

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**Análisis termodinámico de un motor stirling solar mediante un algoritmo
de cálculo para encontrar la eficiencia térmica**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

Leyner Orlando Hoyos Garcia

ASESOR

Lucio Antonio Llontop Mendoza

<https://orcid.org/0000-0002-2561-0126>

Chiclayo, 2023

**Análisis termodinámico de un motor stirling solar mediante un
algoritmo de cálculo para encontrar la eficiencia térmica**

PRESENTADA POR:

Leyner Orlando Hoyos Garcia

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Jony Villalobos Cabrera

PRESIDENTE

Alejandro Vera Lázaro

SECRETARIO

Lucio Antonio Llontop Mendoza

VOCAL

Dedicatoria

Dedico primeramente este proyecto a Dios, por ser quien me guío, me fortaleció en todo momento y me brindo los dones y sabiduría para poder culminar con este proyecto muy especial en mi vida.

A mis padres por siempre estar pendientes en todas las etapas de mi vida y apoyarme con tanto amor, mucho de mis logros se los debo a ustedes.

Agradecimientos

Mi agradecimiento especial es a mis padres que en todo momento nunca dejaron de apoyarme. Gracias a ustedes tengo este hermoso logro que costo mucha dedicación y esfuerzo y doy gracias a Dios de lo afortunado que soy por tenerles junto a mí. Sin ustedes la vida jamás sería igual de hermosa.

De igual manera un agradecimiento a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, y en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica por todo el apoyo profesional y conocimientos brindados durante nuestra formación profesional.

TESIS LEYNER ORLANDO HOYOS GARCIA

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	15%	2%	9%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad de Málaga - Tii Trabajo del estudiante	5%
2	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	1%
3	cimav.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	1%
4	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	core.ac.uk Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Anahuac México Sur Trabajo del estudiante	1%
8	digibuo.uniovi.es Fuente de Internet	1%
9	qdoc.tips Fuente de Internet	

Índice

Resumen.....	6
Abstract	7
Introducción	8
Revisión de literatura	11
Materiales y métodos	38
Resultados y discusión	41
Conclusiones	61
Recomendaciones.....	62
Bibliografía	63
Anexos	66

Resumen

Los motores stirling son motores térmicos de ciclo cerrado regenerativo que necesitan de una fuente de calor externa para poder transformar energía térmica en trabajo mecánico, mediante una diferencia de temperaturas, es decir entre una fuente de temperatura alta y un sumidero. Estos motores usan un proceso de combustión externa para la generación de energía eléctrica, lo que les otorga la posibilidad de adaptarse a la energía solar para poder reducir la mayor parte de las emisiones contaminantes. Los motores de ciclo stirling ideal alcanzan un rendimiento mayor, en comparación con otros motores, acercándose así al máximo rendimiento de Carnot, sin embargo, en el funcionamiento real no cumplen las condiciones establecidas, debido a que tiene una eficiencia térmica baja. Por esta razón, se va realizar un análisis del motor stirling v161 para calcular la eficiencia térmica, donde mediante el diseño de un algoritmo de cálculo basado en el análisis termodinámico, se pueda obtener una configuración optima que garantice estabilidad en el resultado final. El propósito de esta investigación es hallar la eficiencia térmica mediante un análisis termodinámico, donde se podrá identificar cuáles son las mayores ineficiencias del motor, con la finalidad de modificar las variables de entrada y variables de diseño, considerando que así se pueda predecir la eficiencia térmica junto a la potencia de salida y consecuentemente poder hacer un uso adecuado de la energía solar y poder transformar energía térmica a energía eléctrica de la manera más eficiente posible.

Palabras claves: Motor stirling, análisis termodinámico, algoritmo.

Abstaract

Stirling engines are regenerative closed-cycle heat engines that need an external heat source to be able to transform thermal energy into mechanical work, through a temperature difference, that is, between a high temperature source and a sink. These engines use an external combustion process to generate electricity, which gives them the possibility of adapting to solar energy in order to reduce most of the polluting emissions. Ideal Stirling cycle engines achieve higher performance compared to other engines, thus approaching Carnot's maximum performance, however, in actual operation they do not meet the established conditions, due to low thermal efficiency. For this reason, an analysis of the stirling v161 engine will be carried out to calculate the thermal efficiency, where by designing a calculation algorithm based on thermodynamic analysis, an optimal configuration can be obtained that guarantees stability in the final result. The purpose of this research is to find the thermal efficiency through a thermodynamic analysis, where it will be possible to identify which are the greatest inefficiencies of the motor, in order to modify the input variables and design variables, considering that this way the thermal efficiency can be predicted. together with the output power and consequently being able to make adequate use of solar energy and be able to transform thermal energy into electrical energy in the most efficient way possible.

Keywords: Stirling engine, thermodynamic analysis, algorithm.

Introducción

En las últimas décadas, la creciente preocupación ambiental ha llevado a la humanidad a buscar nuevas alternativas científicas y tecnológicas para combatir la gran contaminación ambiental que se ha generado. Esto es debido a la utilización de tecnologías y técnicas no amigables con el medio ambiente, al gran crecimiento demográfico y el alza desmesurada de demanda de recursos para la vida en la tierra [1].

La utilización de la energía es tan esencial, que se tiene que inspeccionar la manera de cómo se obtiene y los efectos que produce sobre la madre naturaleza, es por eso que el hombre ha buscado mitigar esta demanda mediante nuevas técnicas de generación de energía eléctrica. Actualmente, las técnicas de generación de energía eléctrica más comunes son las plantas termoeléctricas, nucleares e hidroeléctricas. Sin embargo, debido al alto costo ambiental generado por estas técnicas, el ser humano ha optado por una opción más amigable ambientalmente como son las energías renovables que, a pesar que contaminan, será en una mínima proporción [1].

Actualmente el panorama energético mundial está realizando cambios, rumbo hacia a un modelo energético sostenible para disminuir los fenómenos debido al cambio climático, ya que actualmente uno de los responsables de las emisiones de CO₂ es la producción de energía eléctrica, que adquiere electricidad mediante combustibles fósiles para satisfacer la demanda de energía eléctrica, es por eso que los países están brindando políticas que están destinadas a la investigación y al desarrollo tecnológico de energías renovables, para que estas puedan ser competitivas dentro del mercado energético frente a los combustibles fósiles. Una alternativa de energía renovable es a través de la energía térmica o solar, donde mediante múltiples aplicaciones, el motor stirling se destaca en instalaciones de concentración solar, donde se ha verificado que el diseño del motor cumple una función muy importante en la generación de energía eléctrica, ya que se puede generar energía eléctrica a gran escala o también a menor demanda eléctrica. Todo esto debido a un concentrador solar que es la fuente de calor externa para que el motor stirling pueda operar, sin embargo, es muy difícil el acoplamiento debido a que el concentrador requiere una gran cantidad de material estructural para poder soportar al motor Stirling, porque al tener sistemas más pesados, tendrá que usar sistemas de seguimiento solar conducidos por servomotores, por lo cual esto implica un mayor costo y complejidad en el montaje de este acoplamiento [2].

El motor Stirling es una tecnología decrepita que empiece a ganar relevancia debido a la obtención de su energía térmica y su eficiencia energética, porque alcanza un rendimiento superior en comparación con otros motores reales, acercándose al máximo rendimiento de Carnot, sin embargo, al momento de poner en funcionamiento al motor stirling, este no cumple a cabalidad las condiciones establecidas por el ciclo stirling ideal, ya que es inevitable el rozamiento de los distintos componentes que elaboran el trabajo, además que el gas con el que trabajan no es ideal [3].

La tecnología del motor stirling es simple y esta apta para trabajar con cualquier fuente de calor externa, ya sea mediante una estufa de pellets o un captador parabólico, lo que

hace que sea muy versátil, ya que seguirá funcionando hasta que haya una diferencia de temperaturas entre las dos zonas, es por ello que, a mayor diferencia de temperaturas, mayor será la eficiencia del motor. Sin embargo, el motivo del por qué no se utiliza en gran proporción es debido a que no desarrollar la misma potencia que en un motor de combustión interna con las mismas dimensiones y peso, porque el motor stirling es lento al responder las demandas de potencia, ya que para variar este parámetro es necesario controlar las temperaturas de ambas zonas, lo que conlleva mucho tiempo. Es por eso que los investigadores no profundizaron más en la investigación del motor stirling para poder mejorarlo [4].

Estos problemas anteriormente mencionados nos permiten realizar una evaluación del motor stirling con la finalidad de poder realizar un algoritmo de cálculo que se basa en el análisis termodinámico de la eficiencia térmica en función a los ángulos del cigüeñal, presión atmosférica, volúmenes muertos del pistón, fluido de trabajo y diferentes parámetros de diseño, con el objetivo de predecir la potencia de salida teniendo en cuenta las diferentes irreversibilidades del sistema, para poder analizar las pérdidas y tratar de que a futuro mejoren en un nuevo diseño más confortable y eficiente.

Justificación

Social: La población se verá beneficiada a un mejoramiento más eficiente del acceso eléctrico, reduciendo el crecimiento significativo del consumo de energía eléctrica en el país.

Económica: La inversión de realizar un análisis termodinámico de un motor stirling, permitirá mejorar la estabilidad de producción de energía eléctrica.

Ambiental: Un análisis termodinámico no contaminará el medio ambiente, pero permitirá identificar el sistema con mayores ineficiencias termodinámicas, que servirá para un nuevo diseño, el cual sea más amigable con el medio ambiente.

Tecnológica: Se desarrollará primeramente un balance de masa y energía, luego un balance entrópico mediante un algoritmo de cálculo para poder identificar su trabajo, entropía y rendimiento, y de esa manera poder realizar una configuración para obtener un óptimo desempeño.

Objetivo general

- Analizar termodinámicamente el motor stirling solar v161 mediante un algoritmo de cálculo para encontrar la eficiencia térmica.

Objetivos específicos

- Describir los parámetros de funcionamiento del motor stirling.
- Seleccionar la adecuada estructura del algoritmo de cálculo genérico para el análisis termodinámico.
- Estructurar la relación matemática para el análisis térmico del funcionamiento del motor stirling.
- Analizar las curvas de trabajo del motor stirling en función a sus parámetros de entrada.

Revisión de literatura

Mundo

Según Miguel Ángel Vives Albesa (2016), su objetivo es diseñar un motor stirling basado en el motor stirling SOLO v161, en donde hace referencias al funcionamiento del ciclo stirling, las distintas etapas del ciclo y su arquitectura. Además, realiza una adaptación geométrica del motor seleccionado, lo cual permite la extracción de datos geométricos para realizar el presente análisis [1].

Según Enríquez Cisneros Luis Carlo y Guadalupe Almeida Jorge Luis (2011), su objetivo principal es diseñar y construir un motor stirling solar para un laboratorio, indicando la base teórica para la compresión del ciclo termodinámico, en donde se muestran los parámetros de diseño afectando en la práctica al ciclo stirling, por ese motivo estable unos criterios para predecir los resultados más cercanos a la realidad. Además, explica el diseño en base de cálculos termodinámicos de transferencia de calor y masa, y la construcción del colector parabólico, así como sus ensayos y resultados obtenidos [3].

Según Isidro María Santos Ráez (2015), se ha realizado una a análisis térmico del diseño propuesto por Isshiki Naotsugu, para aplicarlo en los sistemas CSP que se basan en el acoplamiento de un motor Stirling, donde se llevó a cabo comportamiento térmico en base a modelos de primer, segundo y tercer orden y del flujo para un motor stirling con una configuración tipo beta para su aplicación en sistemas Dish Stirling, en la cual se analizó las pérdidas termodinámicas del modelo propuesto, que afectan a la eficiencia del motor [2].

Según González López Juan Pablo (2018), se desarrolla el diseño de un concentrador solar parabólico acoplado con un receptor térmico fijo para la cogeneración de energía eléctrica y calor de proceso de alta temperatura, donde se habla acerca del receptor que es un componente clave en un sistema de disco stirling porque éste debe convertir la energía solar concentrada a calor y transferirlo al fluido de trabajo del motor en condiciones de alto flujo de 75 a 100 W/cm² y temperaturas de 700-800 °C. Se requiere entonces estudiar la unión de un disco Scheffler con una UGE para evaluar si el ensamble tiene un funcionamiento adecuado para alcanzar estas concentraciones [4].

Según una breve introducción extraído de Romero Toscano (2010), se realizará un análisis termoeconómico que combina análisis exergético y los principios económicos para proveer al diseñador u operador del sistema con información no disponible a través del análisis energético y evaluación económica convencionales, pero crucial para el diseño y operación de un sistema rentable, por lo que se considera la termo-economía como una minimización de costes con ayuda de la exergía. El sistema a analizar es el disco stirling Eurodish por lo que se dividirá en seis elementos para obtener la influencia de cada elemento sobre el sistema en su totalidad [5].

Según Jorge Losada San José, se llevara a cabo una análisis de un sistema disco parabólico, ya que en su país natal destacan tecnologías renovables como la energía eólica

y solar, por lo que el análisis se realiza debido a que existen estaciones fotovoltaicas con un rendimiento entre el 10% y 15%, mientras que existen prototipos basados en instalaciones solares térmicas de una alta temperatura que desarrollan mayores rendimientos (sistema Dish-Stirling) que los sistemas fotovoltaicos, alcanzando entre el 25% y 30% de rendimiento en condiciones nominales de operación. Además, analiza pérdidas en los procesos mecánicos y termodinámicos debido a que en los intercambiadores existen pérdidas de presión y calor, ya que los procesos de expansión como de compresión no son adiabáticos [6].

Lambayeque

Según Carlos Eduardo Bardales Tomás, realizara un diseño de un motor stirling para la generación de energía eléctrica, en donde narra sus diferentes aplicaciones, sus componentes del motor y sobre todo en correlación con esta tesis, sobre el ciclo stirling real. El ciclo real tiene una forma de elipse, ya que este pierde potencia y con ello disminuye su rendimiento, donde uno de los efectos es debido al giro del cigüeñal y el otro efecto es debido a la relación de temperaturas que existe entre la zona fría y caliente. Es por ello que, al aumentar el valor de la relación de temperaturas, ocasionará que el ciclo térmico sea más delgado [7].

Bases teóricas científicas

1.1.1 El motor stirling

Todo empieza a inicios del siglo XIX mediante la revolución industrial cuando surgieron las primeras máquinas de vapor que agilizaba el trabajo que llevaba mucho tiempo realizar y sobre todo proporcionaba energía a las grandes industrias. Sin embargo, estas presentaban algunos peligros, además que eran costosas e ineficaces, ya que tenían que controlar que la presión de las calderas porque tendían a explotar causando graves accidentes.

Estos inconvenientes dieron inicio al inventor escocés Robert Stirling un 17 de setiembre de 1816, propusiera el patente número 4081 con un título, mejoras para disminuir el consumo de combustible y en particular un motor capaz de ser aplicado al movimiento de maquinaria con base a un principio completamente nuevo [2, p. 34]. Es decir, un motor de ciclo cerrado regenerativo.

El funcionamiento del motor stirling se basaba en una fuente de alimentación mediante combustión externa, donde tenía como fluido de trabajo al aire a una presión moderada y una sujeción a los procesos de calentamiento, expansión, enfriamiento y compresión. Este motor integraba un regenerador de calor o también llamado en aquella época como economizador que tenía como función mejorar el rendimiento térmico.

El motor stirling se desempeña en aplicaciones industriales agrícolas, bombas de agua, en barcos, refrigeración y generadores eléctricos. Otro de los usos es el del sistema Dish-Stirling, en el que utiliza un captador parabólico en la que concentra la radiación solar en

un solo punto como fuente de alimentación, donde se encuentra ubicado el motor stirling que transforma energía térmica en energía eléctrica. La superioridad de estos motores es que el desgaste es mucho menor, debido a que es un ciclo cerrado, por lo tanto, desempeña un alto grado de confiabilidad y duración en su funcionamiento.

Existen modelos de motores Dish-Stirling, pero se desea analizar el motor stirling V161 que es un mejoramiento del motor SOLO V160 [8], ya que en un futuro este motor stirling brindará mayor eficiencia porque permitirá un mejor rendimiento para la generación de energía eléctrica con mínimas emisiones de efecto invernadero.



Figura 1. Sistemas Dish-Stirling [2]

1.1.2 Sistema Dish-Stirling

Los sistemas Dish-Stirling son conjuntos pequeños de generación de energía eléctrica que a través de la radiación solar directa utilizan un conjunto de espejos reflectores que, concentrada la luz solar en un solo punto focal con temperaturas muy altas, en donde se encuentra el receptor solar que sirve para calentar al fluido de trabajo a temperaturas aproximadamente de 850°C , en la cual utiliza un seguimiento solar continuo alrededor de dos ejes para poder perseguir el sendero diario del sol y poder desarrollar el ciclo termodinámico que convertirá energía térmica en energía mecánica para luego generar energía eléctrica gracias al motor stirling.

El sistema Dish-Stirling es muy flexible debido a su tamaño y modularidad que le permite operar de manera individual en remotas aplicaciones, teniendo un peso aproximado de 460kg. Un sistema stirling genera entre 5 y 25 kW y en conjunto tiene una capacidad de hasta 10MW [6].

El sistema Dish-Stirling está compuesto por un concentrador solar parabólico, receptor, sistema de rastreo y el motor stirling.

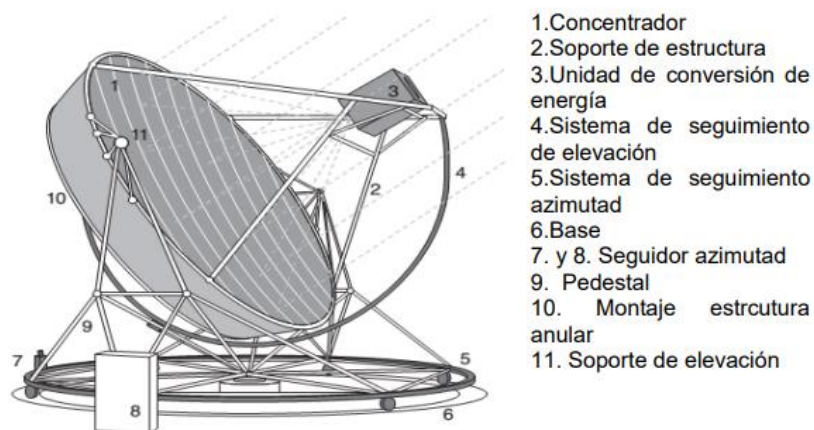


Figura 2. Componentes del sistema Dish-Stirling [9]

1.1.3 Concentrador solar parabólico

El concentrador es una fuente de alimentación para el motor Stirling, que concentra y refleja la luz solar en el punto focal, a través del seguimiento del sol en dos ejes. Los concentradores están compuestos de 12 partes individuales que utilizan como material a la resina de fibra de vidrio para poder reflejar, donde una vez hecha la instalación, tiene la forma de un caparazón parabólico semi-perfecto que están unidos mediante vigas rígidas en forma circular. Debido a que los concentradores tienen longitudes focales cortas, se requiere de espejos de vidrio fino (0,8mm de espesor) que están unidos al frente lado de los segmentos para poder conseguir una alta reflectividad alrededor del 94%.

1.1.4 Controladores

El concentrador requiere estar siempre orientado hacia el sol para poder obtener una buena reflectividad, es por ello que necesita de un sistema de seguimiento biaxial, es decir un seguimiento de elevación acimutal y en coordenadas polares, donde el concentrador gira en un plano paralelo a la tierra y en otro perpendicular a la misma, respectivamente, por medio de un pequeño servo motor. Este sistema se basa en una estructura de acero móvil que es sostenida mediante seis ruedas [6].

Los sistemas Dish-Stirling funcionan de manera autónoma debido a controladores electrónicos que se encuentran ubicados en el concentrador, para controlar la orientación hacia el sol por intermedio de un sensor de seguimiento solar y también para regular el funcionamiento del motor. En algunos sistemas emplean controladores por separado, pero en los grandes proyectos existe un sistema de control y de adquisición de datos (SCADA) utilizados para recolectar datos del funcionamiento del sistema de una manera acorde con otras instalaciones de generación de energía eléctrica [10].

1.1.5 Receptor

El receptor es la conexión entre el concentrador solar y la zona caliente del pistón de expansión del motor Stirling, que absorbe la radiación solar mediante el reflejo del concentrador y transmite la energía absorbida al pistón desplazador en forma de calor con insignificantes pérdidas [10].

En los sistemas Stirling se aplican receptores de cavidad, en donde la radiación concentrada entra a través de una apertura que se encuentra en el foco del concentrador, cayendo más adelante sobre el absorbedor. De esta manera se logra homogenizar el reflejo del sol incidente sobre el absorbedor, además se obtiene mínimas pérdidas radiativas y convectivas.

Existen dos tipos de receptores para sistemas Dish-Stirling: Receptores de tubos de iluminación directa (V161) y de reflujo [6].

1.1.5.1 Receptores de tubos de iluminación directa

Los receptores de iluminación directa se utilizan en los calentadores de motores Stirling convencionales. Estos receptores están formados por tubos, en los cuales circulan el fluido de trabajo extremadamente presurizado (5 – 20MPa) para poder transformar esa energía térmica en energía mecánica, a temperaturas aproximadamente de 850°C, pero debido a estas altas temperaturas de trabajo para los absorbedores es muy difícil la utilización de recubrimientos selectivos debido al gran solape de la radiación emitida y absorbida [6]. Un problema de estos sistemas es que no hay uniformidad en el flujo de radiación, lo que ocasiona que dentro de los tubos absorbedores presenten picos de temperatura, limitando la temperatura máxima a la que puede llegar el fluido para evitar sobrepasar la temperatura máxima tolerable en los materiales.

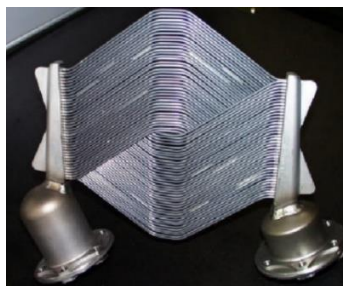


Figura 3. Receptor de motor v161 [10]

1.1.5.2 Receptores de reflujo

Este receptor emplea generalmente como fluido a un metal líquido (sodio) para poder transmitir la energía térmica, a través de su evaporación en la superficie del absorbedor y también por su condensación del fluido de trabajo que circula a través de los tubos. Este fenómeno se da porque a través de la condensación del metal líquido, la gravedad realiza su trabajo ocasionando que el fluido regrese a la superficie del absorbedor. Este absorbedor presenta algunas ventajas como el calentamiento del fluido más uniforme por lo que permite desarrollar receptores más pequeños.

Estos dos tipos de motores debido a la flexibilidad que poseen de una fuente de calor, tienen la posibilidad de operar mediante un receptor híbrido, ya que presentan adicionalmente un quemador de gas que se puede generar mediante la quema de combustibles fósiles, de manera que puede funcionar durante el día en periodos nublados y durante el transcurso de la noche.

Estos motores tienen la posibilidad de estar disponible las 24 horas del día, ya que con el sistema híbrido usando especialmente biogás como fuente de energía suplementario, este sistema cumple con todos los requisitos que exige la red, siendo un sistema futurista respetuoso con el medio ambiente; por lo que puede sustituir a los motores diésel que actualmente se utilizan en el mercado para apoyar en horas punta la demanda energética eléctrica, lo cuales poseen un precio muy elevado [6].

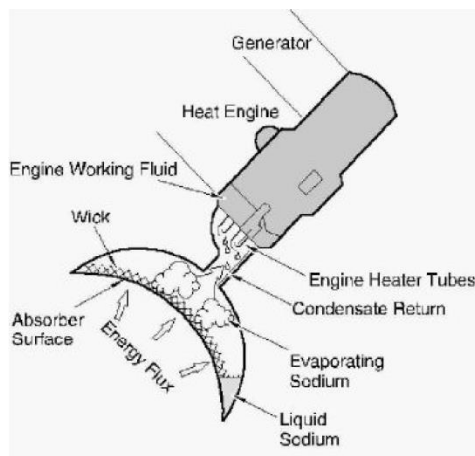


Figura 4. Receptor de relajo [6]

1.1.6 Alternador

Este equipo se encarga de convertir la energía mecánica producida por el motor en energía eléctrica. Los sistemas Dish-Stirling emplean generadores de inducción para que así puedan unirse al sistema interconectado (red), donde al sincronizarse pueden proporcionar una potencia trifásica de 230 o 460 voltios con una eficiencia de aproximadamente el 94%. Estos equipos contienen inversores que convierten la corriente continua en corriente alterna, permitiendo emplear equipos de corriente continua como generadores, que pueden moverse a régimen de giro variable, lo que permite tener una mayor flexibilidad para adaptarse a la demanda de la red eléctrica instantánea [6].

1.1.7 Sistema de refrigeración

Los motores requieren transferir grandes cantidades de calor al medio ambiente, todo esto debido a sus capacidades estructurales, es por ello que estos motores hacen uso de un radiador para poder intercambiar el calor que existe entre el motor y la atmósfera [6].

1.1.8 Motor Stirling

Los motores Stirling dependen de un suministro de calor externo sin importar de qué manera se genere el calor, a diferencia de un motor Otto o Diésel, que funcionan con combustión interna y es alimentado por petróleo o ya sea gas. Por eso se dice que el motor Stirling es un buen candidato para convertir la energía térmica en energía mecánica. En este motor no existe contaminación interna en los pistones, cojinetes y mucho menos degradación del lubricante, debido a que no existe una combustión de combustibles como en los motores de combustión interna, es por ello que estos motores Stirling tienen un ciclo de vida potencialmente sorprendente, además de que no originan ruido ni vibraciones [6].

El motor stirling utiliza una cantidad constante fija de fluido de trabajo dentro de los pistones ya que la cavidad es hermética debido al sellado de los pistones, originando que el fluido se calienta y enfría debido a que se comprime cuando este frío y se expande cuando está caliente, generando así el movimiento de los pistones que mueven el cigüeñal dando origen al movimiento mecánico. Es por ello que este motor está apto para producir energía eléctrica mediante un concentrador solar, donde al aumentar la temperatura, la eficiencia será más superior [10].



Figura 5. Motor v161 [10]

1.1.9 Partes del motor stirling

Las partes de un motor stirling se componen mediante:

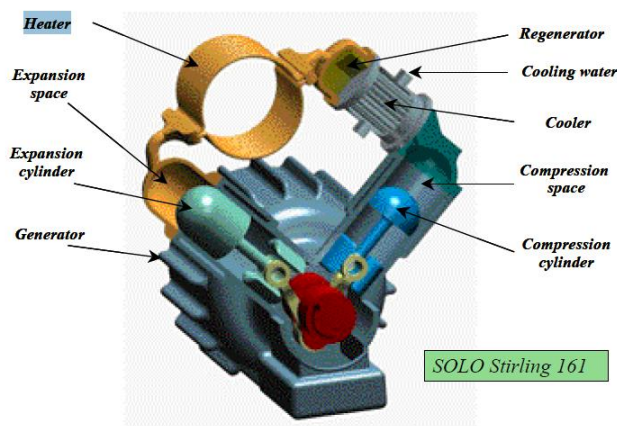


Figura 6. Partes de un motor stirling [11]

1.1.9.1 Zona caliente

Esta es la zona del motor que está sometida a altas temperaturas, ya que a través de esta zona se brinda calor al sistema, por ello utiliza materiales resistentes al creep (parte

dependiente del tiempo de las deformaciones provenientes de tensiones) como acero al cromo, acero inoxidable austenítico, entre otros.

La zona caliente del motor puede cambiar su forma esto dependiendo de la configuración y de su propósito de trabajo, ya que dentro de una forma simple no existe ningún tipo de presurización dentro del cilindro, por lo que el cilindro puede ser con una tapa plana, pero en una forma compuesta si existe presurización, de manera que su forma debe tener un aumento de dimensiones para tener mejor área de transferencia de calor, obteniendo así una mayor porción de fluido de trabajo.

Se recuerda que esta zona va a variar en función al fluido de trabajo que se pretende utilizar, debido a que la conductividad térmica de los gases es muy diferente [12].

1.1.9.2 Zona fría

Mediante la zona fría se puede extraer el calor del motor por convección libre o forzada. Durante el suceso que se da, ya sea de manera libre o natura, se utilizan aletas de aluminio para poder disipar el calor, por lo que es una transmisión escasa de eficiente que se utiliza en motores con pequeñas dimensiones y no presurizados, pero si es a través de convección forzada, se acondiciona una camisa de agua para que la temperatura sea la más baja posible, por ende, debe de disponer de una fuente de agua a una temperatura ambiente, para que así se evacue el calor del fluido de trabajo [12]. En este sistema a mayor evacuación del calor, obtendremos una baja temperatura para poder aumentar la eficiencia termodinámica del motor, ya que obtendremos una presión mayor que favorece al proceso de compresión.

1.1.9.3 Regenerador

Este es una de las partes más importantes para el motor stirling, ya que se encarga de absorber y entregar calor al fluido de trabajo, igualando una fracción perdida por el motor, ocasionando que la velocidad y potencia se eleven. Una ventaja de utilizar un fluido de trabajo con una buena conductividad térmica, es que se necesita absorber menor calor en cada ciclo para poder realizar el trabajo en corto tiempo.

Encontramos diversas configuraciones para los regeneradores, uno de ellos son los móviles que se encuentran en el interior del desplazador y otros son los estáticos que se pueden encontrar fuera o dentro del cilindro.

Debido a que el regenerador desenvuelve un papel importante para mejorar el intercambio de calor y mejorar el rendimiento del motor stirling, esto se debe en gran parte a su material, ya que se necesita una alta capacidad de almacenamiento de energía térmica y una conductividad térmica menor en la dirección del flujo, originando una gradiente de temperatura. La capacidad térmica volumétrica de cualquier material se puede medir mediante ρC_p (J/m^3K), donde a mayor valor, mayor será el calor a absorber.

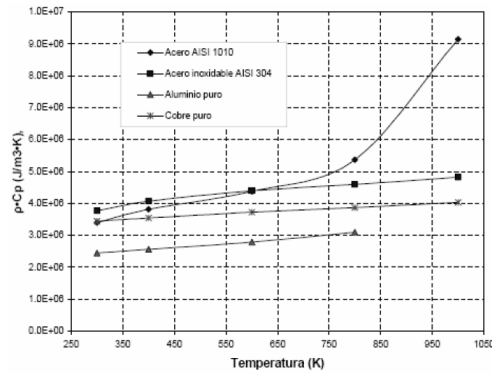


Figura 7. Capacidad térmica volumétrica de materiales [7]

También encontramos otro parámetro que es la difusividad térmica que se encarga de medir la conducción de energía de un material en relación con la capacidad de almacenamiento de energía térmica, donde a menor valor, menor serán los problemas de transferencia de calor. $\alpha = k/\rho C_p$ (m^2/s)

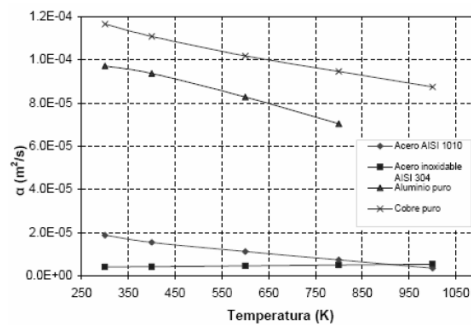


Figura 8. Difusividad térmica volumétrica de materiales [7]

Los materiales utilizados en su mayoría en el regenerador, son láminas de papel de aluminio, lana de acero o hilos de acero inoxidable finos. Sin embargo, la Nasa en 1999 desarrollo un prototipo de regenerador de un motor stirling a base de fibra de carbono, debido a que este reducirá las perdidas térmicas y de flujo por debajo de los generadores convencionales hechas de matrices metálicas.

Un generador tradicional tiene la forma cilíndrica, que está formado por uno o varios canales axiales para la transferencia de calor hacia y desde el fluido que se va trabajar. Las mayores pérdidas termodinámicas se encuentran en el regenerador, esto es debido a que se limitan en el material, por lo que se recomienda materiales a base de fibra de carbono para un mayor rendimiento, debido a que es térmicamente un aislante en dirección axial e intercambia calor rápidamente con el fluido de trabajo.

La conductividad térmica en las fibras de carbono es de aproximadamente 300 a 1000 W/mK, es decir 20 a 67 veces la conductividad del acero inoxidable. Las conductividades térmicas transversales, tiene tan solo 1/100 de sus conductividades longitudinales, es por eso que se dice que es ideal utilizar este tipo de material para regeneradores stirling, debido a que contiene fibras a través de canales de flujo axial, trayendo como

consecuencias caídas de presión y volúmenes muertos más pequeños, ofreciendo mayor potencial de efectividad de transferencia de calor para una fricción de flujo determinada [13].

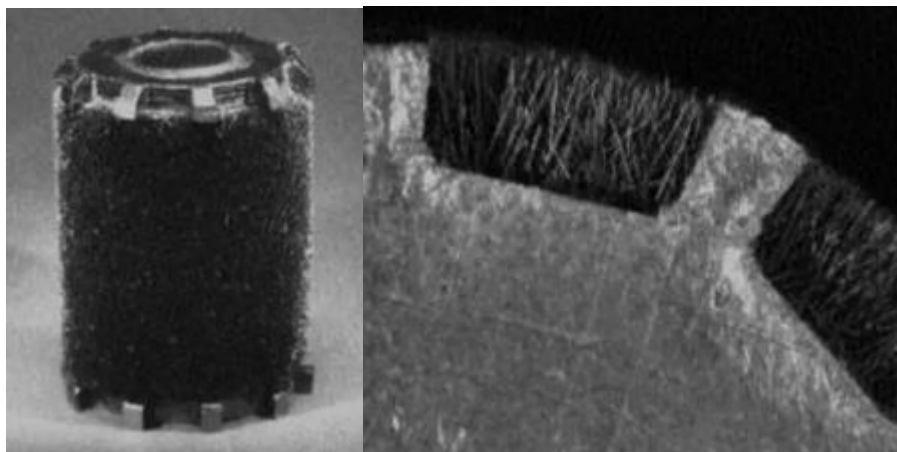


Figura 9. Regenerador de fibras de carbono [13]

1.1.9.4 Pistón

El pistón se encarga de efectuar el trabajo motriz, por lo que se conecta al mecanismo de transformación de movimiento. Cuando el pistón se encarga de expandir, este debe ser ligero debido a que se encargara de movilizar el fluido de trabajo, pero cuando el pistón se encarga de realizar el trabajo, este debe ser presurizado llevando consigo anillos para mantener la presión del sistema.

1.1.9.5 Pistón desplazador

Este pistón se encarga de movilizar el fluido de trabajo de un extremo de la cámara a otro, gracias a la ayuda de un flujo de calor, de manera que transita alternativamente el fluido de trabajo desde el depósito que brinda energía en forma de calor (fuente) hasta el depósito que absorbe energía en forma de calor (sumidero).

Debido al flujo de calor, existe una discrepancia de temperaturas entre el espacio del desplazador superior e inferior, que ocasionan que el fluido se expanda o se contraiga, cambiando la presión del motor según la posición del desplazador. Esta presión aumenta cuando el desplazador se encuentra ubicado en la parte superior del cilindro, debido a que la mayor parte del fluido de trabajo se encuentra en lado inferior caliente del pistón, y la presión disminuye cuando el desplazador se encuentra ubicado en la parte inferior del cilindro. El pistón debe ser ligero y con una baja transmisión de calor, debido a que solo debe mover el fluido de trabajo hacia adelante y hacia atrás, de la zona caliente a la zona fría del motor, pero sin priorizar demasiado esfuerzo al movimiento, ya que este pistón no hace funcionar al cigüeñal ni al motor.

La longitud del desplazador puede ser más grande, es decir 1 a 3 veces su diámetro, y su holgura radial entre el pistón y el cilindro debe ser de 1 a 2% del diámetro del cilindro, porque mediante esta manera puede existir un efecto de regeneración [7].

1.1.9.6 Pistón de potencia

Cuando la presión del motor logra su máximo a causa del movimiento del desplazador, el fluido de trabajo en expansión empuja al pistón de potencia que recibe directamente los efectos del gas, es decir la energía cinética que abarca el fluido de trabajo y que se estrella siempre en este pistón, para poder transformar la energía cinética en energía mecánica, donde será aprovechada mediante un alternador que permitirá obtener energía eléctrica. Es recomendable que el pistón de potencia se encuentre desfasado 90° con el pistón desplazador.

Para obtener una continuidad del movimiento de los pistones junto al fluido de trabajo, se requiere un par de condiciones; primeramente, que en la fuente como en el sumidero, el flujo de calor sea lo más constante posible, y segundo es que tanto el pistón desplazador como el pistón de potencia, coordinen para no perder la continuidad del movimiento. Por lo tanto, el pistón de potencia como el pistón desplazador, llegan a concluir cada uno por su parte una función primordial para obtener trabajo [7].

1.1.9.7 La volante

Al conectar el pistón desplazador y el pistón de potencia, la volante crea un desequilibrio del sistema mecánico, manteniendo un ángulo de aproximadamente de 90° entre ambos pistones, obteniendo que en un punto dado la masa en desequilibrio de la volante impulse al pistón desplazador para que pueda mover el fluido de la zona caliente a la fría, reiniciando así el ciclo stirling [7].

1.1.10 Funcionamiento

Para que el motor pueda funcionar, primeramente, precalentamos el fluido de trabajo, para que de esa manera todo el fluido caliente que se encuentre en el cilindro del pistón desplazador, se mueva con una presión elevada hacia el pistón de potencia, en donde el fluido de trabajo es enfriado con el objetivo de comprimirse para lograr aumentar nuevamente la presión y hacer que el fluido de trabajo regrese al pistón desplazador.

El pistón desplazador es muy característico de motores stirling, ya que no origina variaciones en el volumen del fluido de trabajo dentro del ciclo térmico, por lo tanto, su función es desplazar el fluido de trabajo de la zona caliente hacia la zona fría y viceversa [8]. Todo este ciclo funciona porque existe una variación de temperaturas entre los pistones, una zona caliente de alta presión y una zona fría de presión atmosférica. La variación de presiones ocasiona que el pistón baje, teniendo como consecuencia un movimiento que se aprovecha para generar potencia energética y de esa manera poder hacer que todo el sistema mecánico funcione.

El primer estado es la fase de precalentamiento, en donde el pistón debe permanecer en el punto muerto inferior del pistón desplazador para que así esté disponible y pueda calentar mayor proporción de aire. Ya calentado el gas, se estimula el motor stirling, mediante un motor auxiliar de arranque, provoca un giro que ocasiona que el fluido de trabajo que ha aumentado su presión, se desplace a la zona del pistón de potencia [1].

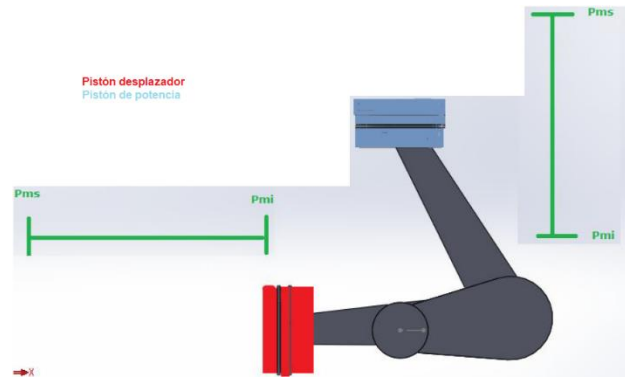


Figura 10. Pre calentamiento del fluido de trabajo al máximo [1]

En el segundo estado, el fluido de trabajo se desplaza al pistón de potencia, aprovechando la presión del fluido para generar potencia, ocasionando que el pistón se desplace hacia abajo.

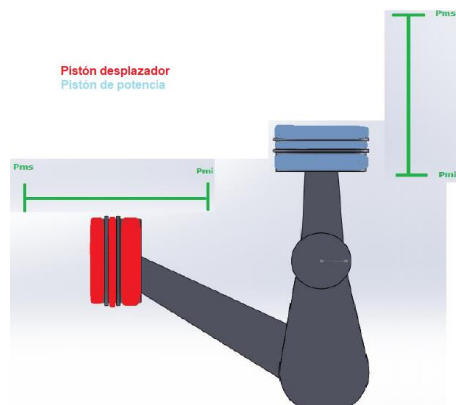


Figura 11. El fluido de trabajo atraviesa la zona 1 a la 2 [1]

En el tercer estado, el fluido de trabajo se encuentra ubicada en la cámara del pistón de potencia, debido al aprovechamiento del desplazamiento de la presión del fluido de trabajo. En este lugar el fluido de trabajo perdió temperatura, porque de igual manera que en los estados anteriores cede calor al exterior.

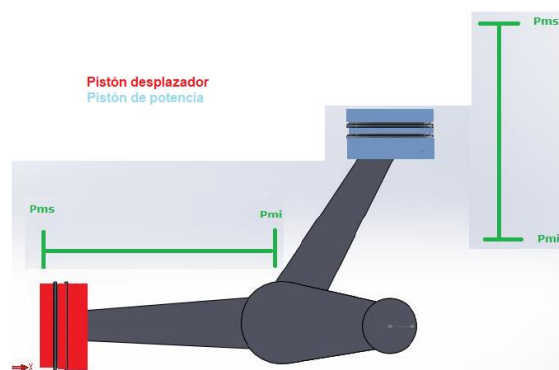


Figura 12. Todo el fluido de trabajo está en la zona 2, donde el enfriamiento está al máximo [1]

En el cuarto estado, por una diferencia de temperaturas, ocasiona que la zona fría impulse el fluido de trabajo con una menor presión hacia la zona del pistón desplazador, cerrando así el ciclo termodinámico stirling, debido a que el fluido de trabajo se encuentra nuevamente en el estado número uno, pero esta vez con una temperatura mayor que la del precalentamiento, por lo tanto, el tiempo en el que se encuentra el pistón desplazador en zona caliente será menor [1].

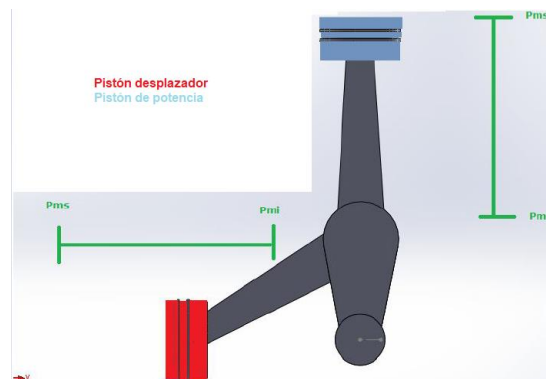


Figura 13. Todo el fluido de trabajo está en la zona 1, donde empieza de la reducción de presión del ciclo [1]

1.1.11 Tipos de motor stirling

Los motores stirling se clasifican en función a la configuración de los cilindros, mediante la ligación mecánica entre pistones y su utilización, ya sea de simple efecto o de doble efecto.

1.1.11.1 Motores cinemáticos con pistones de simple efecto

En este motor existe combustión una sola cámara para realizar el ciclo de trabajo, por lo que encontramos diferentes configuraciones (cilindros verticalmente y horizontalmente opuestos, en forma de v y paralelos) y diseños de motor stirling, pero todos parten de los modelos básicos que son los modelos alfa, beta y gamma, donde todos los motores funcionan a través de una externa [8].

1.1.11.2 Motor tipo beta

Es el motor stirling original que fue el primer prototipo fabricado por Robert Stirling, el cual presenta una configuración de un solo cilindro para el pistón de trabajo y el pistón desplazador, donde mediante una biela el pistón desplazador atraviesa al pistón de trabajo, es por ello que ambos se encuentran conectados hacia el mismo cigüeñal en distintos puntos con un desfase de 90° con respecto al otro.

Este tipo de motor es constructivamente el más difícil de fabricar, debido a que se tiene que atravesar la biela por el medio del pistón de trabajo y un cigüeñal especial para que no haya pérdidas de presión. Se dice que este motor es termodinámicamente el más eficiente [1].

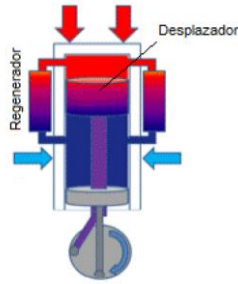


Figura 14. Motor tipo beta [1]

1.1.11.3 Motor tipo gamma

Los motores gamma son un enlace característico de los motores tipo alfa y beta, pero a diferencia de los motores beta estos cuentan con dos cilindros (desplazador y de potencia), mismo que hace pasar el fluido de trabajo entre las dos zonas a través de un regenerador, por lo que ocasiona que haya volúmenes muertos más elevados y sea ineficiente en comparación con la configuración tipo beta. Esta configuración al igual que la beta, se encuentra desfasada 90° con respecto a las del cigüeñal.

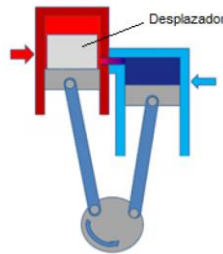


Figura 15. Motor tipo gamma [1]

1.1.11.4 Motor tipo alfa

La configuración de este motor se basa en dos pistones por cilindro en un ángulo de 90° , una zona caliente y otra fría, donde se descarta la necesidad de utilizar un desplazador porque este ejercicio lo realizan los pistones. Para obtener que los cierres del pistón de la zona caliente en el cilindro de expansión trabajen a temperaturas altas, se suele emplear un pistón alargado para apartar los cierres de las partes calientes del motor. Ambas bielas van conectadas desde el mismo punto del cigüeñal [1].

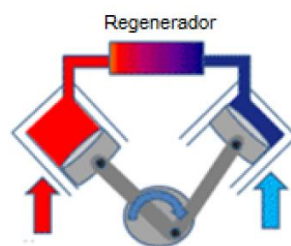


Figura 16. Motor tipo alfa [1]

1.1.11.5 Motores cinemáticos con pistones de doble efecto

En este motor están interconectados muchas unidades de simple efecto, llegando a obtener un motor con configuración de doble efecto que logra obtener un incremento de potencia específica, debido a que en el extremo de un pistón se somete a la presión de dos ciclos stirling posteriores [8].

Un motor de doble efecto organiza el trabajo en la parte superior y también inferior del pistón, por lo tanto, la zona superior como la inferior pueden trabajar como pistón de potencia o ya sea como pistón desplazador, de manera que cuando el pistón se traslada al punto superior, traslada con ello al fluido de trabajo hacia la siguiente cámara y a la misma vez ingresa el fluido de trabajo de la cámara anterior, reduciendo el problema de fugas ya que el fluido que escapa de un ciclo va al otro y no hacia el entorno exterior [3].

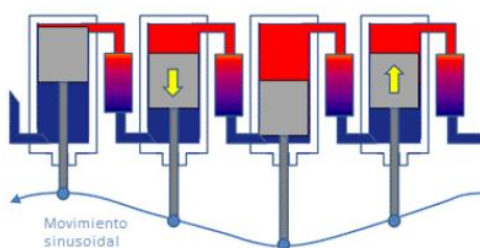


Figura 17. Motor de doble efecto [3]

1.1.12 Ciclo stirling ideal

El motor stirling es una máquina térmica de combustión externa que se fundamenta en base al ciclo termodinámico stirling, la cual funciona mediante un ciclo cerrado de gas, que puede ser el aire, el helio, hidrogeno, argón u otros. El motor stirling genera energía mecánica a través de la diferencia de temperaturas de los dos focos, que se encarga de comprimir y expandir respectivamente de forma cíclica, originando un movimiento alternativo de los pistones, que están unidos a un mecanismo de accionamiento mecánico, que origina la potencia de salida [2].

Este motor es incapaz de arrancar por sí solo, por ello utilizamos un motor de arranque, en donde primeramente tiene que precalentarse ópticamente en el pistón desplazador para luego dar uso al motor de arranque, y de esa manera el motor stirling empiece a funcionar.

Este motor pierde eficiencia debido al gran desajuste de temperaturas existentes entre el fluido de trabajo de las zonas. Es por ello que el inventor escocés Robert Stirling minimiza este problema mediante la instalación de un regenerador, desarrollado para aumentar la eficiencia del motor, por lo tanto, este ciclo se destaca debido al regenerador, que se encarga de almacenar momentáneamente el calor y luego devolverlo al sistema, minimizando la energía arrojada hacia el exterior. El regenerador es un elemento poroso que tiene una alta capacitancia térmica (calor específico) para absorber y entregar calor.

El ciclo stirling es uno de los muchos ciclos que más se acerca al rendimiento de Carnot, sin embargo, al momento de poner en funcionamiento, el rozamiento del fluido de trabajo

junto con diversos elementos y las irreversibilidades de los procesos, ocasionan que el rendimiento decaiga. La restricción de este motor stirling es que trabaja a velocidades bajas, ya que, si el gas pasa muy rápido a través de las zonas, la consecuencia de enfriar y calentar el fluido de trabajo ocasiona un bajo intercambio y disminuye el rendimiento, debido a que no funciona dentro de un régimen que le otorga hacer adecuadamente la transferencia de calor [1].

El ciclo termodinámico stirling ideal se desarrolla mediante cuatro etapas, dos procesos isotérmicos e isocóricos. En el proceso isotérmico se parte primeramente por el calentamiento a alta temperatura y luego enfriando a baja temperatura, y en el proceso isocórico primeramente almacena parte del calor del gas caliente en el regenerador y luego precalienta el gas frío con la energía almacenada en el regenerador.

El ciclo termodinámico stirling ideal se compone por los siguientes procesos.

- Primeramente, se admite calor de una fuente a temperatura constante T_H , realizando el proceso de expansión isotérmica del fluido de trabajo por el cambio de estado del punto 1 al 2, entregando calor al sistema.
- El segundo es el proceso de regeneración a volumen constante del punto 2 al 3, en la cual el fluido de trabajo transfiere calor al regenerador, disminuyendo su temperatura.
- El tercer proceso se tiene una compresión a temperatura constante T_L del punto 3 a 4, en el que existe un rechazo de calor a un sumidero externo, cediendo calor al foco frío.
- El último proceso es la regeneración a volumen constante del punto 4 al 1, donde se transporta calor desde el regenerador al fluido de trabajo [3].

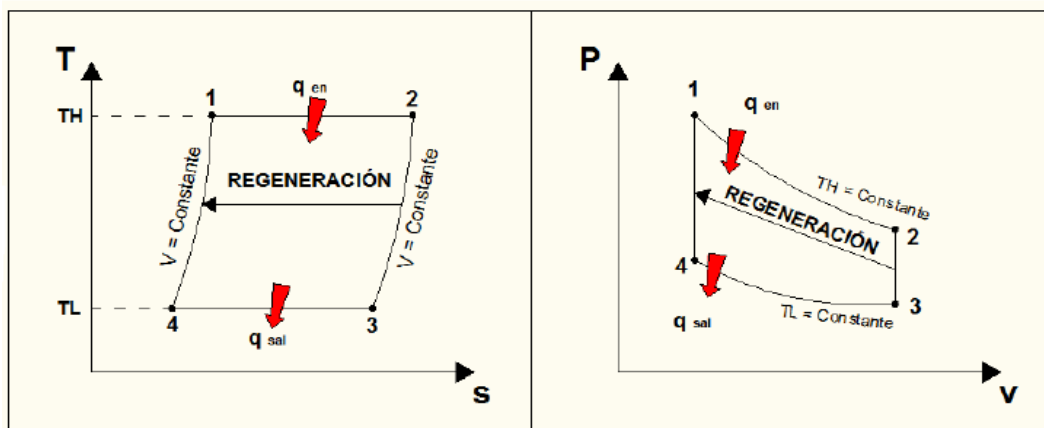


Figura 18. Diagrama de $T - s$ y $P - v$ correspondiente al ciclo stirling [3]

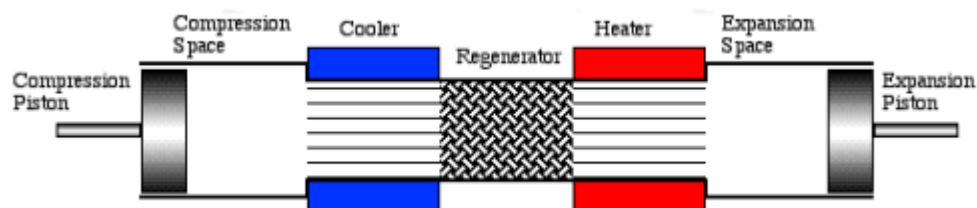


Figura 19. Partes del cilindro del motor [9]

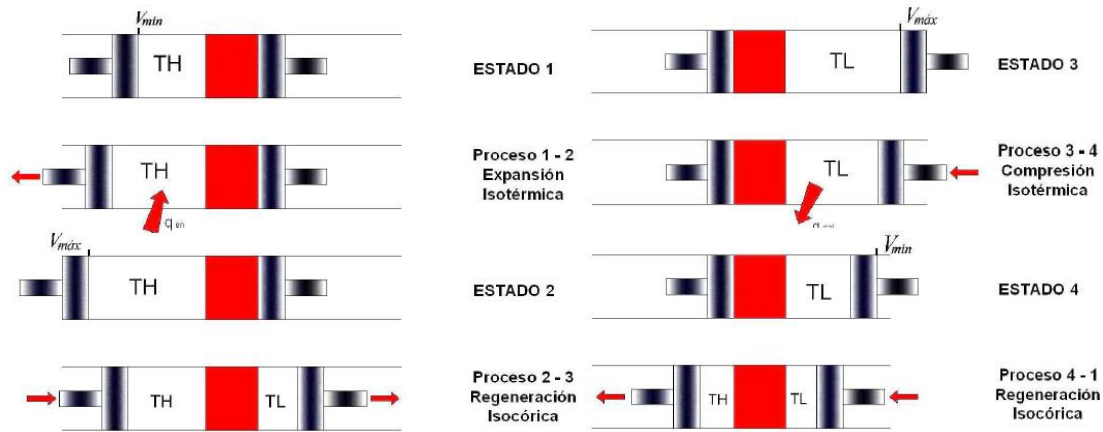


Figura 20. Funcionamiento del ciclo stirling [3]

1.1.12.1 Trabajo realizado por el ciclo

Entrada de calor a temperatura constante T_H .

$$W_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT_H}{v} dv$$

$$W_{1-2} = RT_H \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)$$

Acumulación de calor de regeneración a volumen constante.

$$W_{2-3} = \int_{v_2}^{v_3} P dv = 0$$

Salida de calor a temperatura constante T_L .

$$W_{3-4} = \int_{v_3}^{v_4} P dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT_L}{v} dv$$

$$W_{3-4} = RT_L \ln\left(\frac{v_{min}}{v_{max}}\right)$$

Regeneración a volumen constante.

$$W_{4-1} = \int_{v_4}^{v_1} P dv = 0$$

La suma de los trabajos en cada proceso es el trabajo neto del motor.

$$W_{neto} = R(T_H - T_L) \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)$$

1.1.12.2 Calor suministrado al ciclo

Para hallar el trabajo realizado por el ciclo, se analizará cada punto del diagrama P-V, donde se obtienen diferentes expresiones.

Entrada de calor a temperatura constante T_H .

$$dq = du + Pdv$$

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} CvdT + \int_{v_1}^{v_2} Pdv$$

$$q_{1-2} = w_{1-2} = RT_H \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)$$

Acumulación de calor de regeneración a volumen constante.

$$dq = du + Pdv$$

$$q_{2-3} = \int_{T_2}^{T_3} CvdT = Cv(T_L - T_H)$$

Salida de calor a temperatura constante T_L .

$$dq = du + Pdv$$

$$q_{3-4} = \int_{T_3}^{T_4} CvdT + \int_{v_3}^{v_4} Pdv$$

$$q_{3-4} = w_{3-4} = RT_L \ln\left(\frac{v_{min}}{v_{max}}\right)$$

Regeneración a volumen constante.

$$q_{4-1} = \int_{T_4}^{T_1} CvdT = Cv(T_H - T_L)$$

El calor que entra al sistema es de esta forma el del proceso 1-2.

$$q_{entrada} = RT_H \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)$$

1.1.12.3 Eficiencia del ciclo termodinámico

La eficiencia del ciclo es la relación entre el trabajo neto y el calor suministrado.

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$$

$$\eta = \frac{R(T_H - T_L) \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)}{RT_H \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)}$$

Obteniendo la eficiencia a partir de las fórmulas del ciclo de Carnot, debido a que ambos son reversibles [3].

$$\eta_{ter,stirling} = \eta_{ter,carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}}$$

1.1.13 Características del motor stirling

En la presente tesis elaborará un análisis de un determinado motor stirling, el cual es el motor stirling V161 tipo alfa, pero esto no quita la posibilidad de que otros tipos de motores puedan realizar el cálculo, ya que se elaborará un algoritmo el cual es apto para cualquier tipo de motor stirling cinemático con pistones de simple efecto, es decir tipo alfa, beta o gamma. Es estos datos del motor stirling alfa se encontraron en un proyecto europeo llamado Euro-Dish.

Tabla 1. Características del motor stirling [8]

Motor	Unidades	V161
Configuración		Alpha
Nº de cilindros		2 en V
Gas		Helio / Hidrógeno
Cilindros		
Diámetro del cilindro de expansión	cm	6,8
Diámetro del cilindro de compresión	cm	6,8
Carrera del pistón de expansión	cm	4,4
Carrera del pistón de compresión	cm	4,4
Ángulo de desfase	deg	105
Cilindrada del motor	cc	194,6
Calentador		
Número de tubos en el calentador		78
Longitud de los tubos del calentador	cm	32
Diámetro de los tubos del calentador	mm	1,8
Volumen muerto del calentador	cc	63,52
Enfriador		
Número de tubos en el enfriador		302
Longitud de los tubos del enfriador	cm	8,8
Diámetro de los tubos del enfriador	mm	1,25
Volumen muerto del enfriado	cc	32,61
Regenerador		
Longitud del regenerador	mm	30
Radio hidráulico característico del regenerador	mm	0,0279
Diámetro del alambre del regenerador	mm	0,05
Volumen muerto de la malla del regenerador	cc	68,68

1.1.14 Parámetros que afectan el funcionamiento del motor stirling

Existen muchas definiciones en las que se dice que el motor stirling es el que se acerca al máximo rendimiento de Carnot, pero esto se da gracias a que se asume un ciclo stirling ideal con procesos reversibles, con una transferencia de calor y una efectividad del regenerador completa, sin la pérdida de alguna presión y sin volúmenes muertos, sin

embargo, al momento de poner en funcionamiento al motor stirling no cumple lo indicado por el ciclo stirling ideal, reduciendo así la eficiencia del motor [3].

1.1.14.1 Efecto de la transferencia de calor en las zonas caliente y fría

Lo que realmente impide una transferencia de calor completa en el ciclo es la resistencia térmica de las paredes de los cilindros, como también del fluido de trabajo para asegurar que el fluido se encuentre a la misma temperatura.

Los puntos 1, 2, 3, 4 representan el ciclo ideal stirling y los puntos 1', 2', 3', 4', representan el ciclo real, es por ello que, en la realidad la incompleta transferencia de calor en la zona caliente ocasiona una baja temperatura de calentamiento, dando como resultado la reducción de presión y trabajo ($1' - 2'$). De la misma forma la transferencia de calor en la zona fría ocasiona un crecimiento de la temperatura de enfriamiento, de manera que se necesita un mayor trabajo para poder comprimir el fluido como en los puntos $3' - 4'$ [3].

Se puede evidenciar que la zona caliente está más sometida a las condiciones ideales que en la zona fría.

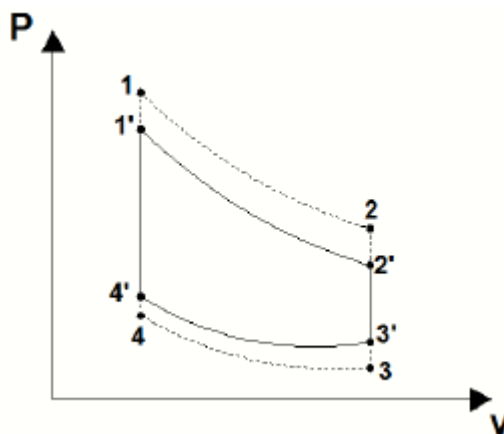


Figura 21. Efectos de la transferencia de calor ideal y real [3]

Para una mejor transferencia de calor, se recomienda usar áreas grandes de transferencia a través de calentadores y enfriadores tubulares.

1.1.14.2 Efecto de la transferencia de calor en el regenerador

La función del regenerador es recoger energía calorífica de fluido de trabajo caliente para enfriarlo y después brindar igual cantidad de energía al gas frío en su calentamiento, es decir que el regenerador debe tratar en lo mínimo de regular la temperatura del fluido de trabajo, cuando el fluido acceda a la zona fría con una temperatura lo más mínima posible, de la misma manera cuando el fluido caliente entre en la zona caliente, esta debe tener la temperatura más elevada posible.

Si la temperatura del fluido de trabajo que logra llegar a la zona caliente es menor que la temperatura máxima, obtendremos una presión inferior a la que se obtiene en el ciclo

ideal, de manera que se representa con el punto 1'. De igual manera si la temperatura del fluido de trabajo en la zona fría es superior que la temperatura baja, obtendremos una presión mayor, representada con el punto 3'.

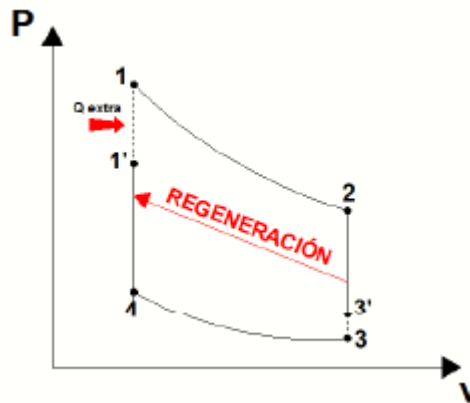


Figura 22. Efecto de transferencia de calor en el regenerador [3]

La efectividad del regenerador de la zona fría y caliente se define mediante:

$$\varepsilon = \frac{T'_1 - T_L}{T_H - T_L}$$

La eficiencia es la relación entre el trabajo neto y el calor entregado al sistema.

$$\eta_\varepsilon = \frac{W_X}{Q_{entrada}}$$

El trabajo neto es:

$$W_X = W_{12} + W_{34}$$

$$W_X = \int_1^2 P dV + \int_3^4 P dV$$

$$W_X = mRT_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} + mRT_3 \int_3^4 \frac{dV}{V} = mRT_H \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + mRT_L \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

$$W_X = mR(T_H - T_L) \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

Donde $R = C_P - C_V$, y $k = C_P / C_V$

Reemplazando se tiene lo siguiente:

$$r_V = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

$$\zeta = \frac{T_L}{T_H}$$

Obtenemos:

$$W_X = mC_V T_H (k - 1)(1 - \zeta) \ln(r_v)$$

El calor que debería recibir el sistema:

$$Q_{entrada} = Q_{12} + Q_{1'1}$$

El calor que debe recibir durante el proceso isocórico:

$$Q_{1'1} = mC_V(T_H - T_{1'})$$

Adicionando el calor recibido durante el proceso isotérmico:

$$Q_{entrada} = mC_V(T_H - T_{1'}) + mRT_H \ln(r_v)$$

Simplificando a través de las equivalencias da como resultado:

$$Q_{entrada} = mC_V T_H [(1 - \varepsilon)(1 - \zeta) + (k - 1) \ln(r_v)]$$

Al reemplazar la eficiencia teórica y la eficiencia de la relación de trabajo y el calor, da como resultado la efectividad del regenerador que afecta a la eficiencia global [3].

$$\eta_\varepsilon = \frac{(k - 1)(1 - \zeta) \ln(r_v)}{[(1 - \varepsilon)(1 - \zeta) + (k - 1) \ln(r_v)]}$$

1.1.14.3 Efecto de fugas del fluido de trabajo

En cualquier motor uno de los requerimientos es una buena estanqueidad de la cámara de trabajo, para así poder alcanzar una más alta eficiencia, pero realmente esta condición es muy difícil de mantener, ocasionando que la eficiencia del motor sea menor. Cuando el fluido de trabajo logra la máxima temperatura después de fase de calentamiento, tiende a perder masa y presión ocasionado que origine una menor cantidad de trabajo, como se puede evidenciar en los puntos de 1' - 2'. Después de finalizar el proceso de enfriamiento se tiene un ingreso de gas y un incremento de presión, donde es esencial un mayor trabajo para comprimir el fluido como se ve en los puntos 3' - 4'.

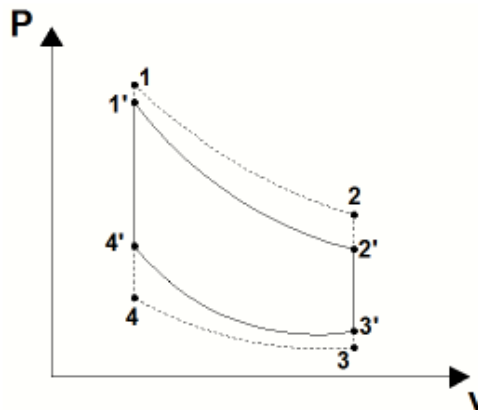


Figura 23. Fugas del fluido de trabajo [3]

Como se observa en la figura, los puntos $1'$, $2'$, $3'$, $4'$ que conforman el ciclo real stirling nos da como resultado un menor trabajo, defiriendo del ciclo stirling ideal [3].

1.1.14.4 Efecto de los espacios muertos

Es recomendable reducir los espacios muertos, ya que provocan una decadencia en el trabajo de salida del sistema, por motivos de las pérdidas de presión a causa de los volúmenes que no se ocupan. En el ciclo stirling ideal se asume que el fluido de trabajo en la zona caliente y fría ocupan todo el espacio destinado en el cilindro para ellos, sin embargo, en la realidad esto no se obtiene [3]. Esto es debido a que cuando el fluido de trabajo se encuentre en la zona caliente, una parte del fluido se encontrara en la zona fría, disminuyendo la presión del ciclo, es por ello que se sugiere reducir los espacios muertos en la zona caliente, fría y en el regenerador.

1.1.14.5 Efecto del movimiento del pistón

En aspectos termodinámicos se considera que el movimiento del pistón es discreto, pero es condición no se da en la realidad. En la figura actual se puede evidenciar que en el ciclo real el área se reduce debido al movimiento del pistón, el cual cambiara según el mecanismo que adopte en la generación de trabajo del motor stirling, donde el volumen máximo y mínimo se representan mediante los puntos a y b respectivamente, la zona caliente en el punto c y la zona en el punto d [3].

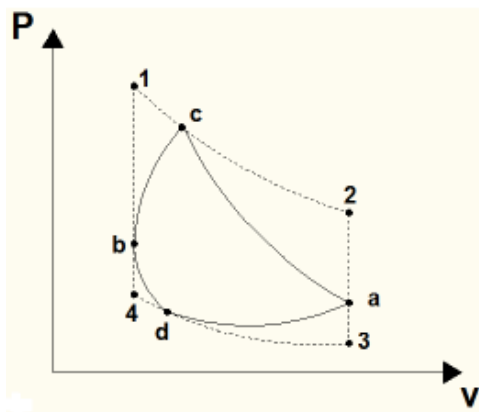


Figura 24. Efectos del movimiento del pistón [3]

1.1.14.6 Efectos combinados

Cuando se combinan todos los efectos anteriormente mencionados, no se consigue valores del ciclo ideal, lo que ocasiona una reducción considerable con respecto al trabajo neto del ciclo stirling, por lo tanto, el ciclo quedará descrito de una forma elíptica. En un motor stirling real los efectos se encuentran interrelacionados, aunque no de una forma armónica, como por ejemplo si se aumenta la transferencia de calor, entonces contaremos con menores espacios muertos y operar a mayores velocidades, pero al operar a grandes velocidades incrementa las pérdidas de calor por rozamiento [3].

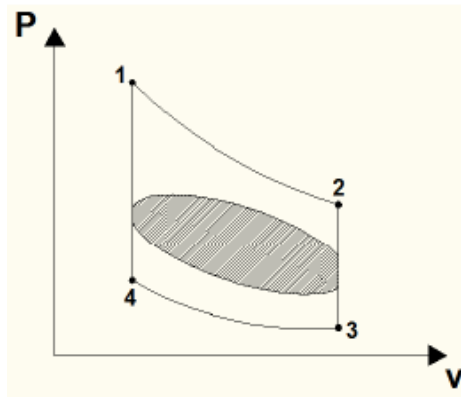


Figura 25. Efectos combinados entre el ciclo ideal y real. [3]

1.1.15 Análisis termodinámico en el que se consideran los efectos del motor stirling

Se obtendrá una aproximación real al funcionamiento del motor stirling.

1.1.15.1 Efecto de los espacios muertos

Primeramente, se considera que la temperatura en el volumen caliente es constante e igual a la temperatura alta, de la misma manera para la temperatura en el volumen frío es constante e igual a la temperatura baja, Además se asume que el volumen del regenerador tiene una temperatura T_R que se aproxima con el promedio entre la temperatura de la zona caliente y fría, donde tiene una distribución lineal a lo del regenerador [14], dando como resultado:

$$T_R = \frac{T_H + T_C}{2}$$

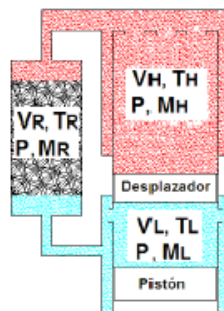


Figura 26. Las tres zonas del motor stirling [3]

El motor stirling en cada una de las zonas abarca un volumen a una temperatura máxima, a temperatura mínima y una temperatura intermedia. La presión será la misma en cada uno de los volúmenes y a la vez a la presión general del motor.

El volumen muerto es aquel que no se utiliza dentro del ciclo stirling, pero que existen tanto en la zona fría como también en la caliente. El volumen del fluido de trabajo que está en una alta temperatura, es la suma resultante entre el volumen útil y el volumen de las zonas muertas. De la misma manera para el volumen del fluido que se encuentra a una

baja temperatura, será la suma del volumen útil y el volumen muerto, donde la presión del fluido de trabajo estará en función a las variaciones que ocurren del volumen [15].

Masa en el volumen caliente.

$$m_H = \frac{PV_H}{RT_H}$$

Masa en el volumen frío.

$$m_L = \frac{PV_L}{RT_L}$$

Masa en el volumen del regenerador.

$$m_R = \frac{PV_R}{RT_R}$$

La masa total en el motor, es la resultante de las masas contenidas en los diversos volúmenes.

$$m = m_H + m_L + m_R$$

Al reemplazar las ecuaciones de los volúmenes da como resultado.

$$m = \frac{PV_H}{RT_H} + \frac{PV_L}{RT_L} + \frac{PV_R}{RT_R}$$

También se puede obtener la presión de acuerdo a la anterior ecuación.

$$P = \frac{mRT_H T_L T_R}{V_H T_L T_R + V_L T_H T_R + V_R T_H T_L}$$

La presión es muy importante porque nos permite conocer los límites de presión en lo que se desarrollará el trabajo del motor, además que encontramos el trabajo generado en el ciclo mediante la fórmula:

$$w_{neto} = \sum_{ciclo} \lim_{\Delta V \rightarrow 0^+} (P \Delta V)$$

Donde ΔV es la variación del volumen en un instante de tiempo.

De la misma forma encontramos la temperatura general, que se calcula en base a la presión general.

$$T = \frac{PV}{mR}$$

Para calcular la entropía en cada instante (S_t) y obtener el diagrama T – S, es necesario considerar el efecto de los espacios muertos, con respecto a un estado inicial específico del fluido de trabajo, en donde se considera que el volumen es V_0 y la temperatura T_0 [3].

$$S_t = m \left(C_V \ln \left(\frac{T_t}{T_0} \right) + R \ln \left(\frac{V_t}{V_0} \right) \right)$$

1.1.15.2 Efecto del movimiento del pistón

Las características del movimiento del pistón, tiene que ver mucho con la relación del tipo de mecanismo que rige el movimiento del pistón, sus dimensiones y su geometría. Es por ello que es movimiento de los pistones, contribuyen sobre la forma en el que el volumen caliente y el volumen frío varían, además rige la variación en la presión del sistema.

Ya que en el motor stirling se acopla un mecanismo tipo biela – manivela. Entonces se obtendrá una variación en el volumen de la cámara de una forma casi senoidal.

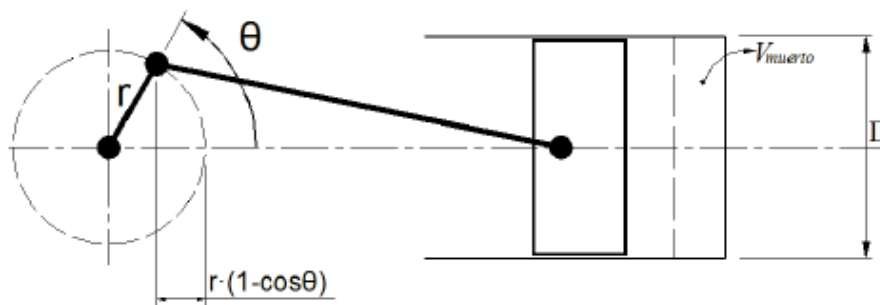


Figura 27. Pistón tipo biela – manivela [3]

Mediante los parámetros de entrada calcularemos el volumen por cada cilindro, sin el uso de los volúmenes muertos.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 S$$

El volumen en el interior de la cámara, es la suma resultante entre el volumen muerto y el volumen interior, el cual depende del ángulo θ de giro del cigüeñal.

$$V = V_{muerto} + \frac{\pi D^2}{4} S (1 - \cos \theta)$$

De acuerdo al tipo de motor se calcula la variación de volumen en cada zona, de la misma forma que la variación de presión [3].

1.1.15.3 Eficiencia del regenerador

En un ciclo stirling se tiene dos tipos de procesos de transferencia de calor, uno isotérmico en el que se transfiere el calor entre el ciclo y la fuente, y el otro isocórico que transfiere hacia o desde el regenerador.

Considerando los efectos del movimiento del pistón y de los espacios muertos, se analiza el ciclo stirling en donde se aproxima que en cada intervalo de tiempo pequeño existe a la vez una transferencia de calor a una temperatura constante y a volumen constante, como se ilustra en el diagrama T – S.

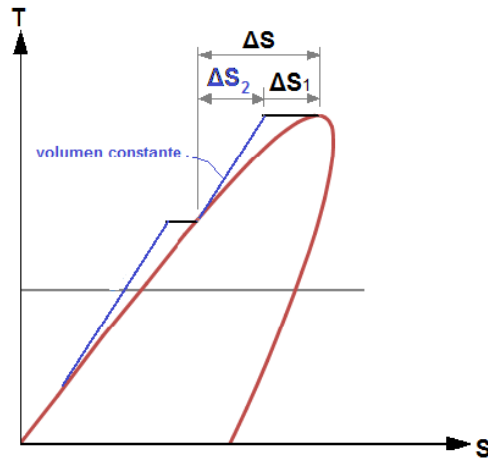


Figura 28. Variación de entropías a temperatura constante y a volumen constante [3]

El calor entregado al ciclo en un intervalo de tiempo pequeño se analiza de la siguiente manera:

$$dQ = TdS = dU + PdV$$

Que es equivalente a:

$$\Delta Q = T\Delta S = C_V\Delta T + P\Delta V$$

En el proceso a temperatura constante obtendremos que:

$$\Delta Q_1 = T\Delta S_1$$

$$\Delta Q_1 = P\Delta V$$

$$\Delta S_1 = \frac{P\Delta V}{T}$$

$$\Delta S_1 = \frac{MR\Delta V}{V}$$

En un proceso a volumen constante obtendremos que:

$$\Delta Q_2 = T\Delta S_2 = \Delta U$$

$$\Delta Q_2 = mC_V\Delta T$$

$$\Delta S_2 = \frac{mC_V\Delta T}{T}$$

El calor que recibe y entrega el regenerador se transferirá en un proceso a volumen constante, teniendo en cuenta que el regenerador en la realidad no es eficiente al 100%, de manera que no puede utilizar a totalidad el calor en el proceso a un volumen constante, ya que parte de este calor es complementado por fuentes externas.

Al final el calor que se suministra al regenerador será la suma de todas las cantidades de calor aportados al ciclo en un proceso isocórico, que será multiplicado por la efectividad del regenerador.

$$Q_{regenerador} = \varepsilon \left(\sum_{\text{ciclo}} \lim_{\Delta T \rightarrow 0^+} (mC_V \Delta T) \right)$$

El calor entregado por la fuente externa a una alta temperatura será el resultado de las porciones de calor en un proceso a temperatura constante más el calor que no puede utilizar el regenerador.

$$Q_{entrada} = \left(\sum_{\text{ciclo}} \lim_{\Delta V \rightarrow 0^+} (P \Delta V) \right) + (1 - \varepsilon) \left(\sum_{\text{ciclo}} \lim_{\Delta T \rightarrow 0^+} (mC_V \Delta T) \right)$$

La eficiencia general de todo el ciclo stirling se basa en dividir el trabajo neto sobre el calor total de entrada.

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$$

El trabajo generado tiene una relación con el torque promedio, donde a veces el torque permite apreciar el funcionamiento del motor stirling. La fórmula del torque promedio está dada por el producto entre radio de aplicación de la fuerza y la fuerza promedio.

$$\overline{Torque} = \bar{F} r$$

La fórmula del trabajo se expresa como el producto entre la distancia recorrida del ciclo y la fuerza promedio, es decir la fuerza por el perímetro que es aplicada.

$$W_{neto} = \bar{F} (2\pi r)$$

Entonces calculamos el trabajo neto en función del torque promedio y viceversa [3].

$$W_{neto} = \overline{Torque} (2\pi)$$

Materiales y métodos

Tipo y nivel de investigación

Básica: El presente estudio cumple con una condición metodológica de una investigación básica, debido a que su desarrollo se basa en principios y leyes de la termodinámica.

Descriptiva y analítica: La investigación presente reúne por su nivel la metodología de investigación descriptiva y analítica, ya que se realizará el análisis mediante los parámetros o variables de entrada para describir la manera más real de obtener los resultados.

Diseño de investigación

Cuantitativo: El análisis termodinámico, se llevará mediante la medición numérica y el análisis estadístico, donde se describe y se mide con precisión la eficiencia térmica del motor stirling.

Población y muestra

La población abarcará a todos los motores stirling.

La unidad de estudio se especificará en motores stirling con configuración alfa.

Criterios de selección

Eficiencia térmica

Potencia energética

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Revisión de posteriores tesis.

Revisión de papers en revistas académicas.

Valores de fichas técnicas.

Procedimiento de recolección de información

La recolección de datos se obtendrá de revistas científicas confiables para estimar los parámetros de entrada, como las dimensiones del motor stirling.

Variables operacionales

Variable independiente: Análisis termodinámico

Variable dependiente: Eficiencia térmica

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores
Análisis termodinámico	Realiza el análisis de la conversión de calor en trabajo mecánico o de la transformación de una energía en otra.	Análisis térmico mediante un modelo matemático.	Balance de entropía y exergía. Pérdidas por transferencia de calor.
Eficiencia térmica	Es la relación entre la energía que deseamos obtener y la energía consumida.	Determinar las irreversibilidades del sistema.	Trabajo realizado. Energía suministrada.

Procesamiento y análisis de datos

Obteniendo los parámetros de entrada se analizará el motor stirling para calcular sus irreversibilidades termodinámicas para mejorar la generación de energía eléctrica.

Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente	Tipo de investigación
¿Será factible realizar un análisis termodinámico al motor stirling V161 para encontrar su eficiencia térmica?	Analizar termodinámicamente el motor stirling solar v161 mediante un algoritmo de cálculo para encontrar la eficiencia térmica.	Al realizar el análisis termodinámico se podrá encontrar las irreversibilidades que permitirá mejorar los parámetros de salida.	Análisis termodinámico Balance de entropía Exergía	Nivel de investigación Descriptiva y analítica Metodología de investigación Método estadístico
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente	Diseño de investigación
¿Qué se espera al describir los parámetros de funcionamiento?	Describir los parámetros de funcionamiento del motor stirling.	Al describir los parámetros de funcionamiento del motor stirling, entonces, se identificarán los mecanismos de pérdidas termodinámicas que ocurren en el concentrador y el receptor.	Eficiencia térmica Conservación de la masa y energía Potencia energética	Quantitativo Población Los motores stirling Muestra Motores stirling alfa
¿Qué beneficios obtengo al estructurar un algoritmo de cálculo?	Seleccionar la adecuada estructura del algoritmo de cálculo genérico para	Al seleccionar la adecuada estructura del algoritmo de cálculo, entonces se podrá desarrollar		Técnicas e instrumentos Análisis documental

	el análisis termodinámico.	ordenadamente la solución del problema, para garantizar un mejor resultado.		Tesis Papers Fichas técnicas
¿Cómo una relación matemática de un análisis térmico contribuiría a comprender de manera más realista el análisis termodinámico?	Estructurar la relación matemática para el análisis térmico del funcionamiento del motor stirling.	Al estructurar la relación matemática entonces, se obtendrá los parámetros de salida del motor stirling de manera más real en donde se podrá identificar su eficiencia térmica en función al ángulo del cigüeñal.		Origin Excel Python
¿Para qué me sirve las gráficas de curvas en función de los parámetros de entrada?	Analizar las curvas de trabajo del motor stirling en función a sus parámetros de entrada.	Al analizar las gráficas del motor stirling, entonces nos facilitara la comparación de datos y las diferencias de error de las curvas termodinámicas.		

Resultados y discusión

Descripción de los parámetros de funcionamiento del motor stirling

Para realizar el análisis termodinámico necesitaremos los parámetros de entrada que se toma necesario para poder realizar el análisis, donde cada parámetro se describirá de acuerdo a las dimensiones de cada componente, partiendo por el concentrador solar, el receptor y por último el motor stirling, detallando las características del funcionamiento con respecto al proyecto EuroDish, para que de esa manera pueda haber una mejor comprensión con el procedimiento del proyecto.

Uno de los componentes principales en el proyecto EuroDish es el concentrador o disco parabólico que se caracteriza por tener un alto rendimiento, encargado de reflejar y concentrar la radiación solar sobre el receptor directamente iluminado, para luego calentar el fluido de trabajo y dar marcha al trabajo mecánico.

Las características tomadas del proyecto EuroDish [5] son las siguientes:

Tabla 2. Condiciones de operación del proyecto EuroDish

Componente	Parámetro	Cantidad	Unidad
Concentrador	Diámetro del concentrador (d_c)	8,5	m
	Distancia focal (f)	4,5 m	m
	Factor de interceptación (φ)	0,93	-
	Reflectividad (ρ)	0,94	-
	Factor de concentración (C_{max})	2500	-
	Rendimiento del concentrador ($\eta_{concentrador}$)	0,82	-
	Emisividad del material (Em_{cav})	0,917	-
	Error total del colector solar (σ_{total})	1,7	mrad
Receptor	Diámetro apertura de la cavidad (d_{ap})	18	cm
	Diámetro del absorbedor (d_{rec})	26	cm
	Rendimiento del receptor ($\eta_{receptor}$)	0,86	-
	Absorbancia de la superficie del material de la cavidad (α_{rec})	0,975	-
	Constante de Stefan-Boltzmann (σ)	$5,67 \times 10^{-8}$	W/m^2K^4
	Ángulo de inclinación (θ)	40	°
	Espesor del aislante térmico (L_{ter})	0,25	m
	Conductividad del material (k_{ais})	16,3	W/mK
Lugar	Temperatura en el receptor (T_{rec})	1000	K
	Irradiancia (I)	900	W/m^2
	Velocidad del aire (v)	3	m/s
	Temperatura ambiente (T_{amb})	298	K

Modelo óptimo

El concentrador parabólico es fundamental dentro del sistema, por tal motivo la apertura es grande para poder obtener mayor parte de radiación directa y transmitirla al absorbedor.

Primeramente, como dato fundamental para realizar el cálculo se debe tener el tamaño de apertura del concentrador y la distancia focal del disco parabólico, para calcular la profundidad de la parábola (h), que es la distancia máxima desde el vértice hasta la línea trazada de la apertura.

$$h = \frac{d_c^2}{16f}$$

Luego se determinará el ángulo de borde (Ψ), que es el ángulo medido desde el punto focal hasta algún otro punto en el borde de la parábola, el cual es el encargado del óptimo ingreso de la radiación al concentrador.

$$\Psi = \text{Arctan} \left[\frac{1}{\left(\frac{d_c}{8h}\right) - \left(\frac{2h}{d_c}\right)} \right]$$

El radio parabólico (p) viene hacer la distancia que va desde el punto focal hasta el borde del concentrador solar. La forma parabólica se usa frecuentemente como superficie reflectante porque cualquier línea paralela al eje de la parabólico, proyectará un ángulo de reflexión que es igual a un ángulo de incidencia en el punto focal.

$$p = \frac{2f}{1 + \cos(\Psi)}$$

El área de apertura del concentrador (A_c) es la zona donde incide la energía solar, se da mediante el área circular definida por el diámetro del concentrador.

$$A_c = \frac{\pi}{4} d_c^2$$

Pero el área total de la superficie del concentrador (A_s), se calcula mediante la distancia focal y el diámetro de apertura.

$$A_s = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[\left(\frac{d_c}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{3}{2}} - 1 \right\}$$

El tamaño de la cavidad del receptor (W_n) intercepta toda la radiación reflejada por el concentrador, pero es necesario saber la contribución de los errores del sistema del colector, a esto adicionando que la reflexión de los rayos no es paralela, entonces a partir de eso se determina la imagen del sol reflejada en el receptor de cavidad puntual mediante

la ecuación, además el número de desviaciones estándar (n) que por lo general es común usar dos o tres como dato para el análisis según Stine.

En estos sistemas se utilizan receptores pequeños, debido a que, si el receptor es grande perderá más calor debido a la conducción y radiación.

$$W_n = \frac{p \tan\left(n \frac{\sigma_{total}}{2}\right)}{\cos(\Psi)}$$

Modelo térmico

Se partirá realizando un balance de la cantidad de energía interceptada o energía útil que sale del concentrador y entra por el receptor de cavidad, está se calcula mediante la irradiancia, el área de superficie del concentrador, la reflectancia de los espejos y el factor de intercepción.

$$Q_{rec} = IA_c \rho \varphi$$

Una vez que la energía llega a la superficie del absorbedor o receptor empieza las pérdidas de calor, debido a la superación de la temperatura del entorno. Los mecanismos de pérdidas de calor son por radiación, convección y conducción, todas estas sometidas a la variación de temperatura del ambiente y el absorbedor.

El calor perdido por la reflexión de la radiación ($Q_{rad,ref}$) está dado mediante la reflectancia de la cavidad.

$$Q_{rad,ref} = (1 - \alpha_{eff}) Q_{rec}$$

La reflectancia efectiva de la cavidad (α_{eff}), tiene relación con el área de la abertura (A_{ap}), con respecto al área de la superficie interna (A_{cav}).

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha_{rec}}{\alpha_{rec} + (1 - \alpha_{rec}) \left(\frac{A_{ap}}{A_{cav}}\right)}$$

Las pérdidas debido a la radiación por emisión ($Q_{rad,emi}$) contribuyen a las pérdidas producidas por la radiación térmica que se da desde el concentrador parabólico hasta la hormaza de la cavidad. La emisividad en este parámetro es muy importante, ya que, al ser insignificante, también tendría una baja absorbancia, ocasionando que la energía solar se reduzca. Para ello tienen recubrimientos selectivos que mejoran la absorbancia de la energía solar.

$$Q_{rad,emi} = Em_{cav} \sigma A_{ap} (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)$$

Las pérdidas por convección (Q_{conv}) en el receptor de cavidad es proporcional al área de superficie del absorbedor y a la variación de temperaturas entre el absorbedor y la

temperatura ambiente, además el coeficiente de convección total se da mediante la suma de los coeficientes de convección natural y forzada.

$$Q_{conv} = h_{total} A_{int,cav} (T_{cav} - T_{amb})$$

$$h_{total} = h_{nat} + h_{forz}$$

La correlación propuesta por Stine y McDonald (Nu_L) se desarrolló de manera experimental donde encontraron pérdidas de calor por convección natural en el receptor en el que incluyeron los efectos de diferentes temperaturas, ángulos de inclinación y tamaños de apertura en la que obtuvieron la siguiente ecuación.

$$Nu_L = 0,088 Gr_L^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T_{ext,cav}}{T_{amb}} \right)^{0,18} \cos(\theta)^{2,47} \left(\frac{d_{ap}}{d_{cav}} \right)^S$$

$$\text{Donde } S = 1,12 - 0,982 \left(\frac{d_{ap}}{d_{cav}} \right)$$

El número de Grashof (Gr_L) viene hacer un número adimensional que se utiliza mayormente para análisis de transferencia de calor por convección natural, la cual se basa en la longitud de la cavidad donde g es la gravedad de la tierra, β es el coeficiente de expansión térmica del aire, L viene hacer la $\sqrt{2}$ por el diámetro de la cavidad y ν la viscosidad cinemática del aire en función de la temperatura.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_{cav} - T_{amb})L^3}{\nu^2}$$

El coeficiente de transferencia por convección natural (h_{nat}), es muy difíciles de predecir analíticamente, debido a que existen muchos fenómenos naturales, es por ello que por lo general se obtienen experimentalmente. Sin embargo, es muy importante para poder predecir los resultados de un motor aun no fabricado. En esta ecuación se utiliza la conductividad térmica del aire (k_{rec}).

$$h_{nat} = \frac{Nu_L k_{rec}}{D_{cav}}$$

Las pérdidas por convección forzada (h_{forz}) propuestas por Robert Y. Ma, son muy dependientes de la velocidad del viento y del ángulo de inclinación del receptor.

$$h_{forz} = f(\theta) v^{1,401}$$

Donde el ángulo de inclinación del receptor es igual a.

$$f(\theta) = 0,1634 + 0,7498 \text{ sen}(\theta) - 0,5026 \text{ sen}(2\theta) + 0,3278 \text{ sen}(3\theta)$$

Las pérdidas por conducción ocurren cuando el calor se transfiere por medio de las cubiertas o paredes de aislantes al medio ambiente, especificando en términos del espesor del material aislante y su sección transversal.

$$Q_{cond} = \left(\frac{T_{rec} - T_{amb}}{\frac{L_{ter}}{(k_{ais}A_{cav})} + \frac{1}{(h_{ext,rec}A_{cav})}} \right)$$

El coeficiente convectivo en el exterior del receptor ($h_{ext,rec}$) es casi insignificante, debido a que el sistema Stirling controla el grosor del aislamiento térmico.

$$h_{ext,rec} = 0,148(Re)^{0,633} \frac{k_{rec}}{d_{rec}}$$

Finalmente se realiza un balance de energía útil producida por el concentrador solar basada en el estudio de energía del receptor, donde nos brinda el resultado de la energía captada o la potencia de entrada al motor.

$$P_{entra,motor} = Q_{rec} - Q_{rad,ref} - Q_{rad,emi} - Q_{conv} - Q_{cond}$$

Y como datos tenemos la eficiencia del concentrador y del receptor, donde más adelante obtendremos a través del apartado número cuatro, la eficiencia del motor stirling.

Tabla 3. Resultados de potencia del análisis térmico

Parámetros	Cantidad	Unidad
Potencia total interceptada	44,65	kW
Pérdidas por reflexión	0,54	kW
Pérdidas de radiación por emisión	1,31	kW
Pérdidas por convección	0,50	kW
Pérdidas por conducción	0,42	kW
Total	41,87	kW

Algoritmo de cálculo termodinámico

El algoritmo brindará una secuencia de cálculo ordenado que permitirá resolver un determinado tipo de problemas térmicos relacionado con los motores stirling, simplificando así las matemáticas para ser comprendido por un amplio público, en donde primeramente se identificaran las características de los datos de entrada, luego las operaciones abstractas para luego poder efectuar análisis matemático.

Conforme se fue elaborando la investigación, surgieron muchos modelos de algoritmo, es por ello que se seleccionara el mejor algoritmo para garantizar una mayor rapidez en el resultado.

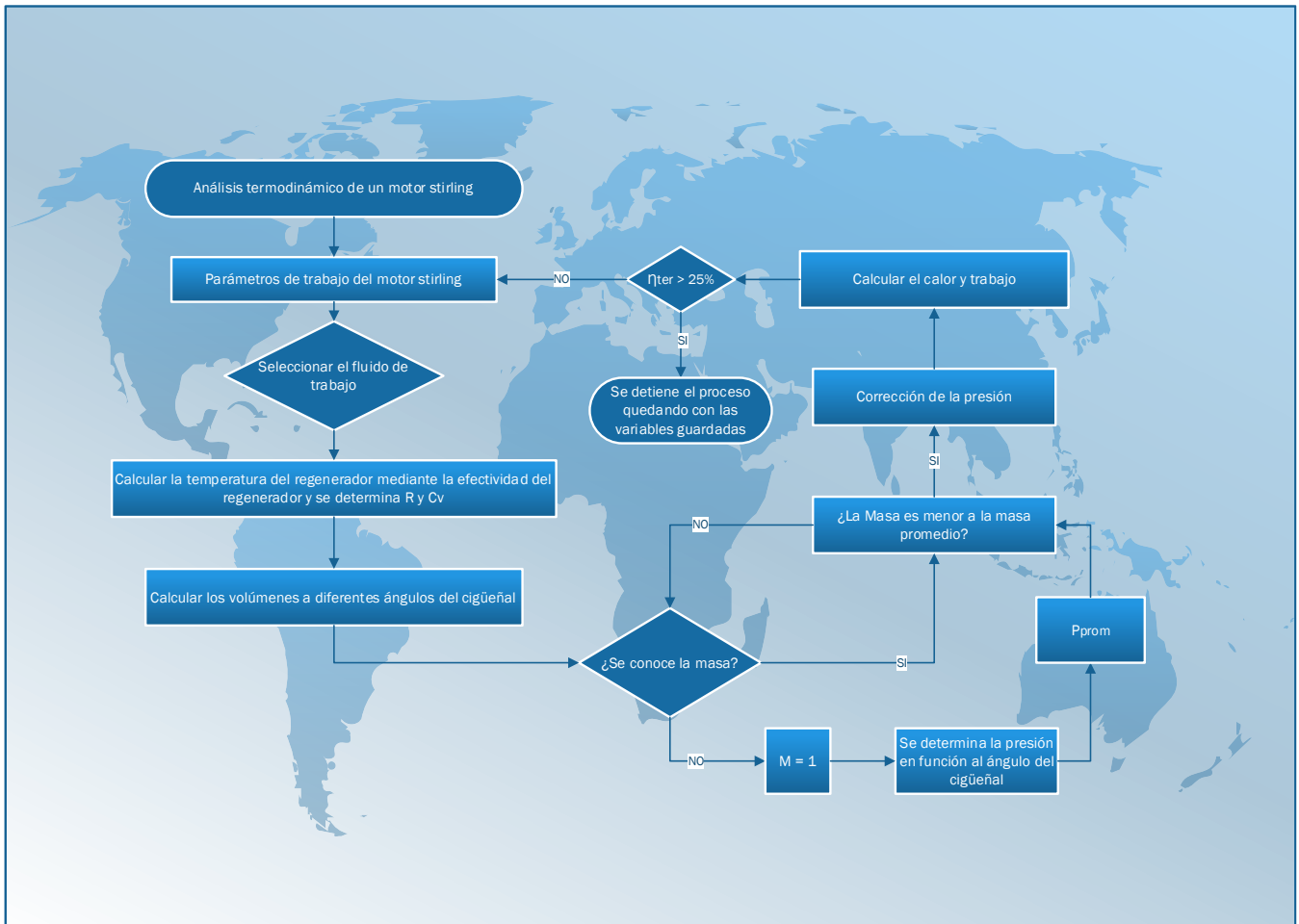


Figura 29. Algoritmo de cálculo I

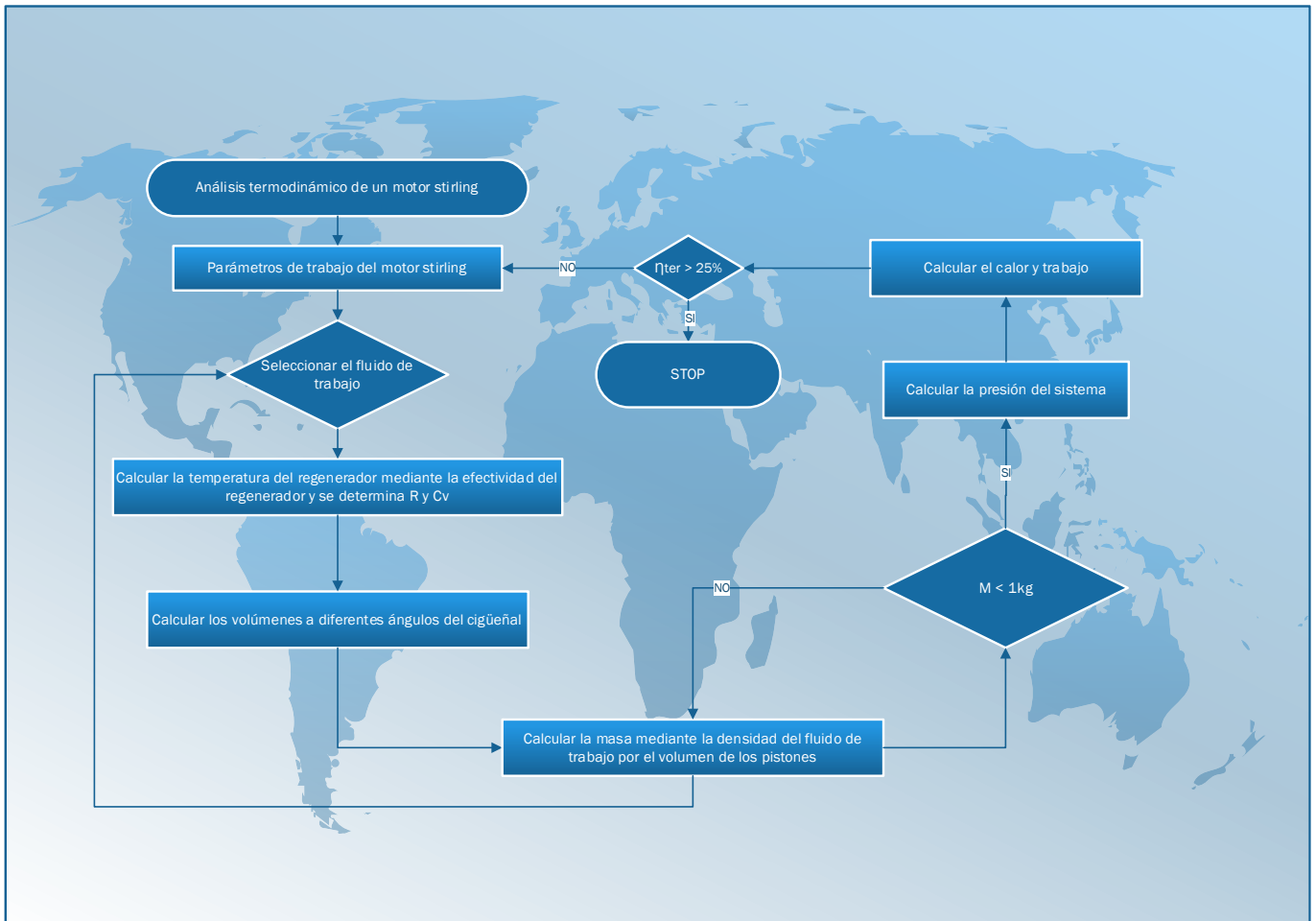


Figura 30. Algoritmo de cálculo II

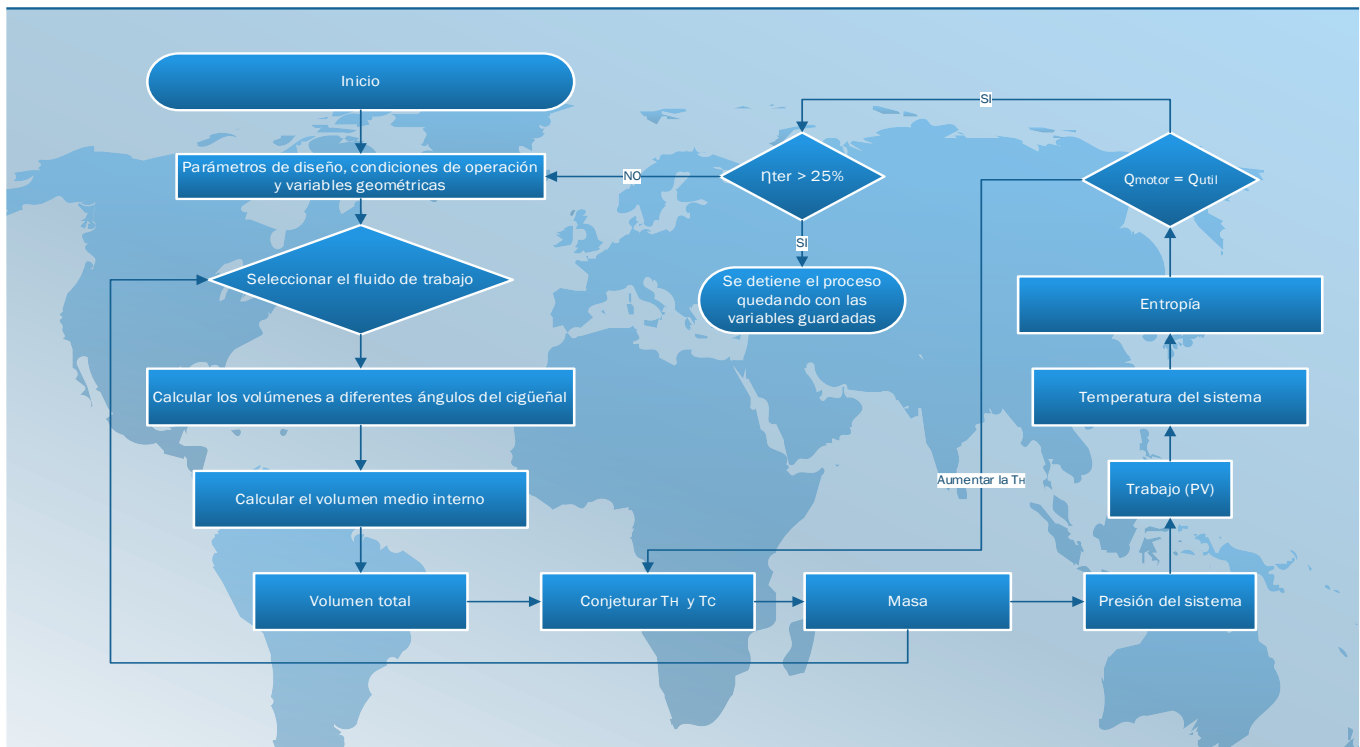


Figura 31. Algoritmo de cálculo III

Tabla 4. Matriz de priorización

Opción \ Criterio	Volumen			Masa			Presión			Trabajo			Calor _{entrada}			
	Volumen	Peso	Total	Masa	Peso	Total	Presión	Peso	Total	Trabajo	Peso	Total	Calor _{entrada}	Peso	Total	Total
Algoritmo I	4	20%	0,8	2	25%	0,5	1	15%	0,15	2	20%	0,4	3	20%	0,6	2,45
Algoritmo II	4	20%	0,8	3	25%	0,75	3	15%	0,45	3	20%	0,6	2	20%	0,4	3
Algoritmo III	4	20%	0,8	4	25%	1,0	3	15%	0,45	3	20%	0,6	4	20%	0,8	3,65

Para seleccionar la adecuada representación gráfica del algoritmo, se necesita trabajar con las diferentes relaciones matemáticas, es por ello que se llegó a la conclusión que el algoritmo de cálculo III es el más adecuado, debido a que se tomó en cuenta los criterios brindados por la tabla de priorización como la masa, ya que en los diagramas se tomaba en cuenta la masa como unidad y luego calcular la presión promedio para pasar a calcular nuevamente la masa, esta salía mayor a 1kg lo que es incoherente debido al fluido con el que se está trabajando. Es por ello que se recomienda trabajar con la presión atmosférica que va depender de la altura en que se encuentre situada el motor stirling.

Concluyendo con el algoritmo III, se llevó a realizar la estructura del cálculo genérico del algoritmo a través del lenguaje de programación de Python (Pandas y Numpy) con un interfaz scripts, la cual está presente en los anexos de la tesis, donde se encuentran las instrucciones de cada función para luego dar flujo de ejecución en el IDLE de Python, dando como resultado un porcentaje de precisión mayor al 90%, ya que cumple con la secuencia de cálculo numérico, llegando al objetivo principal de la tesis que es hallar la eficiencia térmica del motor stirling.

Modelo matemático del ciclo del motor stirling

Se realizará el análisis usando un modelo matemático basado en la primera y segunda ley de la termodinámica considerando el efecto del movimiento del pistón, ya que de este influye directamente en la variación del volumen, tanto de la zona caliente como de la fría.

Primeramente, necesitamos los parámetros de funcionamiento del motor stirling para poder realizar en análisis termodinámico.

Tabla 5. Parámetros de entrada

Parámetros	Cantidad	Dimensiones
Diámetro del pistón de expansión (D_E)	6,8	cm
Carrera del pistón de expansión (S_E)	4,4	cm
Diámetro del pistón de compresión (D_C)	6,8	cm
Carrera del pistón de compresión (S_C)	4,4	cm
Volumen muerto de expansión (V_{DXE})	63,52	cm ³
Volumen muerto de compresión (V_{DXC})	32,61	cm ³
Volumen muerto regenerador (V_{Reg})	68,68	cm ³
Volumen medio (V_m)	399,4849	cm ³
Temperatura alta (T_H)	850	°C
Temperatura baja (T_C)	40	°C
Temperatura del regenerador (T_R)	445	°C
Fluido de trabajo	-	Helio
Eficiencia del alternador (η_{alt})	0,91	-
Constante del gas (R)	2,0769	kJ/kg K
Calor específico a volumen cte. (C_v)	3,1156	kJ/kg K
Calor específico a presión cte. (C_p)	5,1926	kJ/kg K
Eficiencia del regenerador (ϵ)	0,85	-
Presión atmosférica (P_{atm})	101325	Pa
Masa (m)	6,2237E-02	kg

Obtenido los parámetros de funcionamiento y seleccionando con ello el fluido para realizar el trabajo, pasamos a calcular la temperatura teniendo en cuenta la efectividad del regenerador (ϵ), pero ya que no hay material 100% efectivo, entonces se tendrá una disminución de temperatura (T_1') y por ende de presión, ya que el fluido de trabajo no llega a alcanzar la temperatura máxima, además presenta un incremento de temperatura (T_3') y presión en la zona fría. Figura 21.

$$\epsilon_H = \frac{T_1' - T_4}{T_1 - T_4} = \frac{T_1' - T_C}{T_H - T_C}$$

$$\varepsilon_C = \frac{T_2 - T_3'}{T_2 - T_3} = \frac{T_H - T_3'}{T_H - T_C}$$

Entonces definimos las temperaturas a la salida del regenerador.

$$T_1' = T_4 + \varepsilon_H(T_1 - T_4) = T_C + \varepsilon_H(T_H - T_C) [^{\circ}C]$$

$$T_3' = T_2 - \varepsilon_C(T_2 - T_3) = T_H - \varepsilon_H(T_H - T_C) [^{\circ}C]$$

Considerando que $Q_{4-1} = Q_{2-3}$, entonces el regenerador debe tener la misma efectividad, tanto en la zona caliente como en la zona fría.

Ya que actualmente existen diferentes métodos para calcular la temperatura efectiva o promedia del fluido de trabajo contenida en los puntos muertos del regenerador, entonces se calcula dividiendo los volúmenes muertos en dos (T_1' y T_3'), es por ello que elegiremos el método de la media logarítmico o también la media aritmética, la cual tiene una distribución lineal de temperatura a través del regenerador.

$$T_R = \frac{T_1' - T_3'}{\ln(T_1'/T_3')} [^{\circ}C]$$

$$T_R = \frac{T_1' + T_3'}{2} [^{\circ}C]$$

Al sustituir T_1' Y T_3' en la media aritmética nos da como resultado:

$$T_R = \frac{T_H + T_C}{2} [^{\circ}C]$$

Entonces a través de la media aritmética se puede evidenciar que, para un modelo ideal, la temperatura efectiva del regenerador no depende de la eficiencia del regenerador.

Para calcular el volumen, teóricamente se considera que el movimiento del pistón es discreto, pero en la realidad en el diagrama P-V disminuye debido a la influencia en la que varía los volúmenes en la zona caliente, fría y regenerativa.

Se estima que ambos pistones tienen movimientos armónicos simples, es decir una forma casi sinusoidal. Para realizar el cálculo de la presión necesitamos los diámetros de los cilindros, la carrera del pistón y los volúmenes muertos, todos estos dependientes del ángulo de giro del cigüeñal (θ).

Volumen en el pistón de expansión ($V_{PH(\theta)}$)

$$V_H = \pi 0,25(D_E)^2 S_E$$

$$V_{PH(\theta)} = V_H 0,5(1 - \text{sen}\theta) + V_{dXE}$$

Volumen en el pistón de compresión ($V_{PC(\theta)}$)

$$V_C = \pi 0,25(D_C)^2 S_C$$

$$V_{PC(\theta)} = V_C 0,5(1 + \cos\theta) + V_{dXC}$$

Para el volumen muerto del regenerador se mantiene con los mismos parámetros, debido a que como se mantiene estático, no requiere del ángulo del cigüeñal.

La sumatoria de todos los volúmenes, nos da como resultado el volumen total ($V_{T(\theta)}$).

$$V_{T(\theta)} = V_{PH(\theta)} + V_{Reg} + V_{PC(\theta)}$$

Pero para poder identificar la masa, necesitamos calcular el volumen medio interno (V_m) de los pistones, mediante la ecuación.

$$V_m = \pi \left(\frac{D_E}{2} \right)^2 \frac{S_E}{2} + \pi (D_C)^2 \frac{S_C}{2}$$

En estas ecuaciones se consideran las ecuaciones de la conservación de la masa y la energía, con respecto a la variación del ángulo del cigüeñal. Es por ello que asume que el fluido de trabajo es un gas ideal, de manera que calcularemos mediante la ecuación de los gases ideales, sumando las masas de cada zona, obteniendo así una masa total.

$$m = \frac{P_{amb} V_m}{RT_c}$$

Donde la presión ambiente (P_{amb}) se reducirá a medida que la altura aumente.

Luego se calcula la presión evaluada en función a los diferentes ángulos ($P(\theta)$), presentes en los diferentes volúmenes con respecto a cada zona.

$$P(\theta) = \frac{mR}{\frac{V_{PH(\theta)}}{T_H} + \frac{V_{Reg}}{T_R} + \frac{V_{PC(\theta)}}{T_C}}$$

Obteniendo los valores de presión – volumen, se puede elaborar el diagrama PV, en donde se calcula el trabajo para cada proceso del ciclo stirling.

$$W_{neto} = \sum_{ciclo} \left(\lim_{\Delta V \rightarrow 0} P \Delta V \right)$$

$$\Delta W_{(\theta)} = \int P dV$$

$$\Delta W_{(\theta)} = \int P \left(\frac{dV}{d\theta} \right) d\theta$$

$$\Delta W_{(\theta)} = \frac{P(\theta) + P(\theta-5^\circ)}{2} (V_{T(\theta)} - V_{T(\theta-5^\circ)})$$

La temperatura global se calculará en función a la presión global del sistema.

$$T_{(\theta)} = \frac{P_{(\theta)}V_{T(\theta)}}{Rm}$$

Luego para calcular la exergía, primeramente, se calcula la entropía en cada instante del proceso dado, en donde se considera los efectos de los espacios muertos, para luego poder multiplicar con la temperatura en la que se encuentra el motor stirling.

$$\Delta Q = T\Delta S = mC_v\Delta T + P\Delta V$$

Por ello primeramente calculamos la entropía isotérmica.

$$\Delta Q = T\Delta S_{isot}$$

$$\Delta Q = P\Delta V$$

$$\Delta S_{isot(\theta)} = \frac{P\Delta V}{T}$$

$$\frac{P}{T} = \frac{mR}{V}$$

$$\Delta S_{isot(\theta)} = \frac{mR\Delta V}{V}$$

$$\Delta S_{isot(\theta)} = \frac{mR(V_{T(\theta)} - V_{T(\theta-5^\circ)})}{0,5(V_{T(\theta)} + V_{T(\theta-5^\circ)})}$$

Después se calculará la entropía isocórica.

$$\Delta Q = T\Delta S_{isoc} = \Delta U$$

$$\Delta Q = mC_v\Delta T$$

$$\Delta S_{isoc} = \frac{mC_v\Delta T}{T}$$

$$\Delta S_{isoc(\theta)} = \frac{mC_v(T_{(\theta)} - T_{(\theta-5^\circ)})}{0,5(T_{(\theta)} + T_{(\theta-5^\circ)})}$$

Luego se calculará el calor isotérmico, usando la entropía isotérmica.

$$\Delta Q_{isot(\theta)} = \frac{\Delta S_{isot}(T_{(\theta)} + T_{(\theta-5^\circ)})}{2}$$

De igual manera, se dará paso al cálculo del calor isocórico, mediante el uso de la entropía isocórica.

$$\Delta Q_{isoc(\theta)} = \frac{\Delta S_{isoc}(T_{(\theta)} + T_{(\theta-5^\circ)})}{2}$$

Encontrados el calor isotérmico e isocórico o de regeneración, se calculará el calor de entrada mediante la suma respectiva, en donde influye la efectividad del regenerador.

De esta manera encontramos finalmente la eficiencia del motor stirling, donde según Cengel [16] lo que realmente se necesita es saber el potencial de trabajo de la fuente, es decir, la cantidad de energía que podemos extraer como trabajo útil y el resto de energía es descartado o desperdiciado durante un proceso cíclico del ciclo stirling como resultado de irreversibilidades, definiendo así a la eficiencia según la segunda ley de la termodinámica.

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

Tabla 6. Resultado de los parámetros de salida del análisis térmico del motor Stirling

Parámetros	Cantidad	Unidad
Potencia interceptada	41,87	kW
Eficiencia del concentrador	0,82	-
Eficiencia del receptor	0,86	-
Eficiencia del motor stirling	0,318	-
Eficiencia del alternador	0,91	-
Total	8,54	kW

Resultados obtenidos de la salida del motor stirling V161 durante el día

Tabla 7. Tabla de resultados de acuerdo al ángulo del cigüeñal durante el día

ÁNGULO	$V_H (m^3)$	$V_C (m^3)$	$V_{PH} (m^3)$	$V_{PH} (m^3)$	$V_{Reg} (m^3)$	$V_T (m^3)$	P (Pa)	ΔW (kJ)	T° (K)	ΔS_{ISOT} (kJ/K)	ΔS_{ISOC} (kJ/K)	ΔQ_{ISOT} (kJ)	ΔQ_{ISOC} (kJ)
0	0,000159794	0,000159794	0,00014341	0,000192403	0,00006868	0,000404500	154296,0385	0	482,8472218	0	0	0	0
5	0,000159794	0,000159794	0,00013645	0,000192099	0,00006868	0,000397233	155628,1741	-1,12618914	478,2659199	-0,002343418	-0,001848566	-1,126145268	-0,888340813
10	0,000159794	0,000159794	0,00012954	0,000191190	0,00006868	0,000389413	157344,1377	-1,22376356	474,0199463	-0,002570020	-0,001729141	-1,223696864	-0,823318716
15	0,000159794	0,000159794	0,00012273	0,000189681	0,00006868	0,000381099	159455,2212	-1,31685644	470,1243291	-0,002789323	-0,001600142	-1,316761761	-0,755382582
20	0,000159794	0,000159794	0,00011609	0,000187585	0,00006868	0,000372356	161975,2103	-1,40520880	466,5976539	-0,002999995	-0,001460075	-1,405080961	-0,683842606
25	0,000159794	0,000159794	0,00010965	0,000184918	0,00006868	0,000363249	164920,3896	-1,48850181	463,4624506	-0,003200515	-0,001307300	-1,488335786	-0,607933967
30	0,000159794	0,000159794	0,00010346	0,000181699	0,00006868	0,000353848	168309,5239	-1,56634862	460,7456146	-0,003389149	-0,001140024	-1,566139773	-0,526810131
35	0,000159794	0,000159794	0,00009758	0,000177954	0,00006868	0,000344224	172163,8042	-1,63828538	458,4788611	-0,003563938	-0,000956320	-1,638029709	-0,439536548
40	0,000159794	0,000159794	0,00009206	0,000173711	0,00006868	0,000334451	176506,7356	-1,70376137	456,6992052	-0,003722676	-0,000754138	-1,703455782	-0,345085523
45	0,000159794	0,000159794	0,00008692	0,000169002	0,00006868	0,000324603	181363,9440	-1,76212826	455,4494571	-0,003862902	-0,000531346	-1,761770890	-0,242333344
50	0,000159794	0,000159794	0,00008221	0,000163863	0,00006868	0,000314756	186762,8677	-1,81262868	454,7787126	-0,003981900	-0,000285777	-1,812219219	-0,130061228
55	0,000159794	0,000159794	0,00007796	0,000158334	0,00006868	0,000304983	192732,2911	-1,85438434	454,7428076	-0,004076702	-0,000015309	-1,853924368	-0,006962177
60	0,000159794	0,000159794	0,00007422	0,000152455	0,00006868	0,000295359	199301,6692	-1,88638419	455,4046930	-0,004144113	0,0002820276	-1,885877479	0,1283433893
65	0,000159794	0,000159794	0,00007100	0,000146272	0,00006868	0,000285958	206500,1747	-1,90747328	456,8346632	-0,004180758	0,0006079094	-1,906926085	0,2772794433
70	0,000159794	0,000159794	0,00006833	0,000139833	0,00006868	0,000276851	214355,3927	-1,91634355	459,1103498	-0,004183143	0,0009635267	-1,915764781	0,4412687386
75	0,000159794	0,000159794	0,00006624	0,000133185	0,00006868	0,000268108	222891,5687	-1,91152803	462,3163596	-0,004147761	0,0013493503	-1,910929294	0,6216637343
80	0,000159794	0,000159794	0,00006473	0,000126380	0,00006868	0,000259794	232127,3107	-1,89140074	466,5433968	-0,004071219	0,0017648452	-1,890796161	0,8196468413
85	0,000159794	0,000159794	0,00006382	0,000119470	0,00006868	0,000251974	242072,6433	-1,85418519	471,8866728	-0,003950408	0,0022081388	-1,853590960	1,0360919615
90	0,000159794	0,000159794	0,00006352	0,000112506	0,00006868	0,000244706	252725,3195	-1,79797535	478,4433594	-0,003782704	0,0026756583	-1,797408955	1,2713792580
95	0,000159794	0,000159794	0,00006382	0,000105543	0,00006868	0,000238047	264066,3352	-1,72077380	486,3088125	-0,003566206	0,0031617583	-1,720252879	1,5251566224
100	0,000159794	0,000159794	0,00006473	0,000098633	0,00006868	0,000232046	276054,6522	-1,62055258	495,5712785	-0,003299982	0,0036583804	-1,620093442	1,7960454496
105	0,000159794	0,000159794	0,00006624	0,000091828	0,00006868	0,000226750	288621,2553	-1,49534268	506,3048250	-0,002984318	0,0041547980	-1,494958523	2,0812964378
110	0,000159794	0,000159794	0,00006833	0,000085180	0,00006868	0,000222198	301662,8408	-1,34335757	518,5603385	-0,002620943	0,0046375165	-1,343056675	2,3764145792
115	0,000159794	0,000159794	0,00007100	0,000078741	0,00006868	0,000218426	315035,6696	-1,16315477	532,3546285	-0,002213193	0,0050904065	-1,162938843	2,6747922148
120	0,000159794	0,000159794	0,00007422	0,000072558	0,00006868	0,000215462	328550,4159	-0,95383531	547,6580136	-0,001766087	0,0054951475	-0,953698480	2,9674144394
125	0,000159794	0,000159794	0,00007796	0,000066679	0,00006868	0,000213329	341969,1464	-0,71527517	564,3812351	-0,001286292	0,0058320403	-0,715203949	3,2427288757
130	0,000159794	0,000159794	0,00008221	0,000061150	0,00006868	0,000212042	355005,8214	-0,44837335	582,3631367	-0,000781949	0,0060812056	-0,448347987	3,4867941905

135	0,000159794	0,000159794	0,00008692	0,000056011	0,00006868	0,000211612	367331,7789	-0,15529044	601,3611602	-0,000262371	0,0062241284	-0,155287754	3,6838260650
140	0,000159794	0,000159794	0,00009206	0,000051302	0,00006868	0,000212042	378587,4233	0,160360091	621,0471663	0,0002623714	0,0062454251	0,1603625475	3,8172298577
145	0,000159794	0,000159794	0,00009758	0,000047059	0,00006868	0,000213329	388400,6492	0,493413725	641,0111568	0,0007819493	0,0061346335	0,4934328202	3,8711326391
150	0,000159794	0,000159794	0,00010346	0,000043314	0,00006868	0,000215462	396411,3760	0,837196389	660,7748955	0,0012862926	0,0058877611	0,8372389077	3,8323026740
155	0,000159794	0,000159794	0,00010965	0,000040095	0,00006868	0,000218426	402300,0833	1,183740935	679,8160717	0,0017660876	0,0055083074	1,1838005576	3,6921936270
160	0,000159794	0,000159794	0,00011609	0,000037428	0,00006868	0,000222198	405816,7849	1,524188848	697,6016295	0,0022131930	0,0050075180	1,5242456319	3,4487220040
165	0,000159794	0,000159794	0,00012273	0,000035332	0,00006868	0,000226750	406805,9550	1,849351730	713,6266441	0,0026209431	0,0044037418	1,8493745531	3,1073425336
170	0,000159794	0,000159794	0,00012954	0,000033823	0,00006868	0,000232046	405222,9970	2,150368972	727,4533399	0,0029843181	0,0037209258	2,1503205813	2,6810758704
175	0,000159794	0,000159794	0,00013645	0,000032914	0,00006868	0,000238047	401139,0985	2,419369379	738,7442191	0,0032999822	0,0029864549	2,4192129695	2,1893664631
180	0,000159794	0,000159794	0,00014341	0,00003261	0,00006868	0,000244706	394733,5090	2,650036468	747,2841520	0,0035662068	0,0022286817	2,6497422432	1,6559421221
185	0,000159794	0,000159794	0,00015038	0,000032914	0,00006868	0,000251974	386274,7672	2,837993964	752,9884922	0,0037827047	0,0014745378	2,8375442159	1,1061043957
190	0,000159794	0,000159794	0,00015729	0,000033823	0,00006868	0,000259794	376094,4220	2,980965418	755,8971349	0,0039504082	0,0007475749	2,9803571410	0,5640025477
195	0,000159794	0,000159794	0,00016409	0,000035332	0,00006868	0,000268108	364557,7814	3,078707701	756,1570289	0,0040712198	0,0000666575	3,0779524989	0,0503949451
200	0,000159794	0,000159794	0,00017074	0,000037428	0,00006868	0,000276851	352036,0359	3,132758578	753,9973010	0,0041477618	-0,0005546236	3,1318802883	-0,418783664
205	0,000159794	0,000159794	0,00017718	0,000040095	0,00006868	0,000285958	338883,0080	3,146063298	749,7015683	0,0041831436	-0,0011078910	3,1450941864	-0,832967295
210	0,000159794	0,000159794	0,00018336	0,000043314	0,00006868	0,000295359	325418,2832	3,122551035	743,5813958	0,0041807582	-0,0015894330	3,1215275009	-1,186736666
215	0,000159794	0,000159794	0,00018924	0,000047059	0,00006868	0,000304983	311917,0387	3,066722280	735,9536332	0,0041441139	-0,0019993673	3,0656808812	-1,479067050
220	0,000159794	0,000159794	0,00019477	0,000051302	0,00006868	0,000314756	298605,8381	2,983289882	727,1230106	0,0040767025	-0,0023406956	2,9822641712	-1,712308547
225	0,000159794	0,000159794	0,00019991	0,000056011	0,00006868	0,000324603	285663,0777	2,876896115	717,3702268	0,0039819009	-0,0026183866	2,8759145166	-1,891120884
230	0,000159794	0,000159794	0,00020462	0,000061150	0,00006868	0,000334451	273222,6172	2,751911048	706,9449881	0,0038629029	-0,0028385764	2,7509957409	-2,021513784
235	0,000159794	0,000159794	0,00020886	0,000066679	0,00006868	0,000344224	261379,2518	2,612305627	696,0630443	0,0037226761	-0,0030079250	2,6114722741	-2,110071521
240	0,000159794	0,000159794	0,00021260	0,000072558	0,00006868	0,000353848	250194,9598	2,461586513	684,9061646	0,0035639384	-0,0031331374	2,4608446046	-2,163383165
245	0,000159794	0,000159794	0,00021582	0,000078741	0,00006868	0,000363249	239705,1664	2,302777619	673,6240686	0,0033891497	-0,0032206325	2,3021312104	-2,187663344
250	0,000159794	0,000159794	0,00021849	0,000085180	0,00006868	0,000372356	229924,5517	2,138434065	662,3375031	0,0032005152	-0,0032763367	2,1378827101	-2,188529989
255	0,000159794	0,000159794	0,00022059	0,000091828	0,00006868	0,000381099	220852,1497	1,970676475	651,1418563	0,0029999957	-0,0033055720	1,9702162166	-2,170900332
260	0,000159794	0,000159794	0,00022210	0,000098633	0,00006868	0,000389413	212475,6475	1,801236289	640,1108837	0,0027893231	-0,0033130137	1,8008606070	-2,138969073
265	0,000159794	0,000159794	0,00022300	0,000105543	0,00006868	0,000397233	204774,8939	1,631505381	629,3002765	0,0025700200	-0,0033026949	1,6312060403	-2,096238928
270	0,000159794	0,000159794	0,00022331	0,000112506	0,00006868	0,000404500	197724,6869	1,462585501	618,7509199	0,0023434187	-0,0032780401	1,4623532742	-2,045580958
275	0,000159794	0,000159794	0,00022300	0,000119470	0,00006868	0,000411160	191296,9356	1,295334802	608,4917673	0,0021106828	-0,0032419157	1,2951600609	-1,989308709
280	0,000159794	0,000159794	0,00022210	0,000126380	0,00006868	0,000417161	185462,2997	1,130409976	598,5423171	0,0018728272	-0,0031966879	1,1302831559	-1,929255644

285	0,000159794	0,000159794	0,00022059	0,000133185	0,00006868	0,000422457	180191,4063	0,968303386	588,9147049	0,0016307374	-0,0031442812	0,9682153389	-1,866849414
290	0,000159794	0,000159794	0,00021849	0,000139833	0,00006868	0,000427008	175455,7312	0,809375146	579,6154480	0,0013851887	-0,0030862351	0,8093173999	-1,803179418
295	0,000159794	0,000159794	0,00021582	0,000146272	0,00006868	0,000430781	171228,2212	0,653880440	570,6468845	0,0011368630	-0,0030237555	0,6538453768	-1,739056075
300	0,000159794	0,000159794	0,00021260	0,000152455	0,00006868	0,000433745	167483,7190	0,501992533	562,0083506	0,0008863659	-0,0029577604	0,5019735063	-1,675061434
305	0,000159794	0,000159794	0,00020886	0,000158334	0,00006868	0,000435878	164199,2420	0,353822021	553,6971405	0,0006342416	-0,0028889191	0,3538134257	-1,611591461
310	0,000159794	0,000159794	0,00020462	0,000163863	0,00006868	0,000437165	161354,1537	0,209432870	545,7092870	0,0003809877	-0,0028176854	0,2094301733	-1,548890749
315	0,000159794	0,000159794	0,00019991	0,000169002	0,00006868	0,000437595	158930,2608	0,068855766	538,0401978	0,0001270690	-0,0027443252	0,0688555099	-1,487080525
320	0,000159794	0,000159794	0,00019477	0,000173711	0,00006868	0,000437165	156911,8571	-0,06790074	530,6851770	-0,0001270690	-0,0026689379	-0,067900960	-1,426180852
325	0,000159794	0,000159794	0,00018924	0,000177954	0,00006868	0,000435878	155285,7356	-0,20084090	523,6398580	-0,0003809877	-0,0025914738	-0,200842444	-1,366127902
330	0,000159794	0,000159794	0,00018336	0,000181699	0,00006868	0,000433745	154041,1801	-0,32997376	516,9005684	-0,0006342416	-0,0025117467	-0,329977019	-1,306787038
335	0,000159794	0,000159794	0,00017718	0,000184918	0,00006868	0,000430781	153169,9474	-0,45530633	510,4646460	-0,0008863659	-0,0024294425	-0,455310762	-1,247962376
340	0,000159794	0,000159794	0,00017074	0,000187585	0,00006868	0,000427008	152666,2474	-0,57683750	504,3307209	-0,0011368630	-0,0023441245	-0,576841682	-1,189403376
345	0,000159794	0,000159794	0,00016409	0,000189681	0,00006868	0,000422457	152526,7254	-0,69455249	498,4989759	-0,0013851887	-0,0022552361	-0,694554197	-1,130808908
350	0,000159794	0,000159794	0,00015729	0,000191190	0,00006868	0,000417161	152750,4514	-0,80841768	492,9713979	-0,0016307374	-0,0021621002	-0,808413952	-1,071829178
355	0,000159794	0,000159794	0,00015038	0,000192099	0,00006868	0,000411160	153338,9166	-0,91837556	487,7520284	-0,0018728272	-0,0020639168	-0,918362773	-1,012065791
360	0,000159794	0,000159794	0,00014341	0,000192403	0,00006868	0,000404500	154296,0385	-1,02433962	482,8472218	-0,0021106828	-0,0019597588	-1,024313607	-0,951070211

Trabajo	20,8625 kJ
Calor que ingresa	65,6048 kJ
Calor regenerado	49,6790 kJ
Eficiencia	31,8003%

Se obtuvo un rendimiento del 31,80% del ciclo stirling, frente a 32% de un ciclo de referencia. [17]

El motor stirling v161 tiene una flexibilidad híbrida para trabajar durante el día, alimentado por la radiación solar y por las noches alimentado por un biodigestor de gas natural, en la que tiene una diferencia de temperaturas de 1500°C a 50°C, con una eficiencia térmica de 39,37%

Los sistemas solares una vez que transforman la radiación solar en energía a través del motor stirling, se determinan mediante las relaciones matemáticas y siguiendo la secuencia de cálculo en función de un algoritmo, para predecir el rendimiento en función a los dimensionamientos del motor que se asemejan a los valores propuestos por Mancini [17], lo que determina que la secuencia de cálculo es la correcta, permitiendo predecir las variables de salida.

Análisis de curva de trabajo del motor stirling

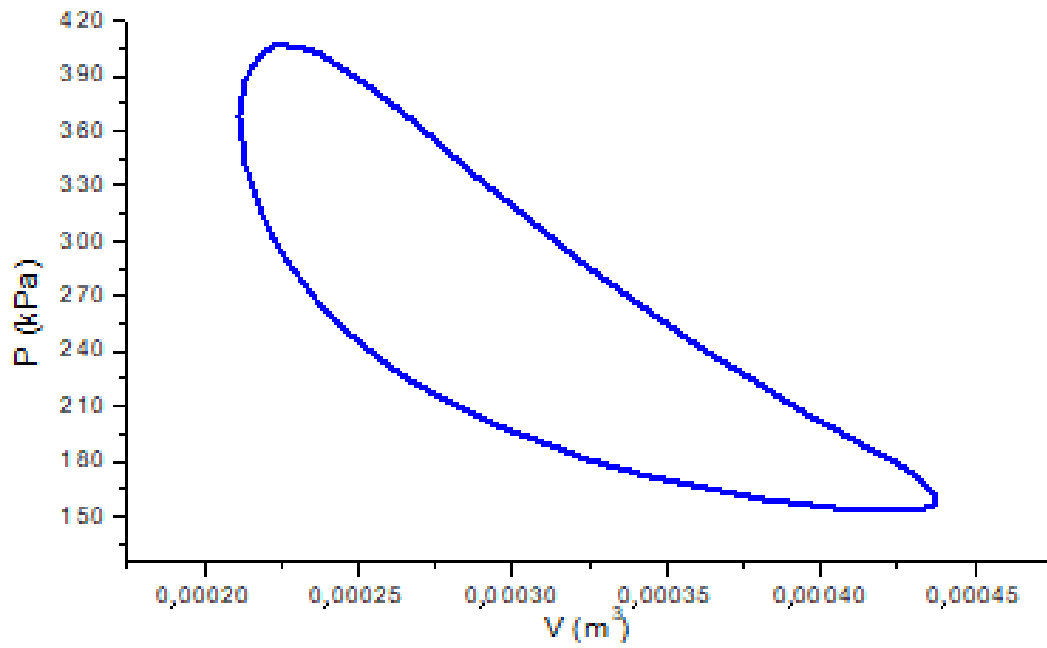


Figura 32. Diagrama de trabajo

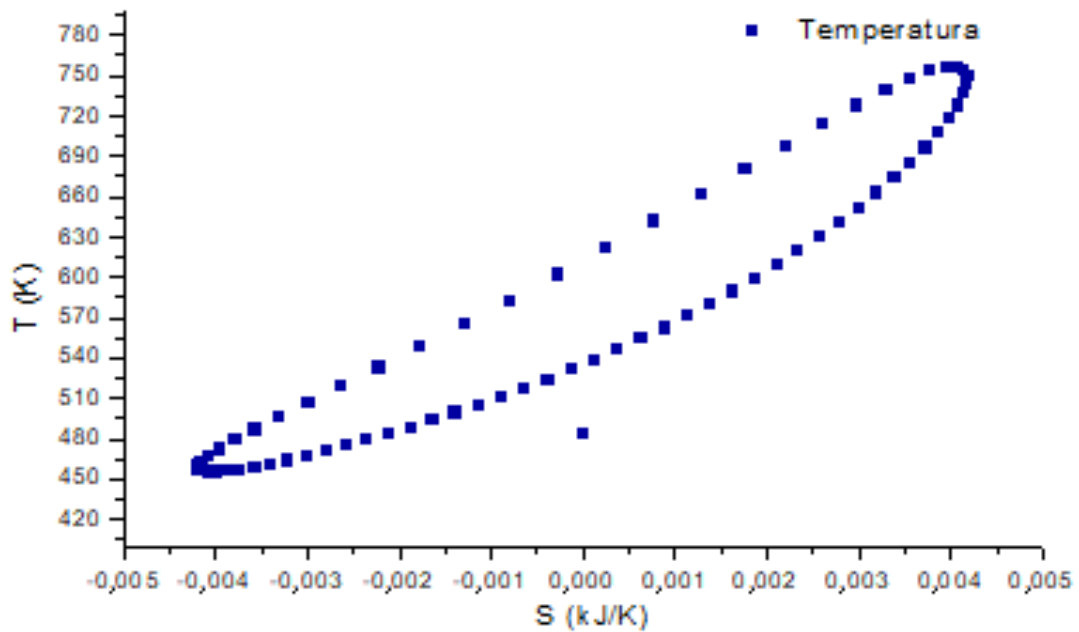


Figura 33. Diagrama T-S

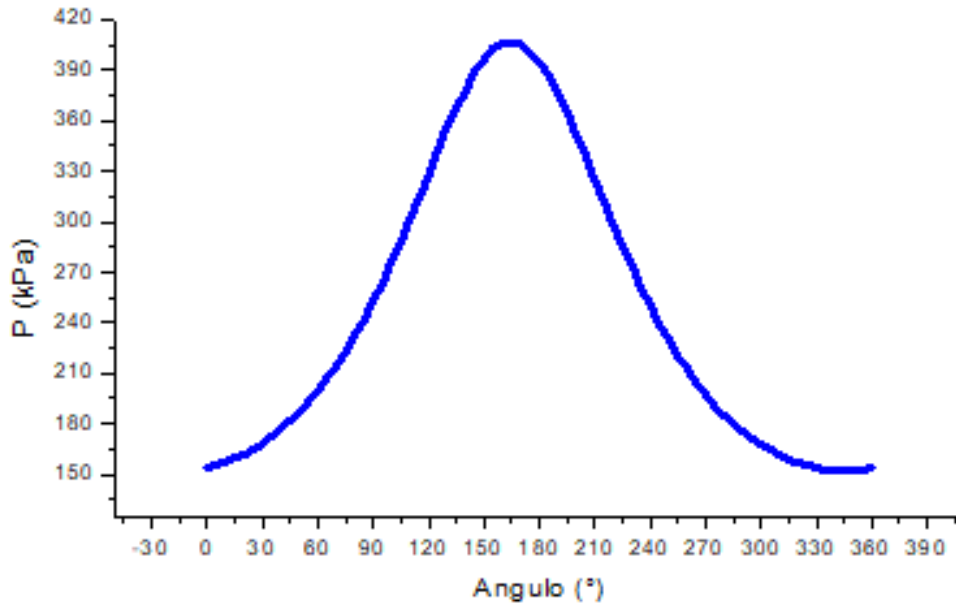


Figura 34. Diagrama Presión – Ángulo

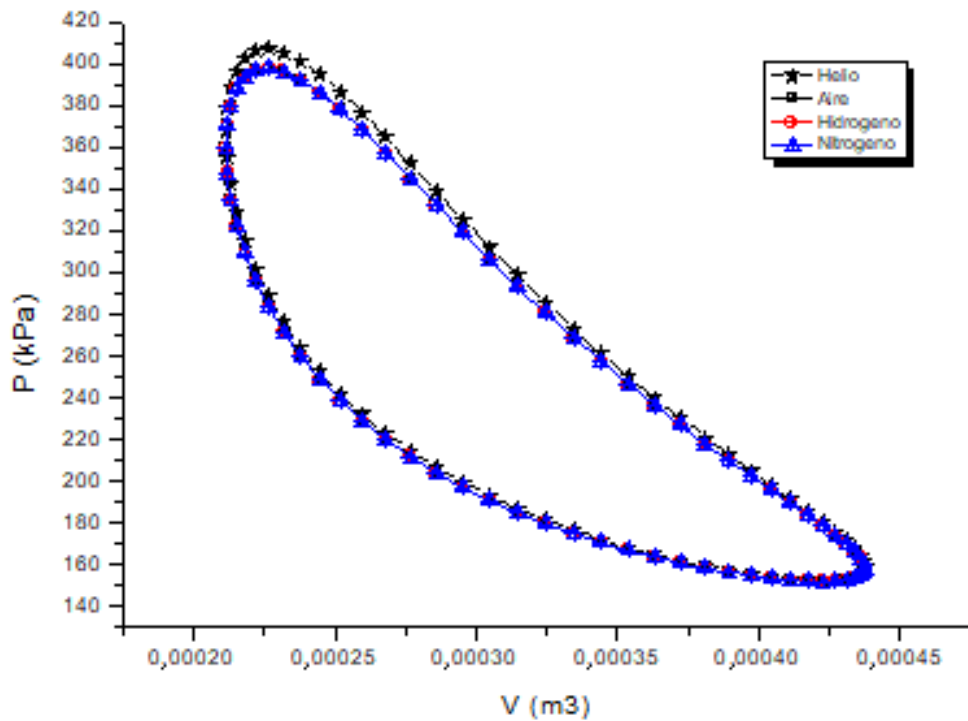


Figura 35. Diagrama de trabajo de los gases

En el diagrama de PV indica la curva de trabajo, en donde proporciona las características del funcionamiento del motor en la que se asemeja a la figura 24, en donde combina todos los efectos en base al ciclo real. La temperatura alta se encuentra en los puntos 1-2 y la temperatura baja se encuentra en los puntos 3-4, donde al aumentar la temperatura, incrementará la presión en los distintos puntos, esto quiere decir a mayor calor de entrada, mayor será el trabajo de expansión.

En la figura 36 para diferentes gases como el helio, aire, nitrógeno e hidrogeno, donde se puede evidenciar que el helio necesita menos calor de entrada a diferencia de los demás gases a similares condiciones. Entonces como resultado de que el trabajo es igual, se puede decir que la eficiencia térmica del helio es mayor comparado con los otros gases.

Discusión

El modelo matemático se desarrolló utilizando el análisis termodinámico, tanto en el modelo geométrico del sistema solar y como el térmico, demostraron tener una correlación, debido a que en el análisis llegó a ser consistentes en efecto a su potencia eléctrica generada de 8,54 kW como lo data en los catálogos de ProEcoPolyNet “SOLO Stirling 161”.

En el presente estudio se demostró el modelo matemático del sistema stirling solar, en el cual se partido primeramente por un modelo geométrico para luego proseguir con el modelo térmico, donde finalmente se halla la eficiencia térmica del motor stirling con un rendimiento del 31,8%. Se encontró coincidencias con las investigaciones que realizo Mancini (2003), de la misma forma Romero (2010) de la Universidad de Sevilla que recogió los datos de operación del proyecto Dish Stirling, obteniendo un 32% de eficiencia del motor stirling, esto quiere decir que la secuencia de cálculo en función del algoritmo es correcta, ya que permití predecir las variables de salida. La predicción conceptual del sistema se basa en el predimensionamiento de los componentes del sistema, tipos de fluido que se pretende trabajar y las diferencias temperaturas que es lo más importante en estos ciclos termodinámicos cerrados.

Así mismo se encontró estudios que no se asemejaron a la eficiencia térmica del motor Stirling, lo encontrado en esta investigación lo describe A. Asnaghi (2012) esto es debido a que toma en cuenta diferentes temperaturas debido al material usado por su construcción.

Conclusiones

- Los parámetros de funcionamiento que condicionan fuertemente al motor stirling real fueron descritos a través de las dimensiones de cada componente, donde del concentrador solar y el receptor se analizó los diferentes mecanismos de pérdidas de calor, obteniendo un balance de energía útil de 41,87 kW como parte de entrada hacia el motor stirling.
- Mediante una matriz de priorización se logró evaluar el algoritmo de cálculo, seleccionando la estructura III, siendo esta la mejor secuencia para el desarrollo del proceso térmico. Cabe señalar que el análisis se elaboró mediante el tipo de algoritmo cuantitativo debido a que se hizo en función al cálculo matemático, además el algoritmo tiene la ventaja de poder ser utilizado para analizar otras configuraciones de motor stirling dándonos como resultados una aproximación al funcionamiento real.
- La relación matemática para realizar el análisis térmico del motor stirling fue estructurada mediante la secuencia brindada por el algoritmo, permitiendo predecir la operación de sus parámetros de salida basándose en el efecto que causa el movimiento el pistón en cada proceso. Se pudo comprobar que, aunque teóricamente el motor stirling alcanza el máximo rendimiento de Carnot, en la realidad su rendimiento es mucho menor, ya que existen volúmenes muertos y sobre todo que el regenerador no es eficiente al cien por ciento. Es por ello que la eficiencia es del 31,8%; de forma que los resultados que se pudieron conseguir son muy similares a la revista Solo stirling 161 [11], en donde además logró obtener una potencia de salida de 8,54kW.
- Las curvas de trabajo del motor stirling se analizó en función a sus parámetros de entrada, donde nos brinda un resultado muy distinto a las curvas de trabajo del ciclo stirling ideal debido a que no se consideran los espacios muertos, la ineficiencia del regenerador y la sincronización del mecanismo de la biela cigüeñal. En el diagrama T-S se puede evidenciar que, al incrementar la diferencia de temperaturas, incrementará la eficiencia térmica del motor, en la que el punto más óptimo donde brinda mayor potencia es en un ángulo de 160°, por otro lado, el fluido de trabajo más adecuado para este tipo de ciclos cerrados sería el helio esto debido a que adquiere mejores características de trabajo, ya que necesita una menor cantidad de calor teniendo en cuenta que tiene mayor coeficiente de calor específico, además de que no produce oxidación cuando trabaja a altas temperaturas.

Recomendaciones

- Se recomienda que el cálculo a llevar a cabo, se desarrolle mediante los efectos del movimiento del pistón, ya que también se puede usar las ecuaciones de Schmidt para analizar los volúmenes muertos, pero en esta ecuación se asume una regeneración ideal.
- Se recomienda si al hacer un análisis se tome en cuenta la regeneración no ideal junto a los volúmenes muertos, ya que esto durante las literaturas no toman mucha atención a estos puntos. Además para proseguir con este análisis es recomendable saber los materiales que contiene este motor, ya que por motivos de privacidad no se revelan los detalles para que se realice la evaluación de los materiales.
- El algoritmo de cálculo elaborado en el programa de Python es mediante la interfaz de scripts, pero puede ser mediante una interfaz gráfica en donde se puede visualizar los elementos de control para obtener los resultados y graficas en tiempo real de los parámetros de funcionamiento del motor stirling.

Bibliografía

- [1] M. Á. Vives Albesa, «Diseño de un motor Stirling,» Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.
- [2] I. M. Santos Ráez, «Estudio de un motor stirling con absorbedor interno alimentado con energía solar,» Universidad de Málaga, Málaga, 2015.
- [3] L. C. Enrique Cisneros , «Diseño y construcción de un motor Stirling solar para el laboratorio de termodinámica,» Escuela politécnica nacional, Quito, 2011.
- [4] J. P. Gonzáles López, «Diseño de un concentrador solar compacto de foco fijo de alta eficiencia para aplicaciones de alta temperatura,» Centro de investigación en materiales avanzados S.A, Chihuahua, 2018.
- [5] J. I. Romero Toscano, Estudio económico y termoeconómico del disco solar stirling EuroDish de la E.S.I. de Sevilla, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2010.
- [6] J. Losada San José, Análisis de un sistema de disco parabólico con motor stirling, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid , 2009.
- [7] C. E. Bardales Tomás, Diseña para la construcción de un motor stirling para la generación de energía eléctrica, Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2017.
- [8] D. García Menéndez, Desarrollo de los motores stirling para aplicaciones solares, Oviedo: Universidad de Oviedo, 2013.
- [9] D. C. Trujillo Lara, Modelamiento matemático de un sistema de concentración solar con motor stirling en Colombia, Bogota: Fundación universidad de América , 2017.
- [10] EuroDish-Stirling, «A new decentralised Solar Power Technology,» Structural Consulting Engineers, Schlaich Bergermann, 2001.
- [11] ProEcoPolyNet, «SOLO Stirling 161,» Fact Sheet, Stuttgarter Str. 41, 2007.
- [12] A. R. Solano, «Academia,» [En línea]. Available: https://www.academia.edu/25790987/MOTOR_STIRLING. [Último acceso: 29 04 2021].
- [13] NASA, «Composite-Matrix Regenerators for Stirling Engines,» Tech Briefs, Enero 1999. [En línea]. Available: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/techbriefs/materials/2113>.

- [14] G. Lira Cacho y V. Agüero Zamora , «Generación de energía eléctrica con un motor stirling empleando un combustible gaseoso,» de *XVII CONIMERA*, Lima, 2007.
- [15] M. Suárez López, «Análisis termodinámico-mecánico de un prototipo de motor stirling de configuración gamma de baja potencia,» Universidad Autónoma de Occidente , Santiago de Cali, 2015.
- [16] Y. Cengel y M. Boles , Termodinámica, México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2012.
- [17] T. Mancini, P. Heller, B. Butler, B. Osborn, W. Schiel, V. Goldberg, R. Buck, R. Diver, C. Andraka y J. Moreno, «Dish-Stirling systems: An overview of development,» *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003.
- [18] D. Chen, «Untersuchungen zur optimierung eines solaren niedertemperatur-stirlingmotors,» Technischen Universität Dresden, Dresden, 2004.
- [19] J. Ruelas Ruiz , N. Velazquez Limón y R. Beltrán Chacón, «Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor stirling fijo,» *Sociedad mexicana de ingeniería mecánica*, 2011.
- [20] W. Stine y R. Diver, A compendium of solar dish/stirling technology, 1994.
- [21] S.-Y. Wu, L. Xiao, Y. Cao y Y.-R. Li, «Convection heat loss from cavity receiver in parabolic dish solar thermal power system: a review,» *El sevier*, 2010.
- [22] K. Reddy y S. Kumar, «An improved model for natural convection heat los from modified cavity receiver of solar dish concentrator,» *Elsevier*, 2009.
- [23] A. D. Leiva Cabrera, Análisis de funcionamiento y diseño de construcción de un prototipo de motor térmico stirling para la conversión de energía solar en energía eléctrica, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.
- [24] R. Ma, Wind effects on convective heat loss from a cavity receiver for a parabolic concentrating solar collector, California, 1993.
- [25] A. Asnaghi, P. Saleh Izadkhast y S. Lajevardi, «Thermodynamics Performance Analysis of Solar Stirling Engines,» *ResearchGate*, pp. 1-16, 2012.
- [26] F. Nepveu, A. Ferriere y F. Bataille, «Thermal model of a dish/stirling systems,» *Elsevier*, 2008.
- [27] J. Duffie y W. Beckman, Solar engineering of thermal processes, Fourth ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

- [28] O. A. Mejía Burbano y F. D. Zamora Orellana, Diseño y construcción de un sistema de generación de electricidad, a partir del uso de energía solar, mediante un concentrador parabólico de 1.8m, Sangolquí: Escuela politécnica del ejercito , 2008.
- [29] W. Stine , M. Geyer y S. Stine, «Power from the sun,» 2001. [En línea]. Available: <http://www.powerfromthesun.net>.
- [30] A. Hafez, A. Soliman, K. El-Matwally y I. Ismail, «Design análisis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications,» *Elsevier*, 2016.
- [31] A. Ali Lashari, P. Hameed Shaikh, Z. Hussain Leghari, M. Iqbal Soomro, Z. Ahmed Memon y M. Aslam Uqaili, «The performance prediction and techno-economic analyses of a stand-alone parabolic solar dish/stirling system, for Jamshoro, Pakistan,» *Elsevier*, 2021.
- [32] Y. Cengel y J. Cimbala, Mecánica de fluidos - Fundamentos y aplicaciones, Primera ed., México: McGraw-Hill Interamericana, 2006.

Anexos

Anexo N°01. Lenguaje de programación en Python en base al diagrama de flujo del algoritmo III.

```

import numpy as np

import pandas as pd

# Definición de parámetros de entrada

De=0.068      # [m] Diámetro del pistón caliente

Se=0.044      # [m] Carrera del pistón caliente

Dc=0.068      # [m] Diámetro del pistón frío

Sc=0.044      # [m] Carrera del pistón frío

theta=0       # [Deg] Ángulo

Vdxe=0.00006352  # [m^3] Volumen muerto caliente

Vdxc=0.00003261  # [m^3] Volumen muerto frío

Vreg=0.00006868  # [m^3] Volumen muerto regenerador

R=2.0769       # [kJ/kg*K] Constante

TH=1123.15     # [K] Temperatura alta

TC=313.15      # [K] Temperatura baja

TR=718.15      # [k] Temperatura del regenerador

Patm=101325    # [Pascuales] Presión atmosférica

Cv=3.1156      # [kJ/kgK] Calor específico

theta1= np.arange(0, 361, 5)

Vm=np.pi*((De*100)/2)**2*((Se*100)/2) + np.pi*(Dc*100)**2*((Sc*100)/2) # [m^3]
Volumen medio para la configuración alfa

M=Patm*(Vm*pow(10,-6))/(R*TC) # [kg] Masa

# Contenedores

V_H=[]

V_C=[]

V_PH=[]

```

```

V_PC=[]
Vrg=[]
V_T=[]
P=[]
DW=[]
T=[]
DS_isot=[]
DS_isoc=[]
DQ_isot=[]
DQ_isoc=[]

# Bucles para iteraciones
for i in range(len(theta1)):
    V_H.append((np.pi/4)*De**2*Se) # [m^3] Vh

for i in range(len(theta1)):
    V_C.append((np.pi/4)*Dc**2*Sc) # [m^3] Vc

for i in range(len(theta1)):
    V_PH.append((V_H[i]/2)*(1-np.sin(theta1[i]*np.pi/180))+Vdxe) # [m^3] Vph
    Volumen de expansión para la configuración alfa

for i in range(len(theta1)):
    V_PC.append((V_C[i]/2)*(1+np.cos(theta1[i]*np.pi/180))+Vdxc) # [m^3] Vph
    Volumen de compresión para la configuración alfa

for i in range(len(theta1)):
    Vrg.append(Vreg) # [m^3] Vreg Volumen muerto regenerador

for i in range(len(theta1)):
    V_T.append(V_PH[i]+V_PC[i]+Vrg[i])

for i in range(len(theta1)):
    P.append((M*R)/((V_PH[i]/TH ) + (Vrg[i]/TR) + (V_PC[i]/TC ))) # [Pascales]
    Presión de trabajo

```

```

for i in range(len(theta1)):
    if i==1:
        DW.append(0.5*(P[i]+P[-1])*(V_T[i]-V_T[-1]))
    else:
        DW.append(0.5*(P[i]+P[i-1])*(V_T[i]-V_T[i-1]))
for i in range(len(theta1)):
    T.append((P[i]*V_T[i])/(R*M))
for i in range(len(theta1)):
    if i==1:
        DS_isot.append(M*R*(V_T[i]-V_T[-1])/(0.5*(V_T[i]+V_T[-1])))
    else:
        DS_isot.append(M*R*(V_T[i]-V_T[i-1])/(0.5*(V_T[i]+V_T[i-1])) )
for i in range(len(theta1)):
    if i==1:
        DS_isoc.append(M*Cv*(T[i]-T[-1])/(0.5*(T[i]+T[-1])))
    else:
        DS_isoc.append(M*Cv*(T[i]-T[i-1])/(0.5*(T[i]+T[i-1])) )
for i in range(len(theta1)):
    if i==1:
        DQ_isot.append(DS_isot[i]*0.5*(T[i]+T[-1]))
    else:
        DQ_isot.append(DS_isot[i]*0.5*(T[i]+T[i-1]))
for i in range(len(theta1)):
    if i==1:
        DQ_isoc.append(DS_isoc[i]*0.5*(T[i]+T[-1]))
    else:

```

```

    DQ_isoc.append(DS_isoc[i]*0.5*(T[i]+T[i-1]))

# Cálculo de variables

Trabajo=np.sum(DW)

Calor_int = np.sum(np.array(DQ_isot)[np.array(DQ_isot) > 0])

Calor_reg=np.sum(np.array(DQ_isoc)[np.array(DQ_isoc) > 0])*0.85

Eficiencia=Trabajo/Calor_int

# Visualización de Tabla principal

data=({"Ángulo": theta1, "V_H": V_H, "V_C": V_C, "V_PH": V_PH,
      "V_PC": V_PC, "Vreg": Vrg, "V_T": V_T, "P": P, "DW": DW,
      "T": T, "DS_isot": DS_isot, "DS_isoc": DS_isoc,
      "DQ_isot": DQ_isot, "DQ_isoc": DQ_isoc})

df=pd.DataFrame(data)

pd.set_option('display.max_rows', None)

df=df.round(6)

print(df)

# Mostrar resultados

print("-----")

print("RESULTADOS")

print("-----")

print("Trabajo: ", Trabajo)

print("Calor que ingresa: ", Calor_int)

print("Calor regenerado: ", Calor_reg)

print("Eficiencia: ", Eficiencia)

print("-----")

```