de sus especificaciones de diseño asegurará su integridad y rendimiento óptimo.
5. Paradas y arranques suaves: Al detener o arrancar el motor, hazlo de manera suave y gradual para evitar tensiones innecesarias en sus componentes. Esto prolongará la vida útil del motor y reducirá el riesgo de daños.

Guía de mantenimiento y limpieza.

1. Limpieza regular: Realiza limpiezas periódicas para eliminar polvo, suciedad o residuos que puedan acumularse en el motor. Una limpieza adecuada garantizará un funcionamiento sin obstrucciones y mejorará su eficiencia.
2. Inspección de componentes: Realiza inspecciones visuales regulares para identificar cualquier signo de desgaste, deformación o daño en los componentes del motor. Si se detecta algún problema, es importante abordarlo de manera oportuna para evitar que se agrave.
3. Verificación de conexiones: Revisa y asegura todas las conexiones y sujeciones del motor para evitar movimientos no deseados o aflojamientos que puedan afectar su funcionamiento seguro.

4. Cambio de lubricantes: Si el motor requiere lubricación, sigue las recomendaciones del fabricante para el cambio periódico de los lubricantes. Los lubricantes envejecidos pueden perder sus propiedades y afectar el rendimiento del motor.
5. Mantenimiento preventivo: Implementa un programa de mantenimiento preventivo que incluya acciones como ajustes, reemplazos de piezas desgastadas o limpiezas programadas. Esto ayudará a prevenir fallas inesperadas y prolongará la vida útil del motor.
6. Respaldo técnico: En caso de detectar problemas o averías complejas, busca el apoyo de técnicos o ingenieros especializados en motores Stirling para realizar reparaciones o ajustes más avanzados.

Anexo 2. Fotos de obtención de RPM del motor prototipo





Anexo 3. Fotos de obtención de temperaturas en el foco frío





Anexo 4. Fotos de obtención de temperaturas en el foco caliente



