



# Universidad Autónoma de Querétaro

## Facultad de ingeniería

### Maestría en ciencias en instrumentación y control automático

#### **Diseño de un banco de pruebas con regenerador intercambiable para motor Stirling con gas presurizado**

#### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de maestro en ciencias en instrumentación y control automático

Por:

**José Luis Pérez Gudiño**

Dirigido por:

**Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano**

#### SINODALES

Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano

Presidente

Firma

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Secretario

Firma

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Vocal

Firma

Dr. Gerardo Israel Pérez Soto

Suplente

Firma

Dr. Mario Trejo Perea

Suplente

Firma

Centro Universitario  
Querétaro, QRO  
Mexico.  
Mayo 2022

*La presente tesis se la dedico a mi familia*

# AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme becado durante mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por recibirme para realizar mis estudios de posgrado y por ser mi segunda casa de estudios.

A los profesores del departamento de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por todas sus enseñanzas, en especial al Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano por haber dirigido este trabajo de tesis, por su constante retroalimentación, por estar siempre al pendiente de mi aprendizaje, por su apoyo, por sus sabios consejos, su confianza, paciencia y amistad.

Al los investigadores Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa, Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz, Dr. Mario Trejo Perea y Dr. Gerardo Israel Pérez Soto quienes complementaron este trabajo con sus constructivos comentarios y correcciones.

# Resumen

La búsqueda de soluciones para el aumento de las demandas de energía es una meta a nivel mundial. Una parte de las soluciones viables y prometedoras es la utilización de formas de energías renovables donde se enlistan los sistemas de conversión termomecánicos como los motores Stirling. Desde hace tiempo se busca en la industria y la academia la mejora de estos sistemas. En este contexto, el trabajo se centra en el diseño de un banco de pruebas para regeneradores intercambiables de motor Stirling. En teoría la potencia del motor se puede incrementar maximizando la diferencia de temperatura operativa entre la fuente de calor y el disipador, así en el presente trabajo se realizan pruebas con el regenerador que están directamente relacionadas con el diferencial de temperatura entre la fuente de calor y el disipador. Con el banco de pruebas realizado, se puede probar diferentes diseños del regenerador y determinar un diseño apropiado de regenerador, para mejorar la transferencia de calor entre el regenerador y el fluido de trabajo para un motor Stirling y a su vez mejorar la eficiencia del motor. Se desarrolló un banco de pruebas de flujo unidireccional en el cual se puede registrar temperatura del aire tanto en la entrada como en la salida del regenerador. El banco de pruebas desarrollado permite también medir la caída de presión en el regenerador y ajustar el flujo volumétrico del fluido de trabajo.

**Palabras clave:** Almacenamiento de calor, motor Stirling, regenerador, transferencia de calor.



# Abstract

The search for solutions to increasing energy demands is a worldwide goal. One of the viable and promising solutions is the use of renewable forms of energy, including thermomechanical conversion systems such as Stirling engines. The improvement of these systems has long been sought in industry and academia. In this context, the work focuses on the design of a test bench for interchangeable Stirling engine regenerators. In theory the engine power can be increased by maximizing the operating temperature difference between the heat source and the heat sink, so in the present work tests are performed with the regenerator that are directly related to the temperature differential between the heat source and the heat sink. With the test bench performed, different regenerator designs can be tested and an appropriate regenerator design can be determined to improve the heat transfer between the regenerator and the working fluid for a Stirling engine and in turn improve the efficiency of the engine. A unidirectional flow test bench was developed in which air temperature can be recorded at both the regenerator inlet and outlet. The developed test bench also allows measuring the pressure drop in the regenerator and adjusting the volumetric flow of the working fluid.

**Keywords: Heat storage, Stirling, regenerator, heat transfer.**

# Índice de figuras

1.1. Regenerador de motor Stirling y motor de aire caliente (Stirling, 1816). . . . .	3
1.2. Motor de aire caliente (Stirling y J, 1827). . . . .	5
1.3. Componentes y configuraciones del motor Stirling (Thombare y Verma, 2008). . .	10
1.4. Regenerador de red aleatoria de fibras (Kamen et al., 2005). . . . .	15
1.5. Regenerador estratificado canalizado (Qiu et al., 2006). . . . .	16
1.6. Proceso de fabricación del regenerador de mallas metálicas y regenerador de ma- llas metálicas (b) (Katayama y Hiroyuki, 2008). . . . .	16
1.7. Regenerador de canal pasante que se estrecha a lo largo del canal (Noskov et al., 2016). . . . .	17
1.8. El regenerador de pluralidad de canales (Chen et al., 2020). . . . .	18
1.9. Evolución de la producción y el consumo nacional de energía (SENER, 2018). . .	19
1.10. Mapa de Radiación solar, NASA (Stackhouse y Kusterer, 2000). . . . .	20
2.1. Diagrama presión volumen de ciclo Stirling ideal (Struchtrup, 2014). . . . .	23
2.2. Diagrama temperatura entalpía de ciclo Stirling ideal (Struchtrup, 2014). . . . .	24
2.3. Configuración del motor Stirling (Struchtrup, 2014). . . . .	27
2.4. Ciclo Stirling ideal y real en un diagrama P-V Struchtrup (2014). . . . .	28
2.5. Desplazamiento del pistón en función del ángulo del eje (Struchtrup, 2014). . . . .	28
2.6. (a) Disco de acero inoxidable 304 y (b) Tubo capilar. . . . .	29
2.7. (a) Trayectoria curva del microcanal y (b) trayectoria lineal del microcanal. . . . .	30
2.8. Configuración del regenerador. . . . .	31
3.1. Diagrama de la metodología para el desarrollo del proyecto. . . . .	34
3.2. (a) Tubería de cobre tipo L de $\frac{3}{8}[in]$ , $1\frac{1}{2}[in]$ y (b) Tubería de cobre tipo L de $\frac{1}{4}[in]$ . .	35
3.3. Accesorios para unión mecánica de tubería de cobre tipo L $\frac{3}{8}[in]$ . . . . .	36
3.4. Fibra de acero inoxidable. . . . .	36

3.5.	Termistor ntc 10[kΩ]. . . . .	36
3.6.	Raspberry tipo 3 b+. . . . .	37
3.7.	Arduino UNO. . . . .	37
3.8.	Flujómetro. . . . .	38
3.9.	(a) Soplete de mano, (b) soldadura de estaño y (c) pasta para soldadura de estaño. . . . .	39
3.10.	(a) Conexión del manómetro tubo en U y (b) regenerador de estopa. . . . .	40
3.11.	(a) Soldadura de 15 % plata y (b) fúndete de soldadura Harris. . . . .	40
3.12.	Unión con soldadura de 15 % plata. . . . .	41
3.13.	(a) Pieza mecánica a fabricar y (b) 3D del ensamble del regenerador. . . . .	41
3.14.	(a) Pieza en formato STL y (b) matriz de piezas 3D en el software slicer. . . . .	42
3.15.	Impresora Creality modelo Ender-3. . . . .	43
3.16.	Piezas impresas en PLA. . . . .	44
3.17.	Matriz para molde de varias piezas. . . . .	44
3.18.	(a) Material cerámico Prestige Sigma y (b) carcasas de acero. . . . .	45
3.19.	Pesaje del material cerámico y agua. . . . .	45
3.20.	(a) Molde de cerámico y (b) tapa del molde. . . . .	46
3.21.	Proceso para eliminar la impresión dentro del molde. . . . .	47
3.22.	Recipiente de crisol para el proceso de fundición. . . . .	47
3.23.	Proceso de fundición de aluminio. . . . .	48
3.24.	Termómetro Digital Infrarrojo. . . . .	48
3.25.	Vertido del aluminio dentro del molde. . . . .	49
3.26.	Piezas de aluminio. . . . .	50
3.27.	Conexión de los elementos electrónicos. . . . .	50
3.28.	Instrumentación del banco de pruebas. . . . .	51
3.29.	Compresor. . . . .	52
3.30.	Manómetro de tubo en U. . . . .	53
4.1.	Gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador, Prueba 1. . . . .	56
4.2.	Gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador, Prueba 2. . . . .	57
4.3.	Gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador, Prueba 3. . . . .	57
4.4.	La diferencial de temperatura en la entrada y salida del regenerador de las pruebas 4.1, 4.2 y 4.3. . . . .	58
4.5.	Histograma para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18. . . . .	60
4.6.	Residuos vs ajustes para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18. . . . .	60
4.7.	Residuos vs orden para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18. . . . .	61

4.8. La gráfica de probabilidad normal para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18. . . . .	61
4.9. Resultados en el programa Minitab del análisis de ( $p - value$ ) para el rango de datos Tabla 4.2. . . . .	62
4.10. Gráfico de simulación CFD, para almacenamiento de energía de los regeneradores propuestos. . . . .	63
4.11. Microcanal de trayectoria recta. . . . .	64
4.12. Microcanal de trayectoria curva. . . . .	64
4.13. Prueba 1, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria recta. . . . .	65
4.14. Prueba 2, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria recta. . . . .	65
4.15. Prueba 1, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria curva. . . . .	66
4.16. Prueba 2, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria curva. . . . .	66
4.17. Banco de pruebas con regenerador de microcanales. . . . .	67
4.18. Banco de pruebas para regenerador de motor Stirling. . . . .	69

# Índice de cuadros

1.1. Trabajos directamente relacionados con el campo de estudio del proyecto desarrollado. . . . .	14
4.1. Características del regenerador de malla. . . . .	58
4.2. Tabla del diferencial de temperatura de las pruebas de las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 . . .	59
4.3. Tabla del diferencial de temperatura de las pruebas de las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 . . . . .	68

# Introducción

Este trabajo trata el desarrollo y puesta en marcha de un banco de pruebas para regenerador de motor Stirling con la finalidad de probar diseños de regeneradores para motor y proponer un diseño adecuado de regenerador para el motor Stirling, se plantea el trabajo pensando en la necesidad de la utilización y el desarrollo de fuentes de energías renovables, considerando como motivación los problemas medioambientales presentes. El motor Stirling siendo una máquina que puede operar con cero emisiones, además que presenta un gran potencial para el aprovechamiento de la energía solar y la energía térmica residual.

En el primer capítulo se muestran los antecedentes más relevantes hasta el presente trabajo, que incluye una breve introducción del motor Stirling, posteriormente se muestran las investigaciones relevantes con respecto al tema particular del regenerador de motor Stirling, se desglosan algunas patentes respecto a los regeneradores y procesos de desarrollo de los mismos, también se plantean los objetivos y la hipótesis del trabajo de investigación.

En el segundo capítulo se describe brevemente la teoría del ciclo Stirling, fenómenos de transferencia de calor, propiedades de los fluidos.

En el tercer capítulo se muestra la metodología que se llevó a cabo para la realización del proyecto de investigación.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas con el banco de pruebas y la simulación de un prototipo de regenerador a propuesta de patente.

En el quinto capítulo se expresan las conclusiones del trabajo.

## **1.1. Motor Stirling**

El motor Stirling fue inventado el 27 de septiembre de 1816 por Roberto Stirling ministro escocés, a la edad de 26 años. A principios del siglo XIX, la revolución industrial había alcanzado la cima de su desarrollo. Fue una era dorada de importantes innovaciones y avances medibles en ciencia y tecnología. Los motores mecánicos habían sido la fuerza impulsora de la próspera industria en una variedad de aplicaciones, como los procesos de minería y fabricación. El motor Stirling y se introdujo dos años más tarde para competir con la famosa máquina de vapor existente. Sin embargo, las máquinas de vapor, en este momento, supuestamente eran problemáticas con calderas propensas a explosiones y los problemas de seguridad fueron una gran preocupación. Por lo tanto, el motor Stirling se introdujo inicialmente para ser utilizado localmente con fines de bombeo de agua, además, su potencia específica no era muy elevada, pero su sencillez y bajo ruido eran magníficos (Stirling, 1816).

Resumen de la patente por Robert Stirling, “Todas mis mejoras para disminuir el consumo de combustible consisten en las diferentes formas o modificaciones de un nuevo método, artilugio o disposición mecánica para calentar y enfriar líquidos, aires o gases y otros cuerpos mediante cuyo uso se extrae el calor del artilugio. Una porción de tales líquidos, aires y otros cuerpos y comunicada a otra porción con muy poca pérdida; de modo que en todos los casos en los que se requiera una sucesión constante de líquidos calientes u otros cuerpos, la cantidad de combustible necesaria para mantenerlo o suministrarlo se verá considerablemente disminuida por este mecanismo” (Stirling, 1816).

Además de esto, el motor está equipado con un regenerador térmico que es una forma de intercambiador de calor que absorbe cuando el fluido de trabajo va del pistón de alta temperatura al pistón de menor temperatura y libera el calor del fluido de trabajo cuando el fluido se desplaza del pistón de baja temperatura al pistón de alta temperatura. Esto hizo que el motor fuera más eficiente térmicamente que otros motores en ese momento. Los motores a gran escala se utilizaron para bombear agua durante casi dos años y produjeron dos caballos de fuerza (1.49 [kW]). Sin embargo, este motor no producía tanta potencia como el motor de vapor. Además, existía una preocupación clave por la capacidad metalúrgica de algunas partes del motor para soportar las altas temperaturas requeridas para mantener el motor en funcionamiento continuo (Stirling, 1816).

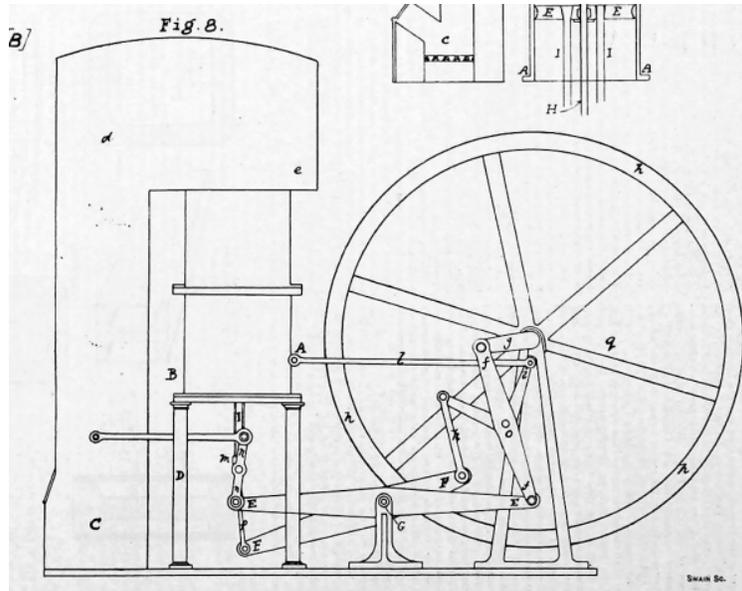


Figura 1.1: Regenerador de motor Stirling y motor de aire caliente (Stirling, 1816).

## 1.2. El funcionamiento del motor se explica a continuación

El émbolo como lo llamo Roberto Stirling, es el desplazador que se muestra con la letra D en la figura 1.3 y también se muestra el pistón representado con la letra P en la figura 1.3.

- La parte del cilindro rodeada por los conductos de humos se calienta a una temperatura de 480 [°F] (249 [°C]) más alta que la parte AB.
- En la posición representada en la figura 1.1 el émbolo está en contacto con el pistón, por lo que el aire incluido se lleva a la parte caliente del cilindro, aumenta su elasticidad y presiona el pistón con una fuerza mayor que la de la atmósfera.
- De este modo, el pistón se empuja hacia abajo y el vástago ff y la manivela g hacia arriba hasta que la presión del aire incluido y la de la atmósfera se igualan.
- El impulso comunicado a la mosca lleva el extremo de la manivela hacia q, y el brazo ff y la palanca doblada ii se llevan a una posición tal que presione la varilla k y, por lo tanto, levante el émbolo del pistón.
- El aire incluido se hace descender así entre el émbolo y el cilindro y se lleva a la parte fría; se enfría en su descenso, disminuye su elasticidad y su presión es menor que la de la atmósfera, el pistón se fuerza hacia arriba y la manivela hacia abajo.

- El giro del volante y la manivela vuelven a llevar el émbolo hacia el pistón, el aire asciende por el mismo pasaje por el que descendió, se calienta en su ascenso y empuja el pistón hacia abajo y la manivela hacia arriba, y así sucesivamente. De esta manera se produce un movimiento rotatorio que se puede aplicar al movimiento de maquinaria.
- La fuerza del motor se regula al permitir que una porción de aire escape hacia afuera y hacia adentro mediante un pequeño grifo que se abre y cierra mediante un gobernador como en las máquinas de vapor, y se coloca en la parte fría del cilindro inmediatamente por encima del ascenso más alto del pistón.
- La distancia que la varilla del émbolo H figura 1.1 se mueve a través del pistón, nombrada la carrera del émbolo y es igual a la del pistón cuando la diferencia de temperatura en las partes calientes y frías del cilindro es de 480 [°F] (249 [°C]). Cuando la diferencia es menor a 480 [°F] (249 [°C]) hago que la carrera del émbolo sea proporcionalmente mayor que la del pistón, y al contrario cuando la diferencia es mayor.
- La longitud de los brazos de la palanca doblada I y de la varilla k que es necesaria para que el émbolo toque el pistón, por un lado, el extremo superior del cilindro por el otro se determina experimentalmente como el más conveniente. Método conocido por mí. No respondo por la absoluta corrección de los del plan.
- El cilindro está invertido para evitar que el aceite utilizado para hacer hermético el pistón llegue a la parte caliente y desperdicie el calor.

Más tarde, Robert Stirling introdujo un segundo modelo del motor con el objetivo de aumentar la potencia de salida, como se ilustra en la figura 1.2. Este motor, que se instaló para impulsar la maquinaria en una fundición de hierro en la ciudad de Dundee en 1843, se basaba en un motor primario de pistón de doble acción capaz de producir treinta y siete caballos de fuerza (Stirling y J, 1827).

Comparada con la de 1816, la patente de 1827 contenía varios desarrollos importantes. El Stirling colocó el desplazador y el pistón de potencia en cilindros separados, como se mencionó. La geometría 1816 tenía el desplazador y el pistón en el mismo cilindro.

### **1.3. Intercambiadores de calor del motor Stirling**

Calentador: el calentador transfiere el calor absorbido de la fuente de calor al gas de trabajo y está ubicado cerca del espacio de expansión del motor. Como el motor se calienta externamente, la

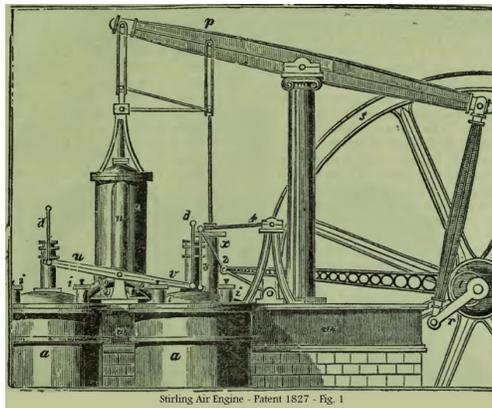


Figura 1.2: Motor de aire caliente (Stirling y J, 1827).

fuelle de calor podría provenir de la combustión de un combustible (combustible fósil, biomasa, biogás), calor solar, geotermia o incluso una fuente de calor residual. Dependiendo del tipo de fuente de calor, se determinan los parámetros de diseño del calentador y, en consecuencia, esto define el funcionamiento del motor. El volumen vacío del calentador es un parámetro crucial que afecta el rendimiento del motor; sobredimensionar el volumen del calentador degradaría la potencia del motor debido al aumento del volumen muerto. Por otro lado, la reducción de tamaño del calentador desequilibraría el calor necesario para su funcionamiento y podría hacer que el motor se detenga. El diseño del calentador es un equilibrio entre alta transferencia de calor, bajas pérdidas de bombeo y bajo volumen muerto. Dado que la potencia de salida del motor aumenta con las temperaturas del calentador más altas, los materiales con cargas de alta temperatura, como las superaleaciones avanzadas, las aleaciones de metales refractarios y las cerámicas debe seleccionarse si se busca una fuente de calor de alta temperatura. Los mecanismos generales de transferencia de calor que ocurren en el calentador son; transferencia de calor por convección y radiación desde la fuente de calor externa al área externa de los tubos calefactores, transferencia de calor por conducción desde la superficie exterior a la interior del intercambiador de calor y transferencia de calor por convección desde la superficie interior al fluido de trabajo. Los diferentes diseños de calentadores han evolucionado y se pueden clasificar en: intercambiadores de calor anulares, tubulares y con aletas (Stirling, 1816).

Enfriador: para mantener un gradiente de temperatura en el motor, el enfriador en el motor Stirling debe manejar el doble de potencia de enfriamiento que los motores tradicionales. Los tipos comunes adoptados en los motores Stirling son las configuraciones refrigeradas por aire y por agua. Los conductos de gas internos se enfrían mediante un fluido externo (agua o aire) generalmente en una configuración de flujo cruzado perpendicular a los canales que contienen el gas interno. El

intercambiador de calor más frío puede ser de tipo carcasa y tubo en el que los tubos contienen el gas a enfriar y el medio de refrigeración está en el lado de la carcasa (I y Berchowitz, 1984).

Regenerador: el regenerador es un componente clave del motor. Es un intercambiador de calor interno que actúa como una esponja térmica cuando absorbe y libera calor en una parte del ciclo, por lo que se mejora la potencia y la eficiencia del motor. El calor que se absorbe y se libera al gas en el regenerador durante un ciclo es típicamente cuatro veces el calor que pasa a través del calentador durante un ciclo. Un motor de este tipo sin un regenerador, su calentador necesitaría absorber cinco veces más calor durante un ciclo para que la potencia del motor generada sea la misma que con un regenerador. Se utilizan varios tipos de regeneradores para los motores Stirling, incluidos los espacios libres simples, pilas de pantallas de alambre tejido, fibras al azar, esferas empaquetadas, láminas envueltas, conjunto de tubos, espuma metálica y regenerador de placas paralelas. El tipo de regenerador convencional adoptado en los motores Stirling es la malla de alambre o fibra aleatoria (I y Berchowitz, 1984).

Existen algunas características ventajosas en el regenerador de matriz de alambre como:

- Altas transferencias de calor por convección entre el sólido y el gas debido al área de superficie extendida de los alambres y esto es similar a un flujo cruzado sobre alambres repetidos en forma de cilindro.
- Baja conducción axial en la dirección del flujo

Sin embargo, la desventaja de este tipo de regenerador es la alta fricción del flujo resultante de la separación del flujo, los remolinos asociados con áreas de estancamiento que pueden degradar el rendimiento del motor. El regenerador debe tener varias características para un mejor rendimiento que podrían ser contradictorias y esto supone un gran esfuerzo para que un diseñador encuentre la configuración óptima, Las consignas de referencia en las que se basa el diseñador son:

- A. Caída de presión mínima
- B. Máxima transferencia de calor por convección
- C. Conducción axial mínima en la dirección del flujo

## **1.4. Motores Stirling ahora**

El motor Stirling en 1816. En aquel momento, las máquinas de vapor tenían una eficiencia baja (2-10%) y eran inseguras. Las calderas explotaban con frecuencia y el vapor a alta presión que

se liberaba tenía efectos de escaldado. El motor de aire caliente Stirling prometía superar ambos problemas: el regenerador le daba una buena eficiencia y, en el improbable caso de que el motor explotara, solo se liberaba aire caliente, de modo que las consecuencias de un accidente eran mucho menos graves. Sin embargo, el motor Stirling nunca pudo estar a la altura de las expectativas. Si bien la turbina de vapor se mejoró cada vez más hasta alcanzar las eficiencias actuales de más del 45 %, y los motores de combustión interna, es decir, los motores Otto y Diesel, prevalecieron para su uso en automóviles y camiones, los motores Stirling casi desaparecieron de la escena. A diferencia de un motor de combustión interna, un motor Stirling no intercambia el gas de trabajo en cada ciclo, más bien contiene el gas de forma permanente. El calor se suministra fuera del motor, por lo que cualquier fuente de calor es adecuada para alimentar un motor Stirling. Así, un motor Stirling puede ser impulsado por combustibles de carbono (carbón, gas natural, gasolina, gasoil), hidrógeno, radiación solar, energía nuclear, calor residual de procesos industriales, etc. Si se utiliza un combustible, se quema continuamente, con menores emisiones que en un motor alternativo de combustión interna (I y Berchowitz, 1984).

Los motores de refrigeración Stirling pueden dar temperaturas muy bajas y se utilizan ampliamente para refrigeración criogénica a pequeña escala. Una aplicación prometedora para los motores térmicos Stirling es la conversión de energía solar en electricidad por medio de platos de espejo parabólico con motores Stirling en el foco. Si bien estos dispositivos solo pueden funcionar bajo la luz solar directa, pueden ser mucho más eficientes que las células fotovoltaicas. Actualmente, no es posible construir un motor Stirling de alta eficiencia a un precio competitivo. Para tener una alta potencia específica ([kW] por litro de capacidad del motor), el gas de trabajo debe estar muy presurizado (objetivo: hasta 190 [bar]), provocando problemas de estanqueidad al medio ambiente y lubricación. Es en los sellos donde se produce una gran parte de las pérdidas mecánicas. La eficiencia aumenta con la diferencia de temperatura entre la parte fría y la caliente del motor. Por lo tanto, los motores de alta eficiencia requieren materiales no estándar que puedan funcionar a temperaturas de 750 [°C] y más (I y Berchowitz, 1984).

## **1.5. Fenómenos relevantes en un motor Stirling**

Los principales fenómenos que ayudaron a mejorar el funcionamiento del motor Stirling con su entendimiento son:

Fuga de fluido de trabajo: el tipo típico de sellos en los motores Stirling son los sellos tradicionales de anillo o de holgura; el concepto de diseño de las juntas se basa en el funcionamiento sin

lubricación con aceite. Es posible que los sellos no estén perfectamente apretados, ya que esto puede causar un sobrecalentamiento local con las superficies en movimiento. Por lo tanto, es posible que las fugas a través de los sellos no se puedan evitar. Esto principalmente da como resultado una reducción en la eficiencia debido a la pérdida de presión interna a medida que se reduce la masa de gas. Los efectos termodinámicos relacionados con las pérdidas por fugas son la reducción de la masa de fluido interno en el motor (I y Berchowitz, 1984).

Pérdidas mecánicas y de bombeo: además de la pérdida de potencia debido a sellos reales y un mecanismo de accionamiento real, las pérdidas de bombeo debido a la caída de presión en las diferentes partes del motor, incluidos los tres intercambiadores de calor y las secciones de tubería, pueden contribuir a la pérdida de potencia de salida del motor. Las pérdidas mecánicas se deben a las fuerzas de fricción entre las partes mecánicas; entre el anillo de estanqueidad y el cilindro, en la junta del eje, el par de fricción en todos los rodamientos y en la resistencia aerodinámica del volante. Estas pérdidas se explican normalmente por la eficacia de frenado del motor real (I y Berchowitz, 1984).

Gas real y turbulencia: como resultado de la no idealidad del gas de trabajo y las irreversibilidades de los mecanismos de transporte en el ciclo real, las pérdidas por histéresis del resorte de gas es una de las diferencias entre los ciclos ideales y reales. Las pérdidas por histéresis están asociadas con fluctuaciones transitorias de transferencia de calor entre el gas y las paredes sólidas circundantes y pueden ser significativas si los espacios de compresión y expansión están lejos de los dos extremos idealizados de isoterma y adiabático. Por lo tanto, la producción de trabajo del motor se ve afectada a medida que se experimenta una transferencia de calor ineficiente. Como resultado de los efectos de las turbulencias, una parte de la energía del fluido se disipa dentro de las microestructuras porosas debido a los vórtices o remolinos generados según la geometría del motor (I y Berchowitz, 1984).

Espacios muertos: en teoría, el volumen no barrido del espacio de trabajo se denomina espacio muerto, que no es barrido por el movimiento de los pistones, lo que significa que el gas no puede expandirse o expandirse por completo. Comprimido y parte del gas permanecería en estos espacios. Esto incluye los espacios libres del cilindro, los volúmenes vacíos del regenerador, el calentador, el enfriador y las tuberías. A diferencia del ciclo ideal, los motores reales pueden tener hasta un 50 % de volumen muerto de su volumen total de gas, lo que reduce la potencia del motor (I y Berchowitz, 1984).

Intercambiadores de calor reales: el rendimiento del motor depende significativamente de la eficacia de cada intercambiador de calor, incluidos el calentador, el enfriador y el regenerador. Otra diferencia entre los ciclos ideales y reales es que en los intercambiadores de calor reales, el supuesto de una tasa de transferencia de calor infinita es pobre y, por lo tanto, los procesos de expansión y compresión isotérmica no son prácticos. De hecho, algunas partes del motor Stirling experimentan continuamente altas temperaturas que a su vez están limitadas por los límites metalúrgicos. Una forma de mejorar la eficiencia de los intercambiadores de calor es aumentar su superficie. Sin embargo, los intercambiadores de calor más grandes pueden implicar un volumen muerto mayor y una pérdida por fricción elevada. Por lo tanto, el diseño óptimo es normalmente un compromiso entre los efectos positivos de una mayor transferencia de calor y los efectos negativos de una mayor caída de presión (I y Berchowitz, 1984).

Pérdidas térmicas: en los motores Stirling, las pérdidas térmicas que se producen en el espacio de expansión y el regenerador pueden alterar significativamente las temperaturas de trabajo del gas hasta cierto punto dependiendo del tipo de fuente de calor. El espacio del apéndice, que es el dominio de gas confinado entre el desplazador y el cilindro de la carcasa, está relativamente expuesto a un tipo combinado de pérdida debido al movimiento del desplazador entre las posiciones extremas y las temperaturas extremas. El desplazador absorbe calor debido a la convección y conducción y luego se rechaza al gas frío en el espacio del apéndice, este tipo de pérdida se conoce como pérdida de lanzadera. El efecto secundario asociado a la pérdida de lanzadera es la alta resistencia al flujo cuando el gas se bombea a través del espacio del apéndice en paralelo con la trayectoria del flujo a través de los intercambiadores de calor. El efecto combinado de la lanzadera y la pérdida por histéresis puede degradar el potencial de trabajo del motor (I y Berchowitz, 1984).

## **1.6. Configuraciones de motor**

Los componentes típicos del motor Stirling, según el tipo de motor, como se muestra en la figura 1.3, son: pistón de potencia, pistón de desplazamiento, calentador, enfriador y regenerador, nótese que el regenerador, que es el objeto de estudio del presente trabajo, aparece indicado con la letra R. Los motores Stirling están dispuestos mecánicamente en tres configuraciones; alfa, beta y gamma. Para las tres configuraciones, el ciclo es termodinámicamente similar.

En motor Stirling tipo alpha, los pistones fríos y calientes montados en cilindros separados trabajan en cada lado del regenerador. El gas completa el ciclo termodinámico cerrado de expansión

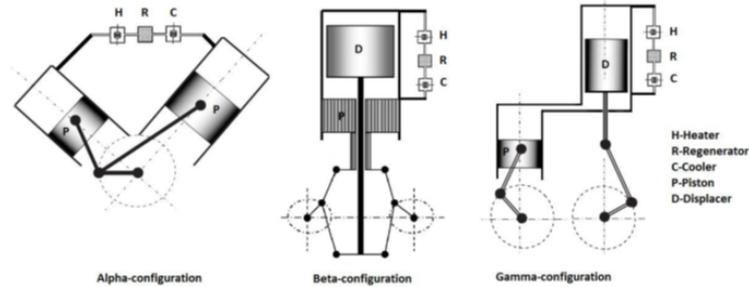


Figura 1.3: Componentes y configuraciones del motor Stirling (Thombare y Verma, 2008).

y compresión en los cilindros frío y caliente, respectivamente. La disposición en V y la transmisión del yugo (varillaje Ross) se aplican a menudo a este tipo de motor, como se muestra en la 1.3. Para motores más grandes, el alfa puede ser de doble acción (Thombare y Verma, 2008).

El motor Stirling tipo beta consiste básicamente en un pistón de potencia y un desplazador incorporados en el mismo cilindro como se muestra en la figura 1.3. El desplazador actúa para mover o desplazar el gas hacia adelante y hacia atrás sin afectar la presión del gas, mientras que el pistón de potencia comprime el gas cuando está en frío. Una desventaja mecánica es que una varilla de accionamiento del desplazador se extiende a través del pistón. Por otro lado, se puede obtener una mayor compresión, eficiencia y potencia debido a un menor volumen muerto. La transmisión rómbica se aplica a menudo a este tipo de motor, como se muestra en la figura 1.3, (Thombare y Verma, 2008).

En motor Stirling tipo gamma, el pistón de potencia y el desplazador están ubicados en cilindros separados. El pistón de potencia, que se encuentra en el lado frío del cilindro, comprime o expande el gas que se empuja hacia el cilindro. La deficiencia son los volúmenes muertos más altos, específicamente la tubería de conexión que conecta tanto el espacio de compresión como la parte inferior del espacio de expansión. La transmisión de manivela estándar se aplica a menudo a este tipo de motor, como se muestra en la figura 1.3, (Thombare y Verma, 2008).

## 1.7. Principales Referencias en la Literatura

El motor Stirling es un motor calentado externamente, es térmicamente regenerativo, prácticamente silencioso, seguro de operar e intrínsecamente flexible para adoptar cualquier fuente de calor como solar, biomasa, energía geotérmica o incluso residuos industriales. Sin embargo, su baja potencia específica en comparación con los motores de combustión interna (ICE) y el alto costo inicial del motor pueden obstaculizar aún más el desarrollo y la optimización de las máquinas Stirling. El desarrollo exitoso de un motor Stirling eficiente y rentable tendrá un impacto

significativo en la recuperación de las fuentes de calor residual disponibles, lo que conducirá a una reducción significativa en el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO<sub>2</sub> (Kumar y Karimi, 2014).

Un trabajo presentado en 2010 expone que la microgeneración ofrece numerosas ventajas potenciales para el suministro de energía a edificios residenciales. Con el objetivo de reducir las cargas medioambientales consecuentes de la generación de energía centralizada. En ese estudio buscan estrategias para optimizar la integración de un sistema de microgeneración basado en motor Stirling en edificios residenciales (Alanne et al., 2010).

Se realizó un estudio en donde se presentan los resultados de las pruebas de un motor Stirling con un mecanismo de accionamiento de desplazamiento controlado por palanca. Las pruebas se hicieron con helio y el fluido de trabajo se cargó en el bloque del motor. El calor fue suministrado por un quemador de gas. El motor comenzó a funcionar a 118 [°C] de temperatura de final caliente y las pruebas ajustables del motor se efectuaron a temperaturas de superficie externa del extremo caliente de 180 [°C], 220 [°C] y 260 [°C]. Durante la prueba, la temperatura final fría se mantuvo a 27 [°C] por medio de circulación de agua (Karabulut et al., 2010).

En 2011 se presenta una investigación teórica sobre el análisis termodinámico de un motor Stirling con variaciones lineales y sinusoidales del volumen. El regenerador en un motor Stirling es un Intercambiador calor interno, que permite alcanzar una alta eficiencia. Se utiliza un modelo isotérmico para analizar el trabajo neto y el calor almacenado en el regenerador durante un ciclo completo. Una expresión analítica para estimar la mejora debido a esta se ha propuesto el regenerador que incluye los efectos combinados del volumen muerto y la regeneración imperfecta. Esto podría usarse en la etapa muy preliminar del proceso de diseño del motor (Puech y Tishkova, 2011). Se presenta el trabajo en donde se abordan varios aspectos que deben considerarse en diferentes etapas de toma de decisiones del diseño y desarrollo de un motor Stirling. La metodología de diseño propuesta puede generar y evaluar una gama de posibles alternativas de diseño que pueden acelerar el proceso de toma de decisiones y también proporcionar una comprensión clara de las consideraciones de diseño del sistema (Shendage et al., 2011).

En el 2012 se presentó el desarrollo de un motor Stirling impulsado por gases residuales de temperatura media alta (300 [°C] y 650 [°C]). Se estudian las relaciones entre la potencia del eje de salida, el par y la velocidad, y también se analizan las pérdidas de presión del fluido de trabajo en el sistema del intercambiador de calor. Los resultados de la prueba demuestran que la potencia del eje de salida podría alcanzar 3476 [W] a 1248 [RPM], lo que está en buen acuerdo con el valor previsto de 3901 [W] a 1500 [RPM]. Los resultados de la prueba confirman el hecho de que los motores Stirling impulsados por gases residuales de temperatura media-alta pueden lograr una

potencia de salida valiosa para aplicaciones de ingeniería (Li et al., 2012).

Se investigó un motor gamma Stirling con aire comprimido como fluido de trabajo. El motor está equipado con varios sensores de presión y termopares. Este estudio experimental se concentra en el material constituyente del regenerador (medio poroso). Se investigaron cuatro materiales diferentes: acero inoxidable, cobre, aluminio y Monel 400. Como conclusión, el regenerador tiene un papel importante para mejorar el intercambio de calor y mejorar el rendimiento del motor Stirling, que depende en gran medida del material que lo constituye (Gheith et al., 2012).

En 2013 se desarrolló y probó un motor Stirling de tipo beta de 300 [W], y se construyó y aplicó un modelo adiabático no ideal para predecir el rendimiento del motor. El par motor, la velocidad del motor y la potencia de salida del eje se miden en varias condiciones de funcionamiento. Los experimentos se realizan para dos gases de trabajo diferentes (aire y helio) y a diversas presiones cargadas y temperaturas de calentamiento. También se examinan los efectos de la malla de alambre del regenerador en la salida de potencia del eje. Los resultados muestran que la potencia de salida del eje del motor es mucho mayor usando helio como fluido de trabajo que usando aire (Cheng et al., 2013).

En 2014 se trabajó en este estudio, optimización de objetivos múltiples con cuatro variables de decisión, incluida la temperatura del calor fuente, carrera, presión efectiva media y la frecuencia del motor, se aplicaron para aumentar la eficiencia y potencia de salida y reducir la caída de presión. Tres procedimientos de toma de decisiones fueron aplicados para optimizar las respuestas de los resultados (Toghyani et al., 2014). En 2015 un trabajo trata la optimización del regenerador del motor Stirling. En primer lugar, se experimenta con diferentes materiales (acero inoxidable, cobre, aluminio y Monel 400). Se consideran las prestaciones del motor y el estado de cada material después de 15 [hr.] de uso. El acero inoxidable es el material que mejor satisface estas dos condiciones. Se fabricaron y experimentaron cinco regeneradores en acero inoxidable con diferentes porosidades (9%, 90%, 85%, 80% y 75%) (Gheith et al., 2015).

En 2017 un trabajo presentó el desarrollo del nuevo regenerador Stirling como uno de los regeneradores de geometría paralela. Para el diseño actual se adoptaron 8 canales en miniatura circulares con diferentes diámetros, 1.5, 1.0, 0.6, 0.5 y 0.4 [mm]. Basado en la transferencia de calor conjugada transitoria en un sector de regenerador para obtener el flujo de fluido y las características de transferencia de calor de cada configuración. Los resultados revelaron que el regenerador de canal de 0.5 [mm] tenía un buen potencial cerca del regenerador de fibra aleatorio para maximizar la potencia indicada por el motor. Sin embargo, el rendimiento del motor se vio afectado negativamente por el calor excesivo rechazado del enfriador debido a la pérdida de conducción axial heredada de los regeneradores de canal en comparación con el regenerador convencional (Alfarawi

et al., 2017).

En 2018 se realizó una comparación numérica de la potencia de salida y la eficiencia energética de tres tipos de motores Stirling ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ). Los tres tipos de motores Stirling no incluyen un regenerador. Los resultados muestran que el motor Stirling de tipo  $\gamma$  es capaz de producir la mayor potencia de salida y la mayor eficiencia térmica (9.223 [W] y 9.8%). Le sigue el motor Stirling de tipo  $\beta$  (8.634 [W] y 7.5%). En contraste, el rendimiento más bajo se logra con el motor Stirling tipo  $\alpha$  (0.908 [W] y 1.8%). Por lo tanto, el motor Stirling de tipo  $\alpha$  se modifica para tener una tubería de conexión anular en lugar de una tubería de conexión circular. En consecuencia, su rendimiento mejoró drásticamente para producir 9.856 [W] con una eficiencia térmica del 10.5% (Abuelyamen y Ben-Mansour, 2018).

En 2019 se realizó un trabajo utilizando un enfoque teórico y experimental combinado para determinar cómo lograr un valor deseado para la efectividad del regenerador del motor Stirling. Se desarrolla un modelo discreto de transferencia de calor unidimensional para determinar qué parámetros influyen en la efectividad de los regeneradores de motores Stirling y cuantificar cómo influir en ello. Se encontró que la relación de masa térmica del regenerador y el número de subregeneradores son los dos parámetros que influyen en la efectividad del regenerador, y se muestra que el uso de múltiples subregeneradores produce una distribución lineal de temperatura dentro de un regenerador, lo que permite que la efectividad sea aumentada por encima del 50%. Se muestra que aumentar la relación de masa térmica del regenerador y el número de subregeneradores da como resultado un aumento en la efectividad del regenerador y un aumento correspondiente en la eficiencia del motor Stirling. Se requiere un mínimo de 19 subregeneradores para lograr una efectividad de regenerador del 95% (Nielsen et al., 2019). En 2020 se realizó un estudio de regeneradores de placas paralelas, con una resistencia al flujo más baja que los regeneradores de malla de alambre tradicionales, que pueden mejorar la eficiencia térmica de los motores Stirling. Sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia de trabajo o el grosor de la placa, el calor no puede penetrar en la placa de manera eficaz, lo que hace que solo la parte de la superficie de las placas tenga una variación sustancial de temperatura, mientras que la parte interna no almacena ni intercambia energía térmica (Wang et al., 2021).

Se presentó un trabajo en donde la energía de entrada del motor Stirling es provista por la luz solar como fuente de calor. El estudio presenta el efecto de diferentes variables sobre la generación de energía y la eficiencia del sistema. Además, el enfoque de inteligencia artificial se emplea para modelar un plato solar con sistema Stirling. Para este objetivo, se proporcionó un gran conjunto de datos al considerar una amplia gama de variables de entrada. Los métodos inteligentes son el método de grupo de manejo de datos de red neuronal, sistema de inferencia adaptativa neuro-

difusa y red neuronal de perceptrón multicapa. Están optimizados con optimización de enjambre de partículas y algoritmo genético, los métodos inteligentes están entrenados con entradas y objetivos (Khosravi et al., 2019).

Cuadro 1.1: Trabajos directamente relacionados con el campo de estudio del proyecto desarrollado.

<b>Año</b>	<b>Aportación de investigaciones en el área del regenerador</b>
2012	Este estudio experimental se concentra en el material constituyente del regenerador (medio poroso). Se investigaron cuatro materiales diferentes: acero inoxidable, cobre, aluminio y Monel 400.
2014	Experimentado con 4 materiales para el regenerador. Pruebas con 5 regeneradores (95 %, 90 %, 85 %, 80 % y 75 %). El regenerador en acero inoxidable con porosidad del 85 % fue considerado como la matriz más adecuada, maximizando la transferencia de calor y minimizando las caídas de presión.
2016	Simulación del motor Stirling tipo Gamma, la potencia del eje se puede mejorar significativamente en un 49 % para helio y 35 % para nitrógeno cuando la temperatura de enfriamiento se reduce a 50 [°C] mientras la parte caliente permanece constante a 650 [°C].
2017	El desarrollo del nuevo regenerador Stirling como uno de los regeneradores de geometría paralela. Para el diseño actual se adoptaron 8 canales en miniatura circulares con diferentes diámetros, 1.5, 1.0, 0.6, 0.5 y 0.4 [mm]. Se realizó un enfoque 3D con mecánica de fluidos computacional.
2018	Una comparación de la potencia de salida y la eficiencia energética de tres tipos de motor Stirling ( $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ ) se realiza numéricamente. Eficiencia 1.8 %, 7.5 % y 9.8 %, el motor Stirling de tipo $\alpha$ se modifica para tener una tubería de conexión anular, su rendimiento mejoró drásticamente a un 10.5 % de eficiencia.
2019	Se utiliza un enfoque teórico y experimental, se muestra el uso de múltiples sub-regeneradores para producir una distribución de temperatura lineal dentro de un regenerador, lo que permite aumentar la eficacia por encima del 50 %.
2020	Los regeneradores de placas paralelas, con una resistencia al flujo menor que los regeneradores tradicionales de malla de alambre, pueden mejorar la eficiencia térmica de los motores Stirling. Se encuentra que tres parámetros juegan un papel importante, que son la frecuencia de trabajo, el espesor de la placa y la difusividad térmica de los materiales.

## 1.8. Principales patentes

Se patentó un regenerador para motor Stirling y el método para su fabricación. El regenerador tiene una red aleatoria de fibras formada para llenar un volumen específico y un material para reticular las fibras en los puntos de contacto cercano entre las fibras de la red. Un método para fabricar un regenerador tiene las etapas de proporcionar un tramo de cinta metálica tejida y envolver una pluralidad de capas de la cinta en una espiral anular, como se muestra en la figura 1.4. De acuerdo con realizaciones preferidas de la presente invención, se proporciona un método para fabricar un regenerador para un motor de ciclo térmico. El método incluye envolver una pluralidad de capas de cinta metálica tejida en una espiral anular. La cinta metálica tejida se puede envolver en capas anulares paralelas alrededor de un mandril y luego se puede retirar el mandril. Además, la cinta metálica tejida se puede aplanar (Kamen et al., 2005).

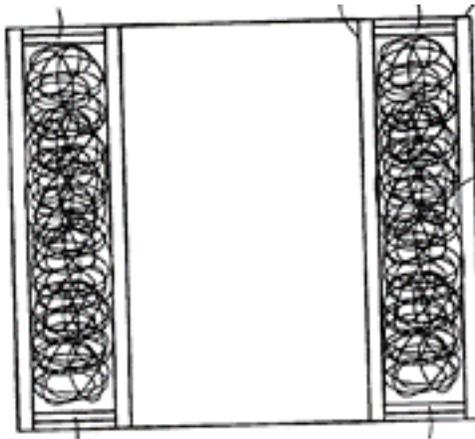


Figura 1.4: Regenerador de red aleatoria de fibras (Kamen et al., 2005).

Se presentó la patente de un regenerador estratificado canalizado con intercambiadores de calor integrados que usa micromecanizado para construir geometrías estructurales con precisión, tales como aletas y estratificación axial del material que se utilizará en un sistema basado en el ciclo Stirling como se muestra en la figura 1.5. En funcionamiento, el fluido de trabajo pasa a través del regenerador cuando viaja entre dos intercambiadores de calor. En algunas implementaciones, el regenerador y los intercambiadores de calor se forman como una sola construcción. Otras implementaciones, el regenerador y los intercambiadores de calor se forman por separado, pero están contruidos para integrarse eficientemente entre sí (Qiu et al., 2006).

Se patentó un regenerador que se va a formar enrollando una película de resina en una forma cilíndrica, se forma una proyección sobre una superficie de la película de resina sometiendo la

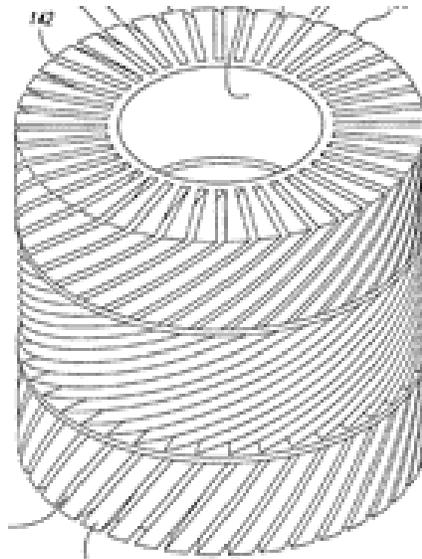


Figura 1.5: Regenerador estratificado canalizado (Qiu et al., 2006).

película de resina en sí misma a una deformación plástica, ya sea por estampación o por irradiación con rayo láser. La proyección proporciona un espacio entre las capas de la película de resina apilada para que sea un paso de flujo para un gas de trabajo. Así, se proporciona un regenerador de alta eficiencia de intercambio de calor con facilidad y bajo costo, se muestra en la figura 1.6 (a) donde el otro objeto de la presente patente es proporcionar un aparato para la fabricación de un regenerador que garantice un mayor grado de libertad de diseño de las proyecciones a formar sobre una película de resina que constituye el regenerador, y permita que las proyecciones se formen con buena reproducibilidad y con un alto grado de precisión (Katayama y Hiroyuki, 2008).

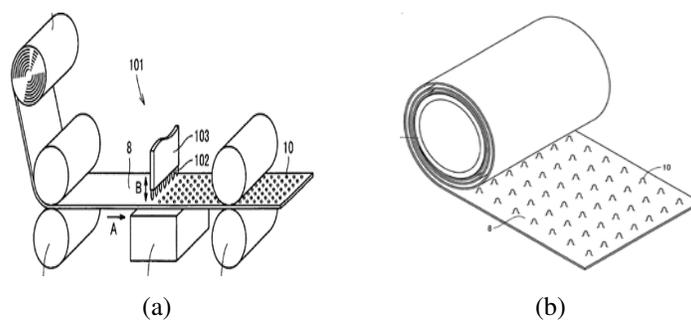


Figura 1.6: Proceso de fabricación del regenerador de mallas metálicas y regenerador de mallas metálicas (b) (Katayama y Hiroyuki, 2008).

Se describe un regenerador para un motor térmico externo, en particular para un motor Stirling, que está adaptado para ser montado en el pasillo para un fluido de trabajo que se mueve desde el

lado caliente del motor al lado frío del motor y Viceversa. El regenerador es capaz de recibir y almacenar temporalmente calor, que es depositado por el fluido de trabajo cuando pasa por el regenerador, en su camino del lado caliente al lado frío del motor, y de liberar calor al fluido de trabajo de nuevo cuando pasa por el regenerador en su camino desde el lado frío al lado caliente del motor. El regenerador que se muestra en la figura 1.7 comprende al menos un canal pasante que se estrecha a lo largo de una extensión axial del mismo desde un puerto del lado caliente a un puerto del lado frío del canal pasante, de modo que el fluido de trabajo que fluye a lo largo del canal se mantiene bajo una presión generalmente constante.

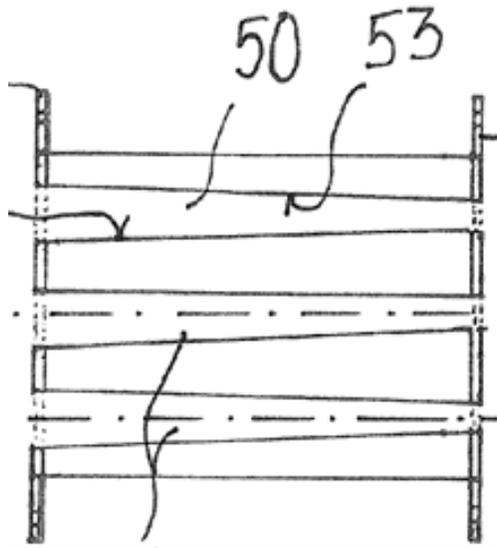


Figura 1.7: Regenerador de canal pasante que se estrecha a lo largo del canal (Noskov et al., 2016).

Se realizó la patente de un desplazador regenerativo para uso en un motor Stirling que incluye dos cubiertas opuestas con respectivas aberturas pasantes, un cuerpo que se acopla a las cubiertas para definir un espacio de alojamiento en el mismo, un regenerador dispuesto en el espacio de alojamiento y una varilla insertada a través del regenerador y una de las cubiertas. En una parte de enfriamiento del motor Stirling, el regenerador tiene una pluralidad de canales. Cada canal tiene dos extremos abiertos y una red recolectora de calor que se acopla a cada extremo abierto. El gas de trabajo que pasa a través del desplazador regenerativo se puede concentrar en los extremos abiertos y puede absorber y liberar calor rápidamente debido a las redes recolectoras de calor, aumentando así la eficiencia del intercambio de calor y la diferencia de temperatura del gas de trabajo en un ciclo termodinámico. En consecuencia, se aumenta la presión para facilitar un movimiento alternativo rápido de un pistón de potencia del motor Stirling, y esto aumenta la potencia de salida y ahorra energía.

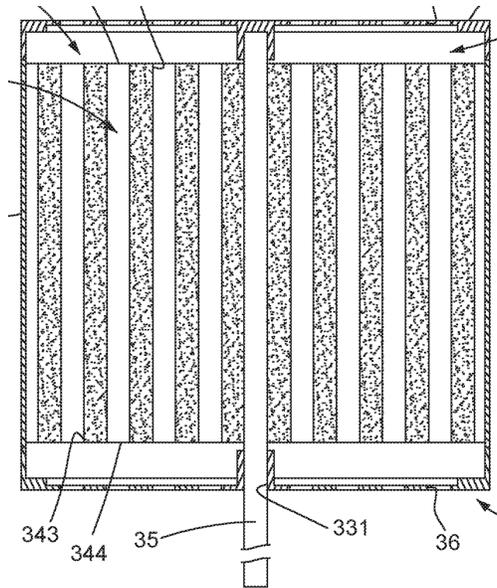


Figura 1.8: El regenerador de pluralidad de canales (Chen et al., 2020).

## 1.9. Descripción del Problema

El aumento de la demanda de energía está en auge debido al incremento de la población, la industria y el estilo de vida actual, lo que propicia el aumento de la contaminación, datos de la secretaria de energía (SENER) en 2017, en México se produjeron un total de 7027.223 peta-joules (energía) de los cuales el 85.54% fue generado por los hidrocarburos y tan solo el 9.47% fue de energías renovables, la principal producción de la energía eléctrica en México es generada en centrales eléctricas mediante ciclos combinados (brayton-rankine), México es un país que tiene una tendencia al consumo energético mayor a su producción local, como se muestra en la figura 1.9.

La energía solar o residual en la industria debe ser usada a través de un motor Stirling de bajo costo para que la energía mecánica del motor pueda mover generadores eléctricos y aminorar el problema de energía en México y el mundo además de ayudar al medio ambiente al bajar la quema de combustibles fósiles, pero la aplicación de un motor Stirling a un no es del todo viable debido al costo de fabricación y a la eficiencia del motor, es necesario seguir buscando alternativas que mejoren la eficiencia del motor, como la investigación presente buscando un diseño adecuado para el regenerador en el motor Stirling que puede mejorar la eficiencia de la máquina.

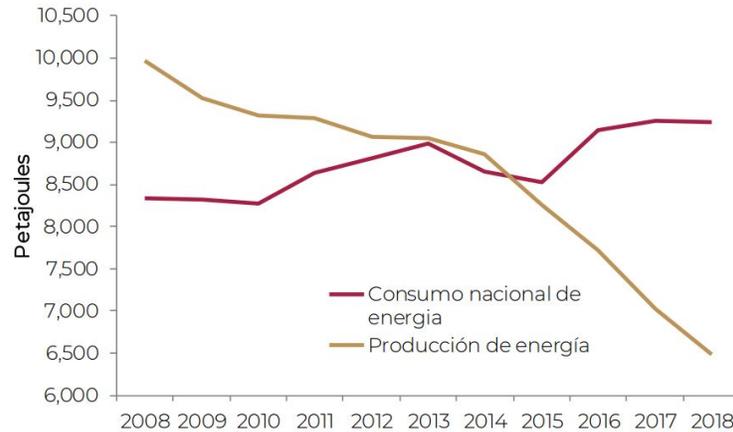


Figura 1.9: Evolución de la producción y el consumo nacional de energía (SENER, 2018).

## 1.10. Justificación

El presente proyecto de investigación se centra en el tema de energías renovables, se construyó un banco de pruebas para regenerador de un motor Stirling con gas presurizado, considerando como motivación una aportación a disminuir el problema ambiental de gases de efecto invernadero que absorben la energía de forma térmica y permanecen un tiempo prolongado en la atmósfera propiciando el calentamiento global, la energía solar y geotérmica existen en abundancia en todo el mundo, es importante enfatizar que la energía solar recibida por la tierra en una hora es mayor que la energía global consumida por otras fuentes de energía en un año (Goswami y Kreith, 2007).

Una investigación en 2020 (Otto et al., 2020) propuso que una de las intervenciones sociales que podrían ayudarnos a hacer cambios favorables para el cambio climático es:

**Eliminar los subsidios a los combustibles fósiles e incentivar la generación descentralizada de energía.**

En Querétaro de acuerdo con datos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Juriquilla se genera una radiación solar máxima de  $1028 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ , en la figura 1.10 el color rojo indica mayor radiación solar y como se puede observar que México se encuentra en una zona donde la radiación tiene una gran significancia, esta radiación se puede utilizar como fuente de calor de un motor Stirling en un trabajo futuro.

Otra aplicación del motor Stirling es la de recuperador de calor residual, en gran parte de la industria la energía en forma de calor residual no recuperado se produce a bajas temperaturas, las corrientes de calor residual analizadas en un estudio muestran que aproximadamente el 40% a 60% del flujo de calor residual no recuperado es de baja calidad, se considera de baja calidad por temperaturas inferiores  $232 [^{\circ}C]$ . En ocasiones estas energías en forma de calor son despre-

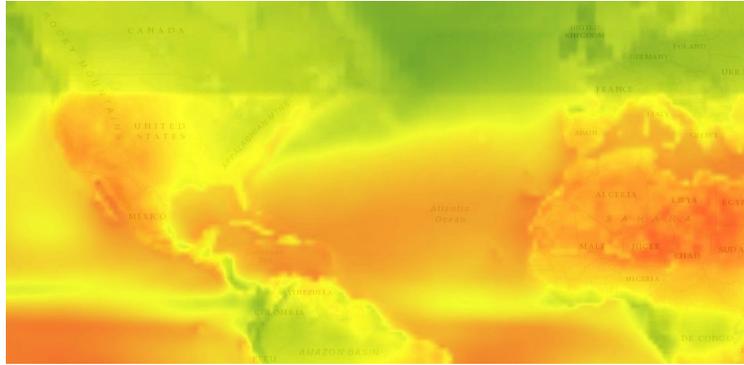


Figura 1.10: Mapa de Radiación solar, NASA (Stackhouse y Kusterer, 2000).

ciables por considerar que tiene menos valor térmico y económico que el calor a alta temperatura (Kumar y Karimi, 2014), por lo cual se busca desarrollar nuevas tecnologías que pueden brindar oportunidades para la recuperación de calor residual.

## **1.11. Hipótesis**

Las características del regenerador con matriz de microcanales de geometría curva circular para motor Stirling mejora la transferencia de calor respecto al regenerador con microcanales de trayectoria lineal.

## **1.12. Objetivos**

### **1.12.1. Objetivo General**

Diseñar y construir un banco de pruebas para regenerador de motor Stirling para medir el rendimiento del regenerador con matriz de microcanales de geometría curva circular propuesto, que permita medir temperatura de entrada, temperatura de salida, caída de presión y flujo del gas.

### **1.12.2. Objetivos Particulares**

- Desarrollar un diseño de banco de pruebas para regenerador de motor Stirling versátil, para realizar pruebas con diferentes tipos de regeneradores.
- Implementar la instrumentación, para medir las variables del regenerador y compararlas con el modelo termodinámico.

## Fundamentación Teórica

### 2.1. Termodinámica del motor de ciclo Stirling

La conversión de energía efectiva requiere la reducción de irreversibilidades internas y externas tanto como sea posible. Una causa importante de irreversibilidad externa es la transferencia de calor entre el sistema y sus fuentes de calor y sumideros, por ejemplo, una corriente de gas de combustión o el medio ambiente. La pérdida relacionada se puede reducir si el calor que se rechaza en un proceso de un ciclo se puede agregar en otra parte del sistema. Esto reduce simultáneamente el rechazo de calor y el suministro de calor desde el exterior, lo que conduce a mejoras de eficiencia. De hecho, la regeneración, es decir, el intercambio interno de calor dentro de un sistema, es la herramienta más importante para reducir las irreversibilidades externas y aumentar la eficiencia. Históricamente, el primer motor que utilizó un regenerador fue el motor Stirling. El ciclo de Stirling idealizado consta de dos procesos isotérmicos y dos isocóricos, que tienen lugar a temperaturas  $T_H$  y  $T_L$ , y volúmenes  $V_1$ ,  $V_2$ , respectivamente. El medio de trabajo es un gas ideal, por ejemplo, aire o helio, que está confinado permanentemente en un cilindro. Los diagramas  $T - S$  y  $P - V$  se muestran en la figura 2.1 y 2.2, (Struchtrup, 2014).

Ignoramos todas las irreversibilidades internas, por lo que el trabajo y el calor para los procesos reversibles dentro del ciclo ideal de Stirling son:

1 – 2 isotérmico:

$$W_{12} = RT_h \ln \frac{V_2}{V_1} > 0, \quad q_{12} = RT_h \ln \frac{V_2}{V_1} > 0 \quad (2.1)$$

2 – 3 isocórico:

$$W_{23} = 0, \quad q_{23} = u(T_L) - u(T_H) < 0 \quad (2.2)$$

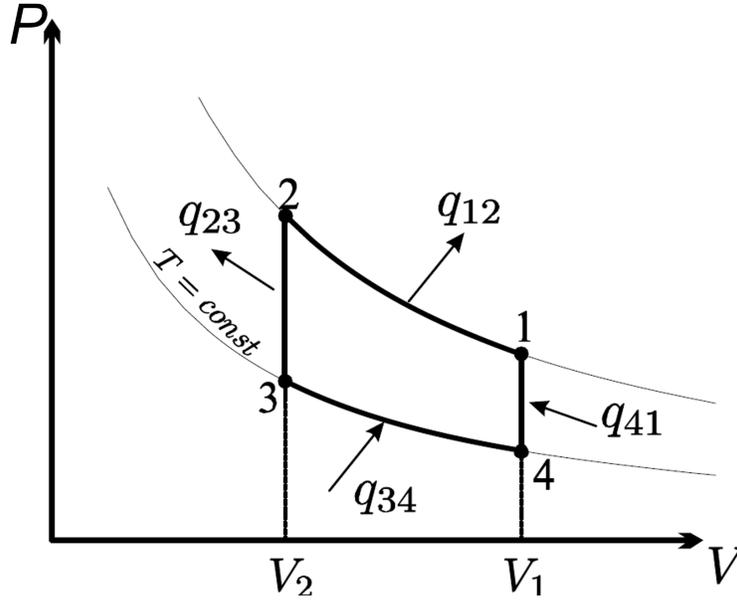


Figura 2.1: Diagrama presión volumen de ciclo Stirling ideal (Struchtrup, 2014).

3 – 4 isotérmico:

$$W_{34} = RT_L \ln \frac{V_1}{V_2} < 0, \quad q_{12} = RT_L \ln \frac{V_1}{V_2} < 0 \quad (2.3)$$

4 – 1 isocórico:

$$W_{41} = 0, \quad q_{41} = u(T_H) - u(T_L) < 0 \quad (2.4)$$

Dado que la energía interna del gas ideal depende solo de la temperatura,  $u = u(T)$ , resulta que los calores intercambiados durante los procesos isocóricos son iguales, pero de signo opuesto.

$$q_{23} = u(T_L) - u(T_H) = q_{41} \quad (2.5)$$

Con esto, el calor  $q_{23}$ , que se rechaza durante el proceso de enfriamiento isocórico, se puede utilizar para el calentamiento isocórico  $q_{41}$ . En el motor Stirling, esto se hace mediante el regenerador, que permite el intercambio de calor interno. El principio de funcionamiento del regenerador se discutirá más adelante. Cuando se emplea un regenerador, el calor  $q_{41}$  se intercambia internamente y solo el calor  $q_{12}$  debe proporcionarse desde el exterior, por ejemplo, quemando un combustible. La eficiencia térmica se obtiene con las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3) y (2.4), dando como resultado

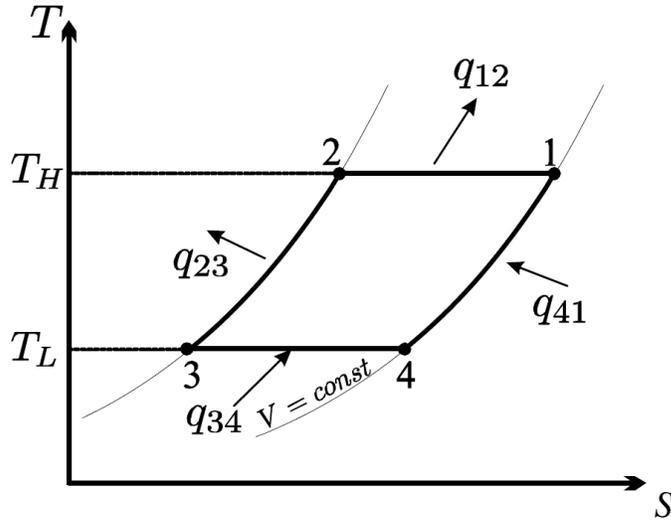


Figura 2.2: Diagrama temperatura entalpía de ciclo Stirling ideal (Struchtrup, 2014).

(2.6):

$$\eta_{St} = \frac{q_{12} + q_{34}}{q_{12}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.6)$$

En caso de que  $T_L$  y  $T_H$  son las temperaturas de los reservorios con los que el ciclo intercambia calor, lo anterior es solo la eficiencia de Carnot, que es la eficiencia máxima para un proceso que opera entre reservorios a temperaturas  $T_H$  y  $T_L$ . De ello se deduce que el proceso ideal de Stirling con regenerador es una realización de un motor Carnot, siempre que la transferencia de calor con los depósitos tenga lugar a una diferencia de temperatura infinitesimal.

Se observa que las cantidades de calor intercambiadas durante los procesos isocóricos,  $q_{23}$  y  $q_{41}$ , solo pueden ser iguales en tamaño para un gas ideal (con calores específicos variables o constantes), para el cual la energía interna no depende de un volumen específico,  $u = u(T)$  y no  $u = u(T, v)$ . Esto es diferente para el ciclo de Carnot, otra realización de un motor Carnot, que tiene la misma eficiencia independientemente del medio de trabajo.

Aunque la eficiencia es independiente del tipo de gas ideal utilizado, la mayoría de los motores Stirling utilizan helio o hidrógeno como medio de trabajo. La alta conductividad térmica de los gases con masas moleculares bajas conduce a un intercambio de calor más rápido y, por lo tanto, permite hacer funcionar el motor a una frecuencia más alta. La potencia de salida del motor depende de la masa  $m$  encerrada en el cilindro y de la velocidad de rotación  $n$  del motor, como se

muestra en la figura 2.2, (Struchtrup, 2014).

$$W = nm(q_{12} + q_{34}) \quad (2.7)$$

Se pueden lograr cambios rápidos en la demanda de energía, ya que son necesarios para su uso en automóviles, cambiando la cantidad de gas de trabajo en el cilindro, es decir, bombeando masa adicional hacia adentro o hacia afuera. Esto, por supuesto, se suma a la complejidad del proceso. Por lo tanto, no es de extrañar que la mayoría de las aplicaciones actuales del motor Stirling consideren sistemas que funcionan a carga constante y generan electricidad, en particular con suministro de calor de colectores solares.

## 2.2. Principio de funcionamiento de un motor Stirling

Es difícil, si no imposible, construir un motor que funcione con el ciclo ideal de Stirling. Todos los motores Stirling reales se aproximan al ciclo ideal hasta cierto punto. Hay muchos principios de funcionamiento diferentes para los motores Stirling, y aquí discutimos el principio de funcionamiento de un motor Stirling para su uso en laboratorios de enseñanza, que funciona de la misma manera que el motor Stirling original.

El motor de laboratorio, esbozado en la figura 2.3, consta de un cilindro de vidrio en el que dos pistones, el pistón de trabajo y el pistón de desplazamiento, se mueven verticalmente con un cambio de fase de 90 [°]. Montado en la parte superior del cilindro está la bobina de calentamiento (calentamiento eléctrico), que mantiene la parte superior del motor a alta temperatura ( $T_H$ ). La parte inferior del cilindro está revestida por un segundo cilindro de vidrio, con agua de refrigeración fluyendo entre los dos cilindros y a través de la parte inferior del pistón de desplazamiento para mantener la parte inferior del motor a baja temperatura ( $T_L$ ). El pistón de desplazamiento desplaza el gas entre la parte superior de alta temperatura del motor y la parte inferior de baja temperatura. El movimiento del pistón de desplazamiento fuerza el gas a través de un orificio cilíndrico en el pistón de desplazamiento que está lleno de lana de cobre que actúa como regenerador. A medida que el gas pasa de la parte caliente del motor a la parte fría, el gas se enfría gradualmente al ceder calor a la lana de cobre. En el camino de regreso, el gas toma calor del regenerador y, por lo tanto, se calienta gradualmente. El pistón de trabajo sella el gas contra el medio ambiente y sirve para comprimirlo o expandirlo mientras intercambia trabajo con el medio ambiente. El ciclo termodinámico real del motor Stirling difiere algo del ciclo Stirling idealizado, ver la figura 2.3 para una comparación cualitativa del ciclo idealizado y real. Para comprender cómo el motor Stirling se aproxima al ciclo ideal, es mejor estudiar el diagrama P-V de la figura 2.3, que también muestra el

desplazamiento de los dos pistones en función del ángulo del eje, figura 2.2, (Struchtrup, 2014).

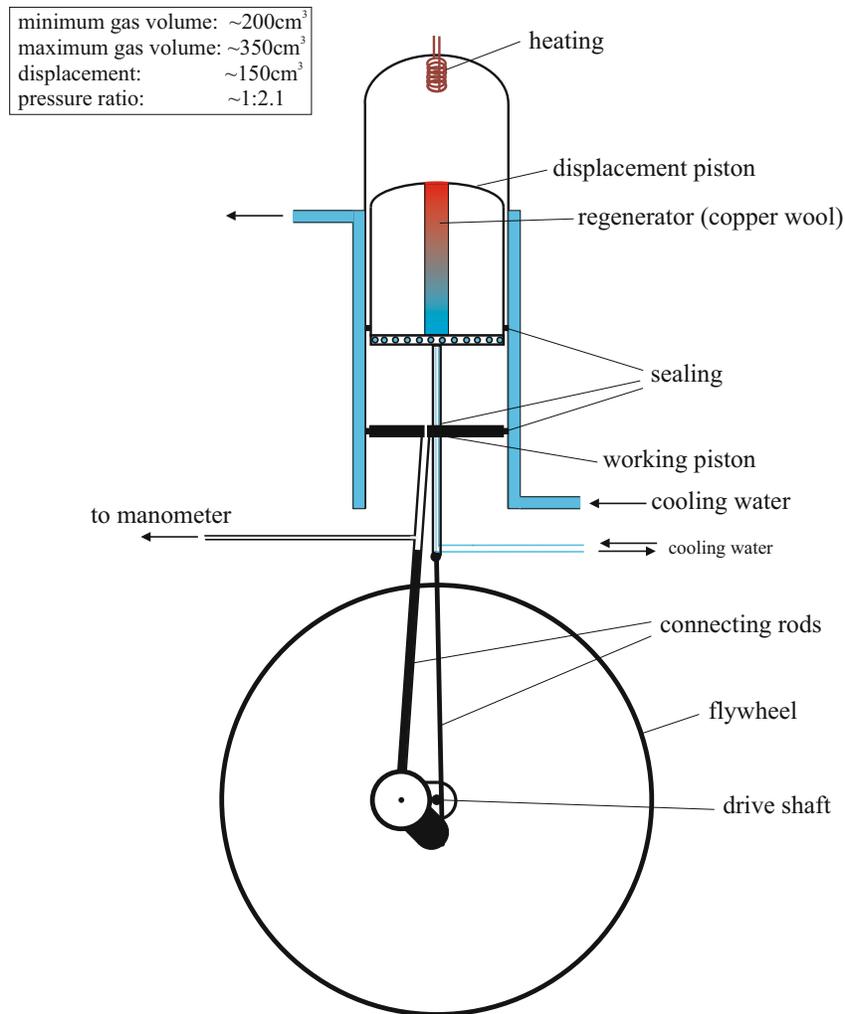


Figura 2.3: Configuración del motor Stirling (Struchtrup, 2014).

Expansión isotérmica: el pistón de desplazamiento está en el punto muerto inferior, casi en reposo, de modo que la mayor parte del gas de trabajo se encuentra en la zona caliente superior. El pistón de trabajo se mueve hacia abajo y el gas se expande, el calor suministrado se transfiere al trabajo (Demtröder, 2017).

Enfriamiento isocórico: el pistón de trabajo está en el punto muerto inferior, por lo que el volumen total de gas es fijo. El pistón de desplazamiento se mueve hacia arriba y el gas de trabajo fluye hacia la parte fría inferior del motor. Mientras fluye a través del regenerador, el gas transfiere calor al regenerador (Demtröder, 2017).

Compresión isotérmica: el pistón de desplazamiento está en el punto muerto superior y el gas de trabajo está en la parte fría inferior del cilindro. El pistón de trabajo se mueve hacia arriba com-

primiendo el gas. El gas libera calor al agua de refrigeración, de modo que la temperatura del gas permanece casi constante (Demtröder, 2017).

Calentamiento isocórico: el pistón de trabajo está en el punto muerto superior, mientras que el pistón de desplazamiento se mueve hacia abajo. El gas frío fluye hacia arriba a través del regenerador, donde recibe la energía que se almacenó en el Paso II, (Demtröder, 2017).

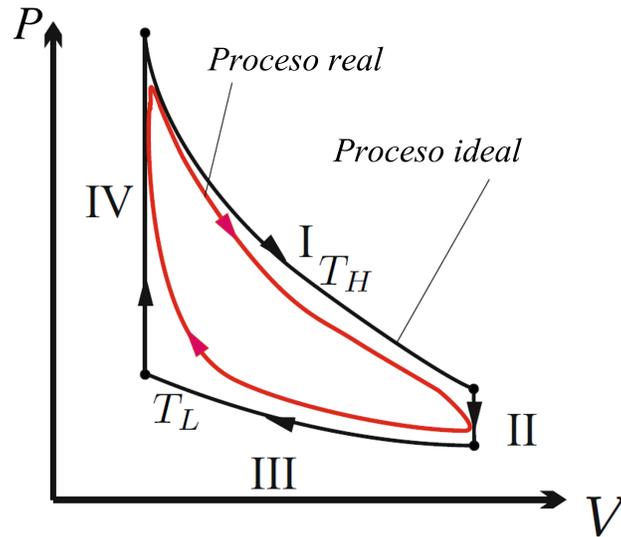


Figura 2.4: Ciclo Stirling ideal y real en un diagrama P-V Struchtrup (2014).

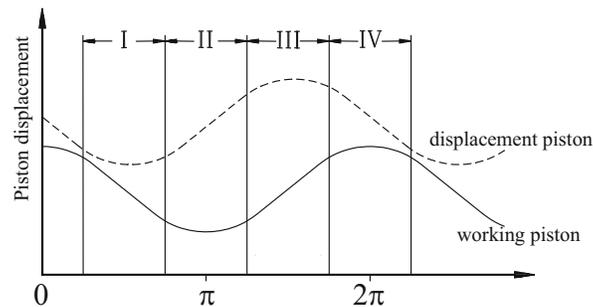


Figura 2.5: Desplazamiento del pistón en función del ángulo del eje (Struchtrup, 2014).

- Los procesos verdaderamente isocóricos requieren que el pistón de trabajo esté en reposo. Sin embargo, dado que es impulsado por un cigüeñal, el pistón de trabajo se mueve sinusoidalmente.
- La compresión y expansión (I y III) son rápidas y no tienen lugar de forma isotérmica.

- El serpentín de calentamiento libera calor en el gas en todo momento, no solo durante el paso I.
- Parte del gas de trabajo permanece en la parte fría del motor en todo momento.
- El regenerador no es 100 % eficiente.
- Las pérdidas de calor al medio ambiente y la fricción disipan energía.
- Un sellado insuficiente conduce al intercambio de gas con el exterior.

### 2.3. Regenerador propuesto y construido

Regenerador con matriz de microcanales de geometría curva circular, se compone de 2 elementos principales un disco de acero inoxidable y tubos capilares de cobre, como lo indica en (Gheith et al., 2015) el acero inoxidable es el material del regenerador que mejora el desempeño del motor Stirling, el tubo capilar se propone por su flexibilidad para modificar la trayectoria y poder evaluar diferentes composiciones.

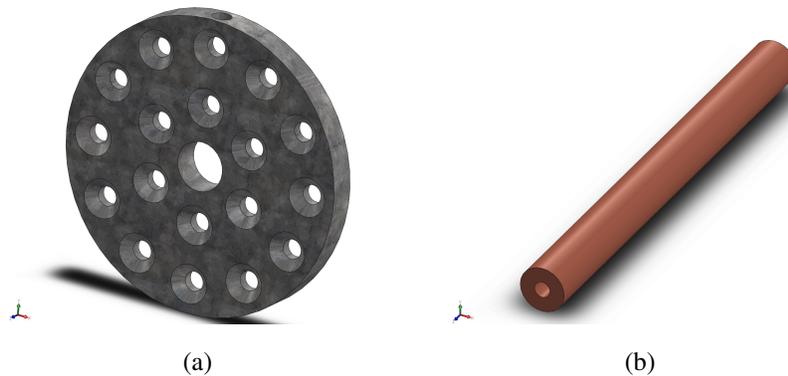


Figura 2.6: (a) Disco de acero inoxidable 304 y (b) Tubo capilar.

El principio de aplicación es modificar la trayectoria de los microcanales del regenerador para determinar el efecto en la eficiencia del motor Stirling tipo alfa, esto se logra introduciendo los tubos capilares en la matriz de microcanales del disco de acero inoxidable, el regenerador se compone de 10 discos de acero inoxidable los cuales cuentan con 18 barrenos para contener los tubos capilares de 15 [cm] de longitud, por la flexibilidad de los tubos capilares se pueden girar los discos de acero inoxidable para modificar la trayectoria de los conductos en donde el fluido de

trabajo se mueve, como se puede observar en la figura 2.7, al girar los discos de acero inoxidable la trayectoria cambia, este cambio de trayectoria generar un amento en la trasferencia de calor del fluido de trabajo con las paredes del regenerador, girando los discos para cambiar la trayectoria del los tubos capilares se puede encontrar un punto óptimo que no presente una caída de presión significativa.

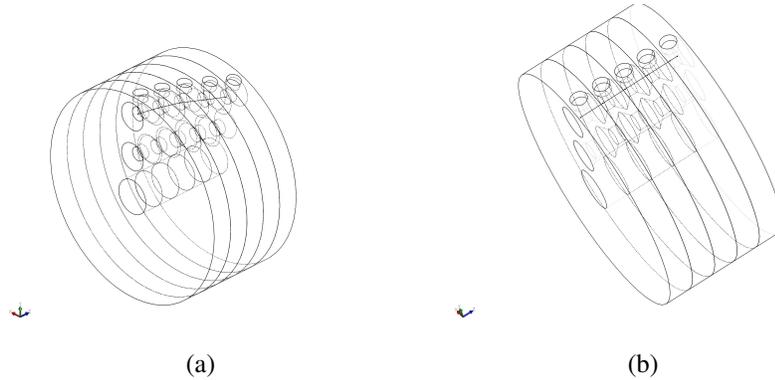


Figura 2.7: (a) Trayectoria curva del microcanal y (b) trayectoria lineal del microcanal.

Para determinar  $\dot{Q}_1$  que es un fenómeno de transferencia de calor por convección se aplica nuevamente la ley de enfriamiento de Newton, este fenómeno de transferencia determinará la cantidad de energía que se trasfiere de fluido de trabajo a la superficie.

$$\dot{Q}_1 = h_1 A (T_s - T_f) \quad (2.8)$$

Donde  $h_1$  es el coeficiente de transferencia de calor,  $A$  es el área de superficie de intercambio de calor,  $T_s$  temperatura de la superficie y  $T_f$  la temperatura del fluido de trabajo (Demtröder, 2017).

Para determinar  $\dot{Q}_2$  que es un fenómeno de transferencia de calor por conducción de calor se aplica la ley de Fourier.

$$\dot{Q}_2 = k_1 A_2 \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.9)$$

Donde  $A_2$  es el área normal de transferencia de calor,  $\Delta T$  es el diferencial de temperatura,  $\Delta x$  es la longitud de sección y  $k_1$  es la conductividad térmica del material (Demtröder, 2017).

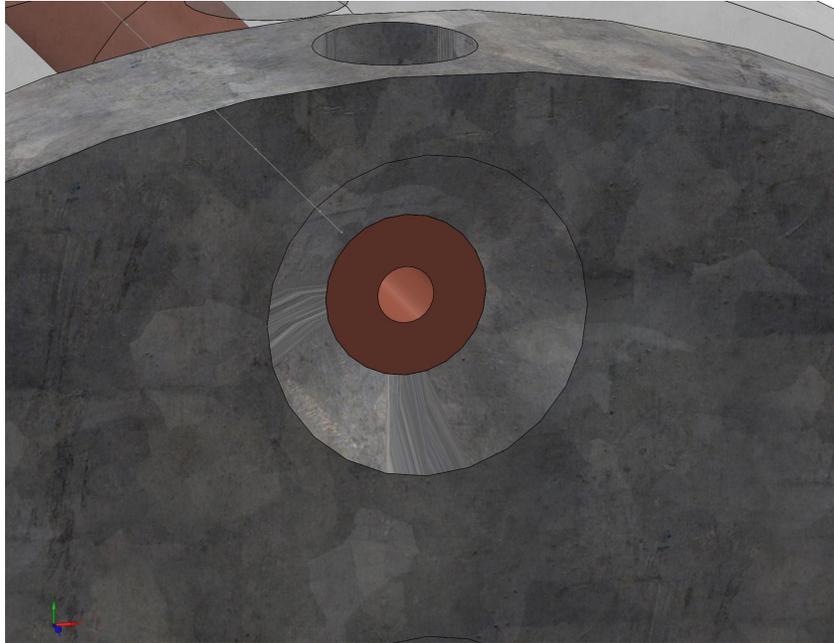


Figura 2.8: Configuración del regenerador.

## 2.4. Mecánica de fluidos

La viscosidad de los fluidos newtonianos es una verdadera propiedad termodinámica y varía con la temperatura y la presión. En un estado dado presión-temperatura existe una amplia gama de valores entre los fluidos comunes. Existe una variación de seis órdenes de magnitud desde el hidrógeno hasta la glicerina. Por tanto, habrá grandes diferencias entre los fluidos sometidos a las mismas tensiones aplicadas. En términos generales. La temperatura tiene un efecto fuerte, con el aumento de la temperatura, aumenta la viscosidad para los gases y disminuyendo para los líquidos. En la mayoría de los trabajos de ingeniería es habitual descuidar la variación de presión. Este comportamiento, llamado principio de estados correspondientes, es característico de todos los fluidos, pero los valores numéricos reales son inciertos al 20 por ciento para cualquier fluido dado. En general, las mediciones de puntos críticos son extremadamente difíciles e inciertas.

El parámetro principal que proporciona el comportamiento viscoso de todos los fluidos newtonianos es el número de Reynolds dimensional:

$$Re = \frac{\rho LV}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.10)$$

Donde  $V$  y  $L$  son escalas características de velocidad y longitud del flujo. La segunda forma de

$Re$  ilustra que la relación de  $\mu$  y  $\rho$  tiene su propio nombre, la viscosidad cinemática:

$$\nu = \frac{\rho}{\mu} \quad (2.11)$$

Generalmente, lo primero que se debe hacer es estimar el rango de números de Reynolds del flujo en estudio.  $Re$  muy baja indica un movimiento de arrastre viscoso, donde los efectos de inercia son insignificantes. Moderado  $Re$  implica un laminar que varía suavemente al fluir. Es probable que un alto  $Re$  signifique un flujo turbulento, que varía lentamente en el tiempo medio, pero que ha superpuesto fuertes fluctuaciones aleatorias de alta frecuencia. Aquí no se pueden indicar valores numéricos explícitos para números de Reynolds bajos, moderados y altos.

El parámetro principal que afecta la transición es el número de Reynolds. Si  $Re = \frac{VL}{\nu}$ , donde  $V$  es la velocidad promedio de la corriente y  $L$  es el ancho o espesor transversal de la capa de corte, se producen los siguientes rangos aproximados:

- $0 < Re < 1$ : Movimiento laminar de arrastre altamente viscoso.
- $1 < Re < 100$ : Laminar, fuerte dependencia del número de Reynolds.
- $100 < Re < 10^3$ : Teoría laminar, capa límite útil.
- $10^3 < Re < 10^4$ : Transición a la turbulencia.
- $10^4 < Re < 10^6$ : Dependencia moderada y turbulenta del número de Reynolds.
- $10^6 < Re < \infty$ : Turbulento, leve dependencia del número de Reynolds.

## 2.5. Estadística

En la referencia estadística se utilizan profusamente cantidades calculadas a partir de las observaciones de la muestra. Un estadístico se define como cualquier función de las observaciones de una muestra que no contiene parámetros desconocidos, entonces la media muestral, se define como:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.12)$$

y la varianza muestral

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (2.13)$$

Estas ecuaciones son medias de la tendencia central y la dispersión de la muestra, respectivamente, otra medida de dispersión es la desviación estándar muestral  $S = \sqrt{S^2}$ .

Frecuentemente, se usan métodos gráficos que ayudan a analizar los datos de un experimento. El diagrama de puntos es un recurso muy útil para representar un cuerpo reducido de datos. El diagrama de puntos le permite al experimentador ver inmediato, localización o tendencia central de las observaciones y su dispersión, mientras que el histograma muestra de forma general la distribución de los datos (Gutiérrez Pulido et al., 2008).

# Metodología

Diagrama de la metodología a seguir para el cumplimiento del objetivo general, en este apartado se describen los pasos que se plantean para el desarrollo del proyecto, tanto técnicas propuestas para la manufactura y fabricación del banco de pruebas como las herramientas de diseño a utilizar en el diseño conceptual y la implementación física del sistema.

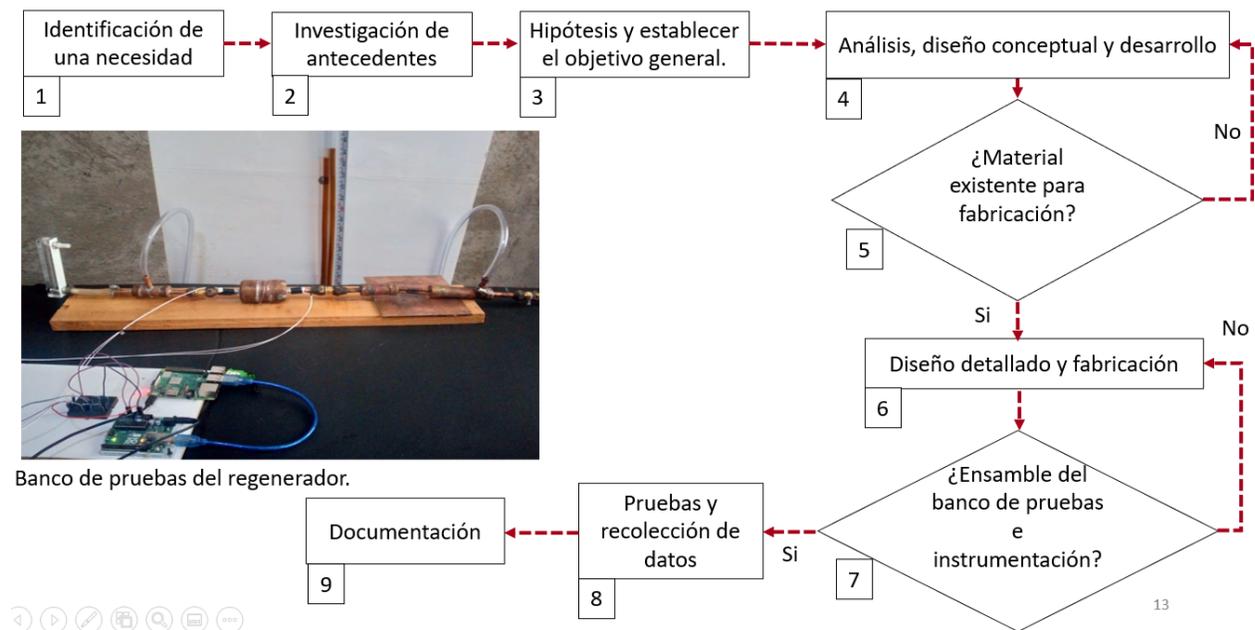


Figura 3.1: Diagrama de la metodología para el desarrollo del proyecto.

1. Primero se identifica una necesidad y un punto importante por analizar de acuerdo con una necesidad del estudio del tema de las energías renovables.

2. Se realiza la investigación correspondiente al estado del arte.
3. Se establecen los objetivos que llevarán al cumplimiento del objetivo general del proyecto para probar la hipótesis.
4. Se realiza un diseño conceptual, siguiendo los avances de las investigaciones relacionadas con el tema de estudio y el desarrollo del fundamento teórico del proyecto.
5. Se propone la implementación física del proyecto, con base en los siguientes puntos:
  - Selección de materiales para la parte mecánica del proyecto con base a las características requeridas por el sistema (mecánicas, térmicas, etc.).

Tubería de cobre de  $\frac{3}{8}[in]$  presión máxima admisible  $442.89 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$ , tubería de cobre de  $\frac{3}{4}[in]$  presión máxima admisible  $325,62 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$  y tubería de cobre de  $1\frac{1}{2}[in]$  presión máxima admisible  $263.60 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$  figura 3.2.



Figura 3.2: (a) Tubería de cobre tipo L de  $\frac{3}{8}[in]$ ,  $1\frac{1}{2}[in]$  y (b) Tubería de cobre tipo L de  $\frac{1}{4}[in]$ .

Los accesorios utilizados en el banco de pruebas son, tuercas cónicas para tubería de cobre  $\frac{3}{8}[in]$ , coples para tubería de cobre  $\frac{3}{8}[in]$ , tapones para tubería de cobre de  $\frac{3}{4}[in]$  y tapones para tubería de cobre de  $1\frac{1}{2}[in]$  figura 3.3.

Material seleccionado para el regenerador, tubería de cobre tipo L  $\frac{1}{4}[in]$ , aluminio y acero inoxidable figura 3.4.

Si las características no se encuentran de fácil adquisición, se vuelve al punto 5 y se realiza una modificación en el diseño, por ejemplo diámetros de alguna pieza, esto con el fin de reducir costos de fabricación.



Figura 3.3: Accesorios para unión mecánica de tubería de cobre tipo L  $\frac{3}{8}$  [in].



Figura 3.4: Fibra de acero inoxidable.

- Selección de los elementos necesarios para la instrumentación del sistema.  
Sensor de temperatura termistor ntc 10[k $\Omega$ ] figura 3.5.



Figura 3.5: Termistor ntc 10[k $\Omega$ ].

Raspberry tipo 3 b+ ordenadores de placa única u ordenadores de placa simple, con CPU de 64 bits Broadcom BCM2837 de cuatro núcleos a 1.2 [GHz], 1 [GB] de RAM, BCM43438 LAN inalámbrica y Bluetooth de baja energía (BLE) a bordo, Ethernet

base, GPIO extendido de 40 pines y 4 puertos USB 2 Salida estéreo de 4 polos y puerto de video compuesto, HDMI de tamaño completo, Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi, Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi, Puerto micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos y Fuente de alimentación micro USB conmutada mejorada de hasta 2.5 [A], figura 3.6.

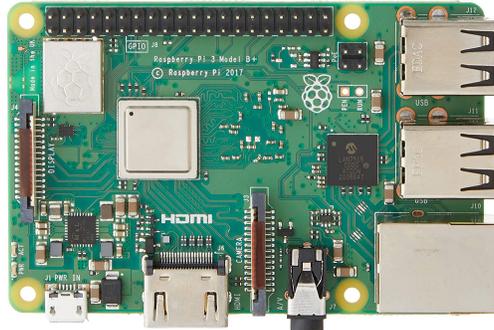


Figura 3.6: Raspberry tipo 3 b+.

Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P, tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usados con PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16 [MHz], conexión USB, conector jack de alimentación, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo. Tiene toda la electrónica necesaria para que el microcontrolador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB o con un transformador AC-DC; figura 3.7.



Figura 3.7: Arduino UNO.

La instrumentación para la medición de la presión fue una manguera de nivel transparente de  $\frac{1}{4}$  [in] para hacer el manómetro tipo U y un flujómetro de 1 a 20  $\left[\frac{l}{s}\right]$  para medir el caudal figura 3.8.

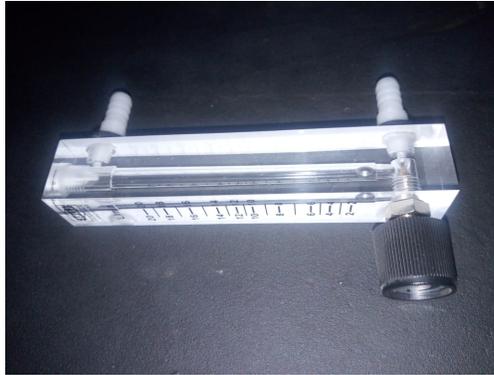


Figura 3.8: Flujómetro.

El sistema operativo para la Raspberry es Raspbian, es un sistema operativo gratuito basado en Debian optimizado para el hardware Raspberry Pi. Un sistema operativo es el conjunto de programas y utilidades básicos que hacen que su Raspberry Pi funcione. Sin embargo, Raspbian ofrece más que un sistema operativo puro: viene con más de 35,000 paquetes, software precompilado incluido en un formato agradable para una fácil instalación en su Raspberry Pi.

El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino es una aplicación multiplataforma (para Windows, macOS, Linux) que está escrita en el lenguaje de programación Java. Se utiliza para escribir y cargar programas en placas compatibles con Arduino, el código fuente para el IDE, se publica bajo la Licencia Pública General de GNU, El IDE de Arduino admite los lenguajes C y C ++ utilizando reglas especiales de estructuración de códigos, emplea el programa AVRDUDE para convertir el código ejecutable en un archivo de texto en codificación hexadecimal que se carga en la placa Arduino mediante un programa de carga en el firmware de la placa, que se utilizó para la programación de la tarjeta Arduino, la cual tiene la función de interpretar las lecturas del sensor de temperatura.

Python, un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta parcialmente la orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, dinámico y multiplataforma, se utilizó en el guardado de los datos en formato TXT.

VNC es un programa de software libre basado en una estructura cliente-servidor que

permite observar las acciones del ordenador servidor remotamente a través de un ordenador cliente. VNC no impone restricciones en el sistema operativo del ordenador servidor con respecto al del cliente, es posible compartir la pantalla de una máquina con cualquier sistema operativo que admita VNC conectándose desde otro ordenador o dispositivo que disponga de un cliente VNC portado, utilizado para el monitoreo remoto de la Raspberry ubicada en el banco de pruebas.

- Planeación de los métodos de ensamble y fabricación, en los métodos de ensamble se contemplan las formas de sujeción por mecánica, soldadura fuerte con porcentaje de plata y soldadura con estaño, también se contempla la fabricación de piezas por moldeo, los procesos mencionados se realizarán conforme a los lineamientos de seguridad presentados más adelante en la sección 3.1 de este capítulo.

Para la unión de los elementos con soldadura de estaño se necesitó, un soplete, fundente para soldadura de estaño y la soldadura de estaño que se funde a una temperatura aproximada de  $216 [^{\circ}\text{C}]$ , figura 3.9.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9: (a) Soplete de mano, (b) soldadura de estaño y (c) pasta para soldadura de estaño.

La soldadura de estaño se aplicó en la mayor parte del banco de pruebas, como se muestra en la figura 3.10.



(a)



(b)

Figura 3.10: (a) Conexión del manómetro tubo en U y (b) regenerador de estopa.

Para la unión de los elementos con soldadura fuerte con plata se necesitó, fúndete de soldadura de la marca Harris, la soldadura de 15 % plata tiene una temperatura de fundición 600 [°C] y un soplete, figura 3.11.



(a)



(b)

Figura 3.11: (a) Soldadura de 15 % plata y (b) fúndete de soldadura Harris.

La soldadura fuerte se aplicó en la unión del intercambiador de calor debido a que está expuesto a altas temperaturas y solo la unión con soldadura con porcentaje de 15 % plata, esta soldadura soporta estar sometida a temperaturas no mayores a 600 [°C], figura 3.12

6. Se desarrollan los planos para la fabricación de las piezas del sistema mecánico, se procede



Figura 3.12: Unión con soldadura de 15 % plata.

a la fabricación de las mismas, también se desarrollan los planos para el ensamble de los elementos que componen al banco de pruebas.

Se emplea el método de fabricación por molde de aluminio para la construcción del regenerador de trayectoria ajustable, para realizar el proceso de fabricación por molde se realiza el procedimiento descrito en los pasos siguientes.

- a) Se diseñaron las piezas a fabricar en un software de diseño mecánico, como se muestra en la figura 3.13, el formato en el cual se exportan los archivos 3D para impresión es en formato STL.

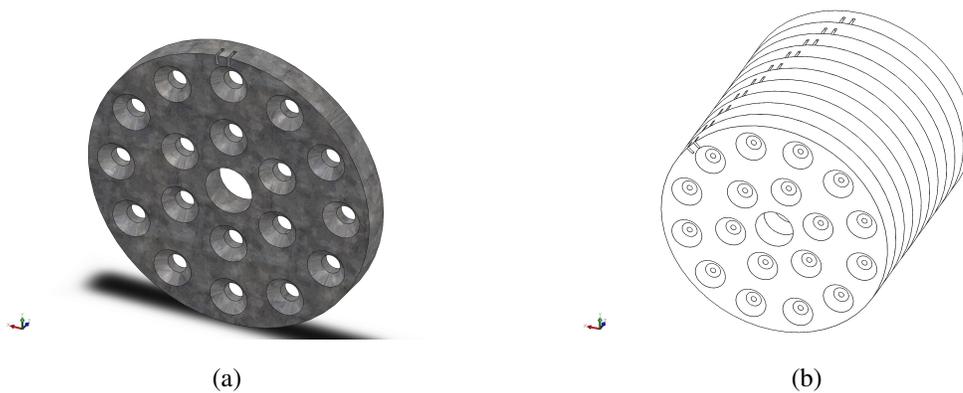


Figura 3.13: (a) Pieza mecánica a fabricar y (b) 3D del ensamble del regenerador.

b) Para configurar la impresión se utilizó creality slicer 1.2.3. El software slicer se emplea en la impresión 3D para modelos 3D en capas y dibujar una ruta de impresión que la máquina puede seguir. Creality slicer es la impresora patentada de creality, que también produce muchas impresoras 3D populares como la serie Ender 3, creality slicer se basa en una versión obsoleta de Cura (versión 1.2.3), que luego se modificó para hacer su propio software, en la figura 3.14 se puede observar el archivo STL y una matriz de piezas en el software slicer para guardar e imprimir.

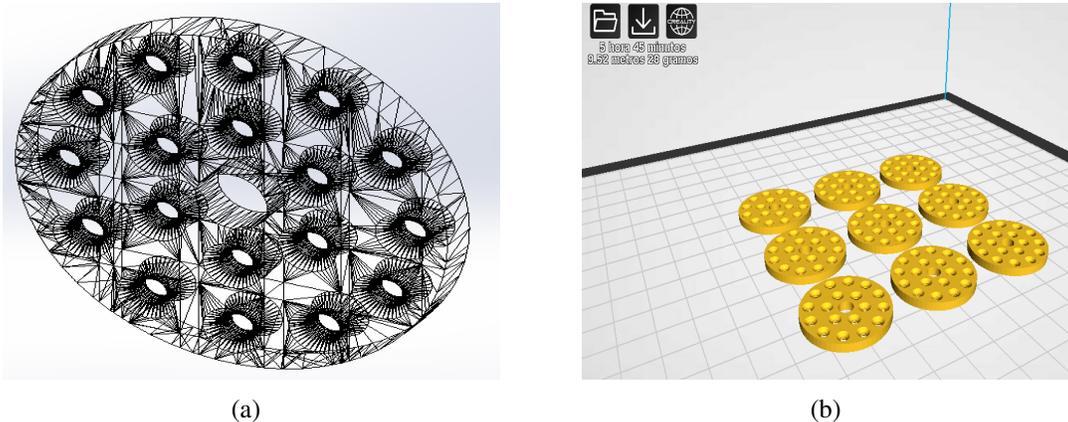


Figura 3.14: (a) Pieza en formato STL y (b) matriz de piezas 3D en el software slicer.

c) Para realizar la impresión se utilizó la impresora Creality Ender-3 figura 3.15, es una impresora 3D de código abierto que presenta las siguientes características.

- Tecnología de modelado: FDM.
- Tamaño de impresión:  $220 \times 220 \times 250 [mm]$
- Tamaño de la máquina:  $440 \times 440 \times 465 [mm]$
- Velocidad de impresión:  $180 \left[ \frac{mm}{s} \right]$ .
- Material Filamento:  $1.75 [mm]$  PLA, TPU, ABS.
- Modo de trabajo: PC /Tarjeta SD.
- Formato de archivo: STL, OBJ, código G.
- Peso neto:  $8 [Kg]$ .
- Fuente de alimentación:  $100-265 [V]$   $50-60 [Hz]$ .
- Voltaje de salida:  $24 [V]$   $15 [A]$ .
- Espesor de la capa:  $0.1-0.4 [mm]$ .
- Diámetro de la boquilla:  $0.4 [mm]$ .

- Precisión de impresión:  $\pm 0.1$  [mm].
- Toberas de temperatura:  $255$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- La temperatura de plataforma:  $110$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].



Figura 3.15: Impresora Creality modelo Ender-3.

El resultado de la impresión fue la que se muestra en la figura 3.16, se utilizó de material para impresión PLA 3.16 y con un 20 % de relleno en las piezas, es importante mencionar que para el desarrollo de las de fabricación por método de molde las piezas impresas son utilizadas para hacer un molde, por lo cual el porcentaje de relleno en las características de impresión es importante considerar un bajo porcentaje.

- d) La preparación de las piezas impresas para realizar el molde tiene como objetivo buscar la forma adecuada para que fluya el aluminio dentro del molde, de lo contrario se corre el riesgo de una mala fabricación con piezas altamente defectuosas, en la figura 3.17 varias piezas se unieron a una varilla de impresión esto para formar las piezas al mismo tiempo, se utilizó pegamento para pegar cada pieza y armar la matriz, la parte circular central y su ramificación mostradas en la figura 3.17 son ductos por los cuales se vacía y fluye el metal fundido para formar las piezas en cada extremo, es importante recalcar la inclinación y separación de las piezas es con el fin de evitar cavitación al momento de verter el metal fundido.



(a)



(b)

Figura 3.16: Piezas impresas en PLA.

Nota: es importante que el material de los ductos para que fluya el metal fundido sea de impresión 3D con bajo porcentaje de relleno o en su defecto de un material que se desintegre a 200 [°C].



Figura 3.17: Matriz para molde de varias piezas.

- e) El molde donde se vierte el metal fundido está compuesto de un cerámico especial que soporta altas temperaturas sin sufrir deformaciones, este tipo de cerámico es muy parecido al yeso, la otra parte del molde es una carcasa de metal la cual le da un soporte para maniobrar el molde, en la figura 3.18 se muestra el cerámico utilizado que es de la marca Prestige Sigma y en la figura 3.18b se muestran las carcasas de acero, para el molde.



(a)



(b)

Figura 3.18: (a) Material cerámico Prestige Sigma y (b) carcasas de acero.

La preparación del molde requiere medir las cantidades de cerámico con una báscula y la cantidad de agua a utilizar, esto para hacer una mezcla útil, los porcentajes de las cantidades del cerámico y agua vienen dados por el fabricante del cerámico, con un 60 % de cerámico y un 40 % agua, figura 3.19.



Figura 3.19: Pesaje del material cerámico y agua.

Una vez mezclados los componentes del molde, se vierten en la carcasa de acero y se espera hasta que estén sólidos, es importante que se mencione que se requiere una tapa del molde por donde se introduce el metal fundido y también por donde deja escapar el aire del molde para no generar cavitación, figura 3.20.



Figura 3.20: (a) Molde de cerámico y (b) tapa del molde.

La parte oscura de la figura 3.20 (a), es la matriz de piezas de la figura 3.17, para seguir con el siguiente proceso se debe dejar secar el cerámico 24 [hr], de lo contrario se puede producir fracturas en el molde.

- f) Eliminar la matriz de piezas de la figura 3.17 del molde, para quitar la impresión del interior del molde se requiere calentar todo el molde a 450 [°C], este proceso se hace gradual mente y lentamente, primero se mantiene el molde a 200 [°C] todo el molde durante 20 minutos y después poco a poco se aumenta la temperatura por 40 minutos hasta alcanzar una temperatura de 450 [°C] y se mantiene esa temperatura por 20 minutos, se hizo un horno de tabiques para realizar este proceso como se muestra en la figura 3.21.

Con este proceso se logra eliminar la impresión 3D del interior del molde cerámico y está listo para vaciar el metal fundido, la temperatura y el tiempo que tarda este proceso en evaporar la impresión depende de las características de la pieza, las dimensiones y como se había mencionado el porcentaje de relleno de las piezas impresas es fundamental para una buena eliminación del molde.

- g) En la fundición del aluminio se utilizó un recipiente de crisol con las siguientes características, es un aparato que normalmente está hecho de grafito con cierto contenido



Figura 3.21: Proceso para eliminar la impresión dentro del molde.

de arcilla y que puede soportar elementos a altas temperaturas, ya sea el oro derretido o cualquier otro metal, normalmente a más de 500 [°C]. Algunos crisoles aguantan temperaturas que superan los 1500 [°C], figura 3.22.



Figura 3.22: Recipiente de crisol para el proceso de fundición.

Para el proceso de fundición se vierten dentro del recipiente de crisol barras de aluminio y se pone a fuego alto dentro de un horno, no importa que la flama del horno de gas

seco golpee el recipiente crisol directamente, ya que a este no le provoca ningún daño, figura 3.23.



Figura 3.23: Proceso de fundición de aluminio.

Como se puede ver en la figura 3.23, el recipiente de crisol está dentro de un horno, este horno es de cemento, una vez que el aluminio es fundido se procede a tomar la temperatura del la superficie del aluminio para asegurar que se encuentra a una temperatura mayor a los 750 [°C], para la medición de la temperatura se usa un Termómetro Digital Infrarrojo, figura 3.24.



Figura 3.24: Termómetro Digital Infrarrojo.

El Proceso de fundición dura aproximadamente 40 minutos, para esto se requiere que en el diseño del horno se tenga la menor fuga de energía en forma de calor.

- h)* Como se puede ver en la figura 3.25, se vierte aluminio fundido en el molde cerámico y después solo se tiene que esperar a enfriar para retirar la pieza de aluminio formada dentro del molde.



Figura 3.25: Vertido del aluminio dentro del molde.

- i)* En la figura 3.26, se muestra como quedaron las piezas en aluminio, después se procede a cortar cada una de las piezas de la matriz de aluminio, para dejarlas listas para el ensamble.
7. Se realiza la integración de los elementos mecánicos y de instrumentación del banco de pruebas, se hace énfasis en los elementos de instrumentación.
- Se realiza conexión de los elementos electrónicos para hacer la recopilación de los datos del sistema, en la figura 3.27, se puede observar la configuración de los elementos para la recopilación de datos.
  - El prototipo se instrumenta para la medición de las siguientes variables: temperatura, presión y el caudal del fluido, las variables a analizar están indicadas en la figura 3.28 y también se muestra cada uno de los elementos que compone el banco de pruebas.



Figura 3.26: Piezas de aluminio.

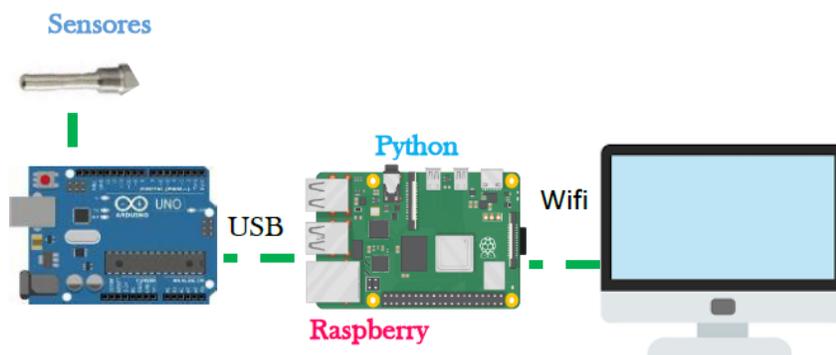


Figura 3.27: Conexión de los elementos electrónicos.

Se colocaron 2 termistores, los cuales tienen como función medir la temperatura en la entrada y en la salida del regenerador, figura 3.28a.

Se realiza la medición de la caída de presión con un manómetro de tubo en U, como se muestra en la figura 3.28, estos tubos están conectados al igual que los sensores de temperatura, uno antes del regenerador y uno después del regenerador para medir la caída de presión por columna de agua con el manómetro diferencial.

Se colocó un medidor de flujo a la salida de la tubería del banco de pruebas con el fin de medir los litros de aire por minuto que fluyen por el sistema de la figura 3.28, ajustando el flujo al flujo de diseño para la realización de los experimentos.

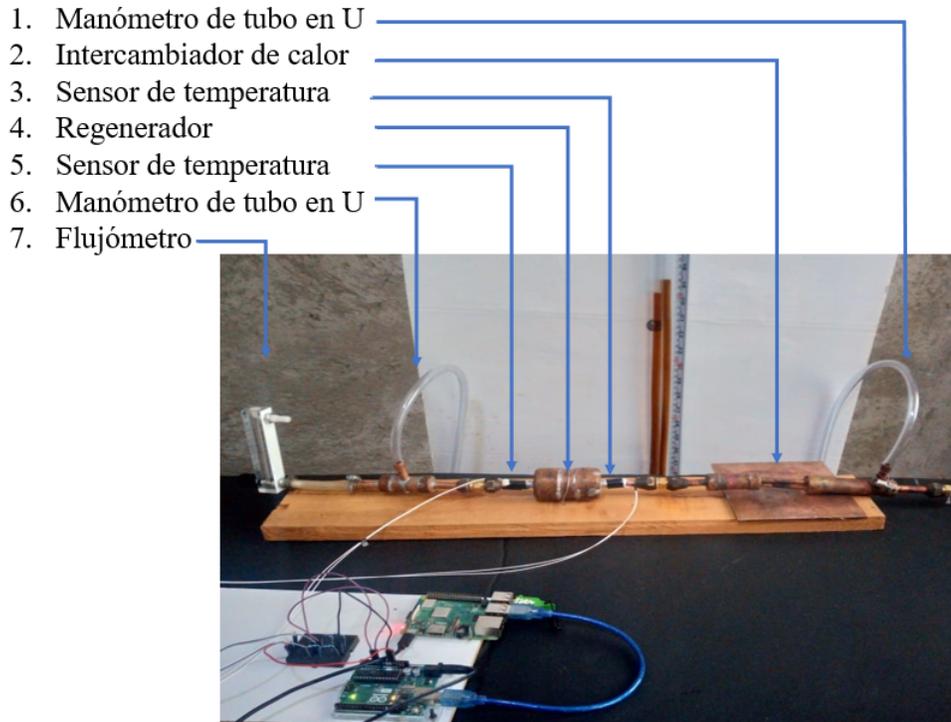


Figura 3.28: Instrumentación del banco de pruebas.

Para registro de las mediciones se utilizó una Raspberry PI 3 figura 3.28, para la cual se le incluyó el sistema operativo Raspbian, con este sistema operativo se pueden ejecutar Python que es un lenguaje de programación interpretado.

8. Se hacen las pruebas correspondientes para la recopilación de datos generados por la instrumentación mencionada anteriormente y se analizan los datos.

Para calentar el intercambiador de calor se utilizó el soplete mostrado en la figura 3.9a, se expuso el intercambiador a la flama del soplete hasta alcanzar una temperatura de  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la cual se mide con el termómetro mostrado en la figura 3.24.

Para el suministro de aire a la entrada del sistema se utilizó un compresor el que se muestra en la figura 3.29.

Como se muestra en la figura 3.30 con el manómetro de tubo en U se mide la caída de presión entre la entrada y la salida del regenerador y se ha colocado en el banco de pruebas una cinta métrica con la cual se puede hacer la medición de la caída de presión, figura 3.30.

Las mediciones se realizaron con un flujo de aire constante lo cual se logró manteniendo la

válvula del compresor abierta a cierta capacidad, también se mantuvo una transferencia de calor constante con la regulación de la flama del soplete tanto la cantidad de apertura de su regulador como la distancia y la posición de la flama con respecto al regenerador.

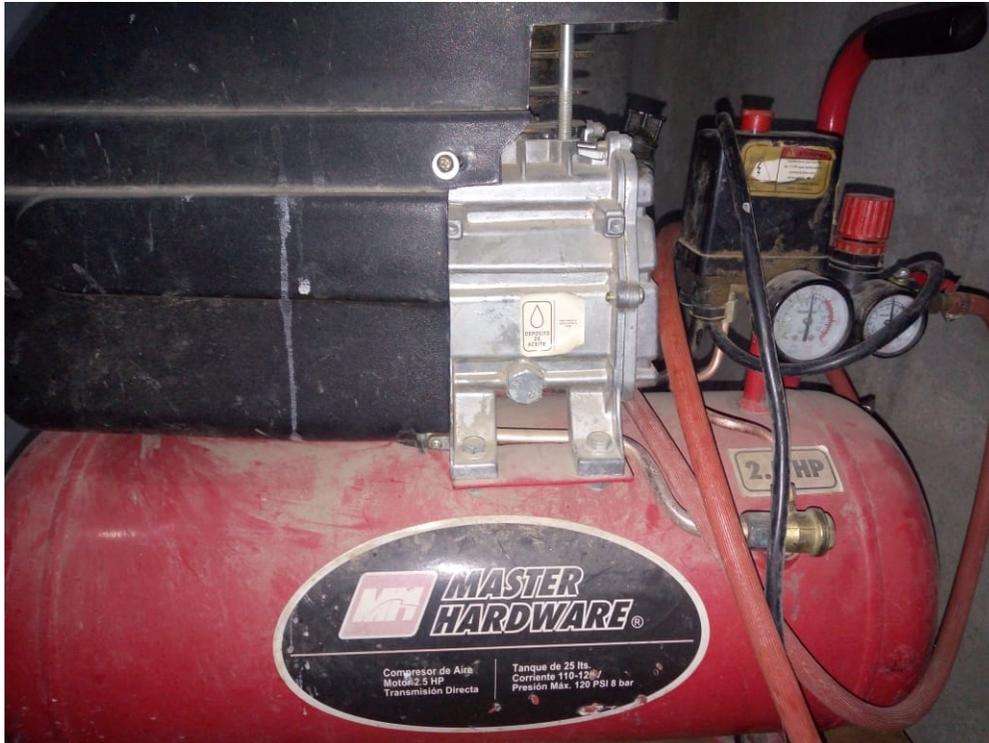


Figura 3.29: Compresor.

9. Durante todo el proyecto se hace una documentación del desarrollo del proyecto, en este punto se hace una documentación formal y completa del proyecto, para presentar como evidencia. Con el desarrollo del proyecto y la documentación del mismo se obtuvieron los siguientes productos:

- Banco de pruebas para regenerador de motor Stirling.
- Participación en congreso.
- Propuesta de regenerador para motor Stirling de trayectoria ajustable.
- Propuesta de patente del regenerador para motor Stirling de trayectoria ajustable.

Los productos obtenidos durante la investigación se desglosarán en el capítulo 4 del presente trabajo.



Figura 3.30: Manómetro de tubo en U.

### **3.1. Lineamientos de seguridad de los procesos de manufactura**

En esta sección se describen las condiciones de seguridad y los sistemas de protección y dispositivos para prevenir y proteger a los trabajadores contra los riesgos de trabajo que genere la operación y equipo de manufactura.

Norma oficial mexicana NOM-027-STPS-2008 (NOM-027-STPS-2008, N.d.).

#### **1. El análisis de riesgos potenciales debe contener al menos lo siguiente:**

- La identificación de los procesos y áreas de trabajo en donde se lleven a cabo las actividades de soldadura o corte.

- La relación de los equipos, material base, materiales de aporte y gases combustibles que se emplean para soldar o cortar.
- La determinación de las condiciones peligrosas, incluyendo las emergencias que se puedan presentar en el equipo o maquinaria que se utilice (ejemplo: fuga de gases comprimidos en el procedimiento de soldadura y corte).
- La determinación de los agentes químicos y físicos que se produzcan y que generen contaminación en el medio ambiente laboral.
- El tipo de riesgo al que se enfrentan los trabajadores (directo o indirecto) y el tiempo de exposición.
- Un listado de los daños a la salud que incluya la relación causa-efecto por la exposición a humos, vapores, radiaciones no ionizantes (infrarroja, ultravioleta y la luz brillante, entre otras), ruido, descargas eléctricas, cambios bruscos de temperatura, explosiones o atmósferas no respirables.
- La identificación de las partes del cuerpo que requieren protección para evitar daños a la salud de los soldadores o cortadores.
- Los medios de control para minimizar o eliminar el riesgo en:
  1. El trabajador (equipo de protección personal que se requiere para controlar la exposición de los soldadores).
  2. Las áreas de trabajo (ventilación natural o artificial, por ejemplo, extractores de aire), la protección que se requiere para evitar daños a terceros, para controlar los conatos de incendio que puedan presentarse o para controlar la presencia de agentes químicos, entre otros.
  3. En caso de accidente, el listado del contenido mínimo del botiquín de primeros auxilios. En caso de requerirse, los equipos y materiales para aplicar los procedimientos de rescate en alturas, subterráneos o espacios confinados.

## **2. Condiciones de seguridad e higiene durante las actividades de soldadura y corte:**

- Contar con casetas de soldar o con mamparas para delimitar las áreas en donde se realicen actividades de soldadura o corte.

- Utilizar, al menos, el siguiente equipo de protección personal conforme al proceso de soldadura o corte que se emplee: caretas o lentes de protección, protección facial, capuchas (monjas), respirador para humos, peto (mandil), guantes para soldador, polainas, mangas y zapatos de seguridad.
- Revisar que los equipos y elementos de seguridad acoplados a los cilindros que contengan gases combustibles estén en condiciones de funcionamiento. Los resultados de la revisión se deben registrar en una bitácora donde se precise el número de serie, lote, marca y modelo de los equipos y elementos de acoplamiento, así como el estado que presentan en lo que se refiere a su hermeticidad y limpieza (libre de grasa).

### **3. En el equipo y maquinaria, según aplique:**

- Verificar que las conexiones de mangueras no presenten fugas, los conectores no presenten corrosión y estén acoplados herméticamente.
- Verificar que las conexiones eléctricas mantengan la continuidad, no presenten daños mecánicos en sus aislamientos y se encuentren en condiciones de uso.
- Verificar que el equipo o maquinaria esté conectado al sistema de puesta a tierra general.
- Verificar que el voltaje de la línea de alimentación corresponda al requerido por la máquina de soldar.
- Verificar que el equipo que utiliza gases combustibles no presente fugas.

Norma oficial mexicana NOM-004-STPS-1999 (NOM-004-STPS-1999, N.d.).

### **4. Programa Específico de Seguridad para la Operación.**

- Operación de la maquinaria y equipo. El programa debe contener procedimientos para que:
  1. Los protectores y dispositivos de seguridad se instalen en el lugar requerido y se utilicen durante la operación.
  2. Se mantenga limpia y ordenada el área de trabajo.
  3. La maquinaria y equipo estén ajustados para prevenir un riesgo.
  4. Las conexiones de la maquinaria y equipo y sus contactos eléctricos estén protegidos y no sean un factor de riesgo.
  5. El cambio y uso de la herramienta y el herramental se realice en forma segura.
  6. El desarrollo de las actividades de operación se efectúe en forma segura.

## Resultados de la investigación

### 4.1. Resultados de la investigación

Resultados del banco de pruebas del motor Stirling se muestra en las tres siguientes gráficas figura 4.1, 4.2 y 4.3.

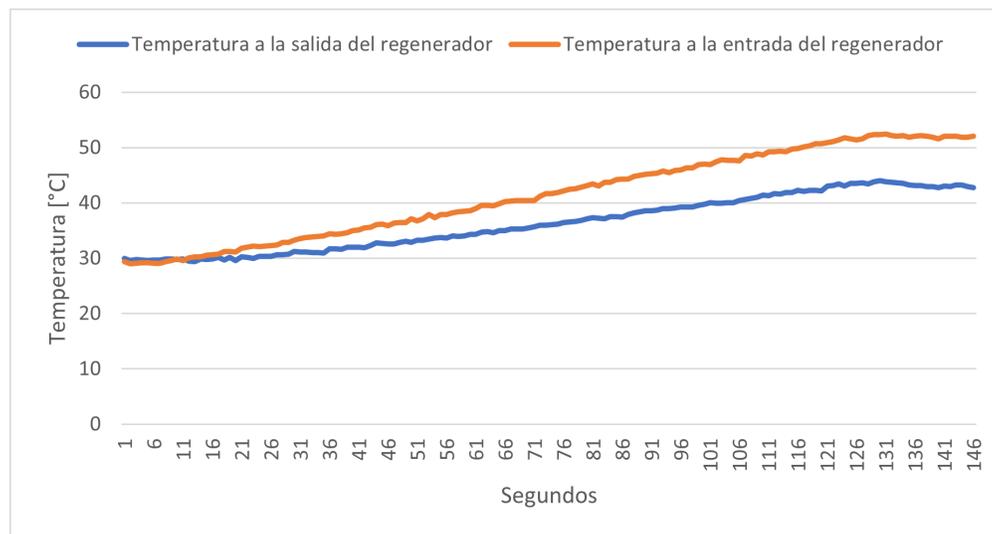


Figura 4.1: Gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador, Prueba 1.

Los resultados de las gráficas mostrados son con respecto a un prototipo de regenerador de malla de acero inoxidable, con las características del Cuadro 4.1, las características son consideradas respecto a las investigaciones previas mencionadas en este trabajo, el acero inoxidable es el material que mejor se comporta como el material de estopa metálica interna para el regenerador de motor Stirling.

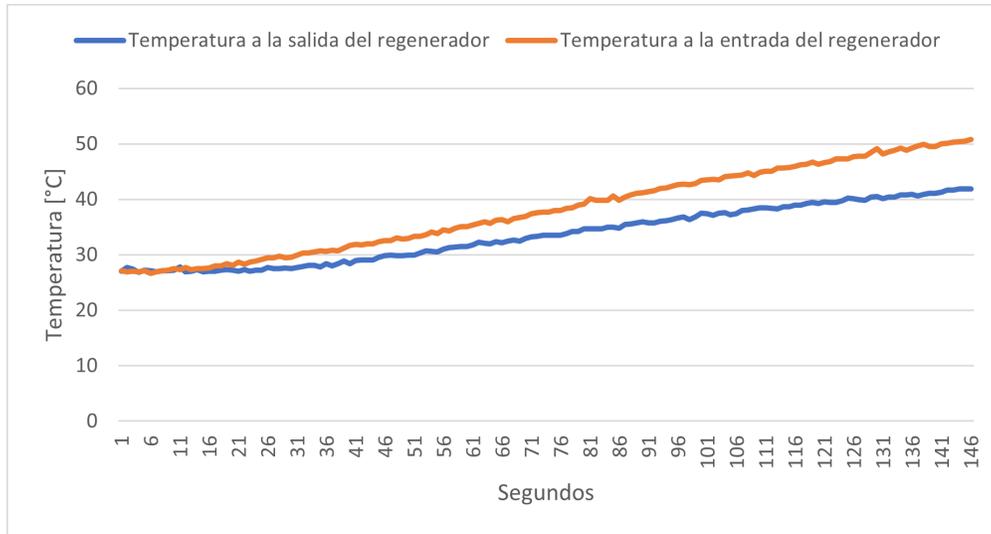


Figura 4.2: Gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador, Prueba 2.

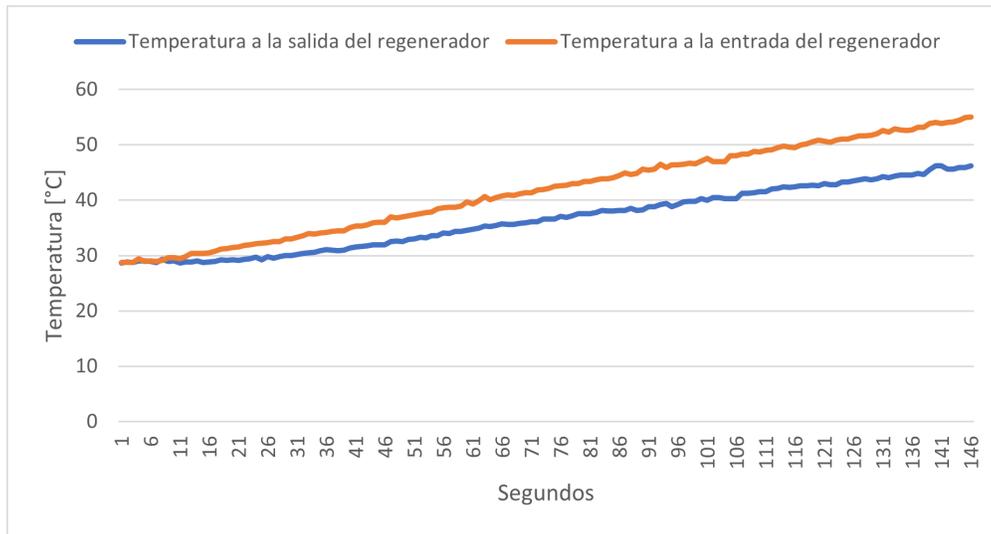


Figura 4.3: Gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador, Prueba 3.

En la figura de la gráfica 4.4 se muestran la diferencial de temperatura en la entrada y salida del regenerador de las pruebas 4.1, 4.2 y 4.3, como se puede observar hay una gran proximidad entre los resultados de los datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas con el regenerador para motor Stirling de malla de alambre de acero inoxidable, en las pruebas realizadas el flujo de aire fue de  $14 \left[ \frac{l}{min} \right]$ .

Se realizó un estudio de la significancia estadística aplicada a un rango de valor de la diferen-

Cuadro 4.1: Características del regenerador de malla.

Elementos	Características			
	Piezas	Material	Peso [gr]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
Regenerador	carcasa	cobre	87	75.53
	malla	acero inoxidable	48	

cia de temperatura entre la temperatura de salida y entrada del regenerador como se muestra en la figura 4.4, los datos del rango de valores de las tres pruebas se puede ver en la tabla 4.2.

Como se indica en (Gutiérrez Pulido et al., 2008), El valor de  $p$  ( $p$  – value) tiene relación con la fiabilidad del estudio, cuyo resultado será más fiable cuanto menor sea la  $p$ , en realidad, el valor de  $p$  nos indicaría la probabilidad de obtener un valor semejante si se realiza el experimento en las mismas condiciones, pero hay muchos factores que pueden intervenir además del hecho de que exista o no diferencia real: el tamaño de la muestra, la varianza de la variable medida, el tamaño del efecto, la distribución de probabilidad empleada, en las siguientes gráficas se presenta un análisis de una muestra de valores de las pruebas mencionadas anteriormente, en este análisis con el programa Minitab 18 se determinó el valor de ( $p$  – value) con la cual se puede dar soporte a la repetibilidad de los datos obtenidos en las pruebas y también se muestra las gráficas de histograma de residuos, residuos vs ajustes, residuos vs orden y distribución normal.

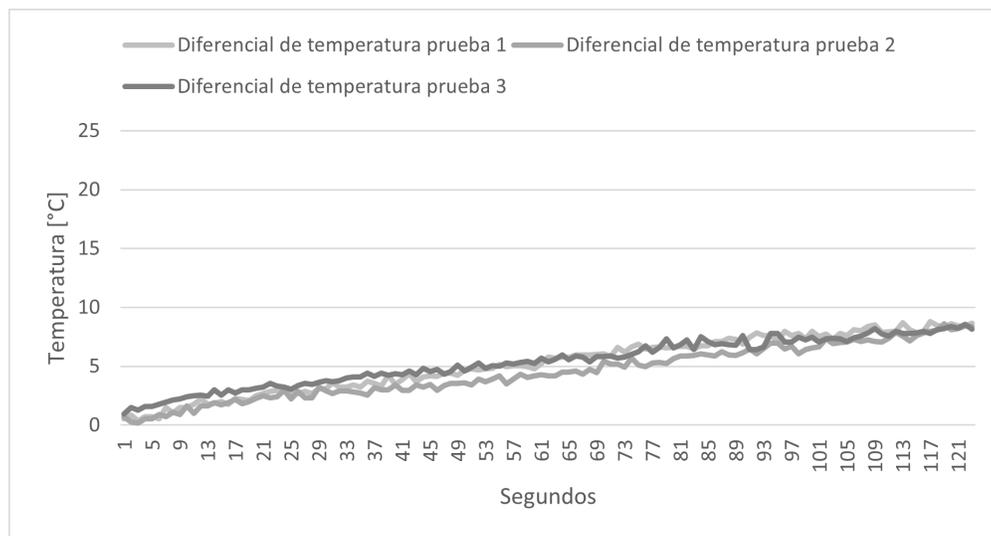


Figura 4.4: La diferencial de temperatura en la entrada y salida del regenerador de las pruebas 4.1, 4.2 y 4.3.

Del Histograma mostrado en la figura 4.5 se puede observar que la mayor cantidad de da-

Cuadro 4.2: Tabla del diferencial de temperatura de las pruebas de las figuras 4.1, 4.2 y 4.3

No.	Diferencial de temperatura [°C].		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	7.11	7.03	7.77
2	7.11	7.07	7.77
3	7.40	7.31	7.06
4	7.31	7.11	7.06
5	6.87	7.26	7.46
6	7.48	7.11	7.22
7	7.85	7.04	7.48
8	7.62	7.39	7.06
9	7.62	7.88	7.32
10	7.17	7.56	7.36
11	7.96	7.13	7.34
12	7.61	7.62	7.10
13	7.79	7.85	7.41
14	7.33	7.96	7.54
15	7.95	7.80	7.82
16	7.51	7.84	8.21
17	7.76	7.99	7.73
18	7.29	7.77	7.58

tos se encuentra en el centro de la gráfica, se puede deducir de esta que se puede mantener una temperatura con incremento constante en un cierto periodo, aplicable y repetible.

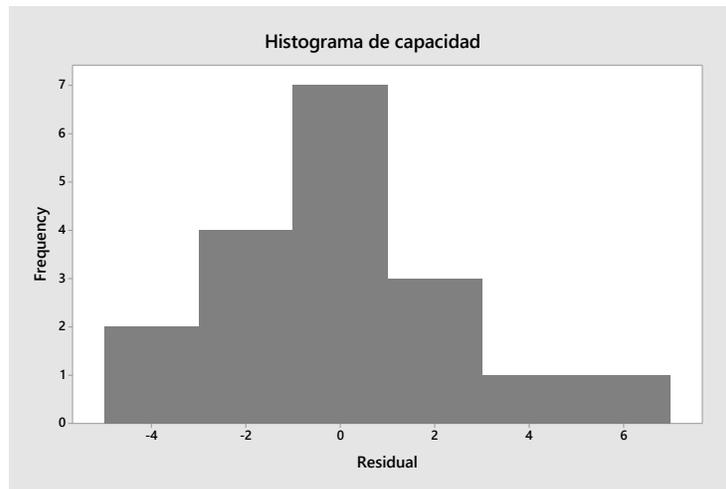


Figura 4.5: Histograma para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18.

De la gráfica de la figura 4.6 de residuos vs ajustes se puede observar que no hay valores atípicos o concertaciones en solo un rango de intervalo, mostrando una distribución no definida, si hubiera puntos influyentes o varios puntos atípicos en diferentes regiones de la gráfica se podría suponer un error en la medición o error en el ingreso de los datos.

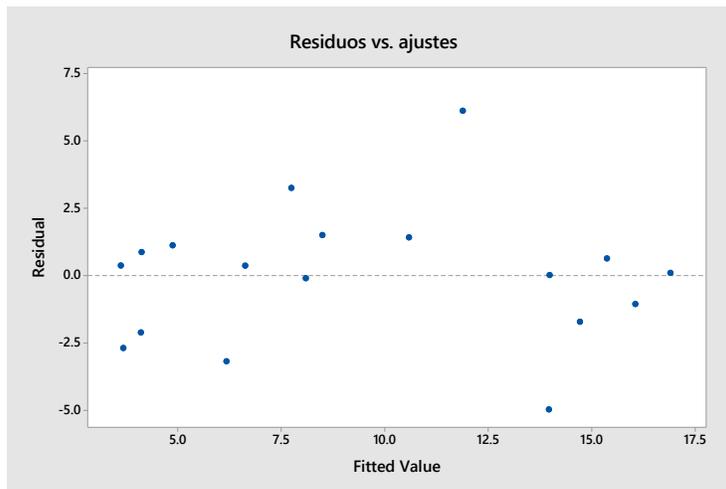


Figura 4.6: Residuos vs ajustes para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18.

En la gráfica mostrada en la figura 4.7 residuos vs orden, este tipo de gráficas se utiliza para determinar que los valores de los datos de muestreo son independientes o se ven afectados por

algún fenómeno, si hay diversos puntos cercanos esto podría indicar que hay una correlación entre sí, otros fenómenos en los datos evaluados son las tendencias, turnos y ciclos.

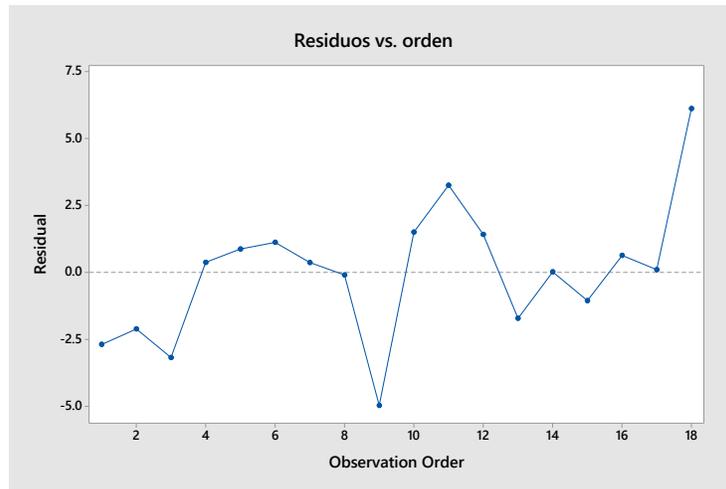


Figura 4.7: Residuos vs orden para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18.

En la gráfica mostrada en la figura 4.8 de probabilidad normal es otra interpretación de la distribución de datos y valores atípicos, como se puede observar hay un valor atípico en la gráfica, este valor se interpreta en el histograma con una cola más larga de la gráfica del lado derecho, pero por ser solo un valor atípico no es de gran relevancia.

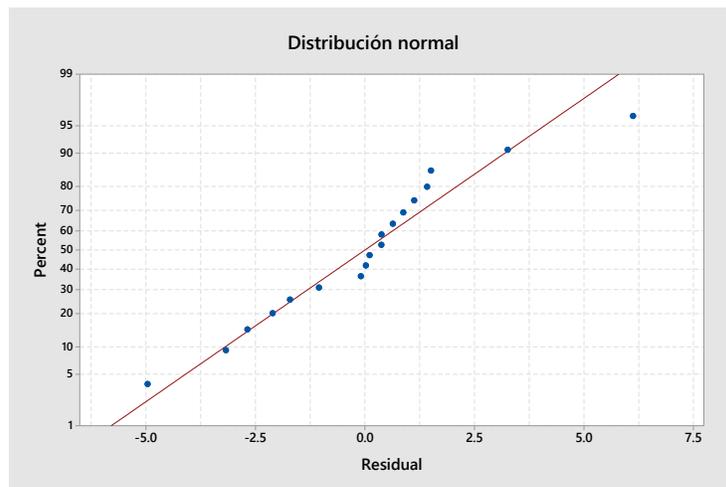


Figura 4.8: La gráfica de probabilidad normal para el rango de datos Tabla 4.2, programa Minitab 18.

Valores obtenidos en el programa Minitab del rango de datos de la tabla 4.2, se muestra en

figura 4.9 los resultados de análisis de ( $p - value$ ) valores menores a 0.05 por lo cual se puede interpretar que el proceso es repetible con una alta tasa de incidencia, ver figura 4.9.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	379.04	126.346	16.77	0.0001
Diferencial de temperatura P1	1	35.68	35.683	4.74	0.0471
Diferencial de temperatura P2	1	201.57	201.574	26.76	0.0001
Diferencial de temperatura P3	1	10.67	10.673	1.42	0.2537
Error	14	105.46	7.533		
Total	17	484.50			

Figura 4.9: Resultados en el programa Minitab del análisis de ( $p - value$ ) para el rango de datos Tabla 4.2.

## 4.2. Simulación térmica de regenerador propuesto con microcanal de trayectoria curva

Se realizó una simulación de un regenerador con microcanal de trayectoria curva, comparado con un regenerador conocido de trayectoria lineal, los resultados se muestran en la figura 4.10(d).

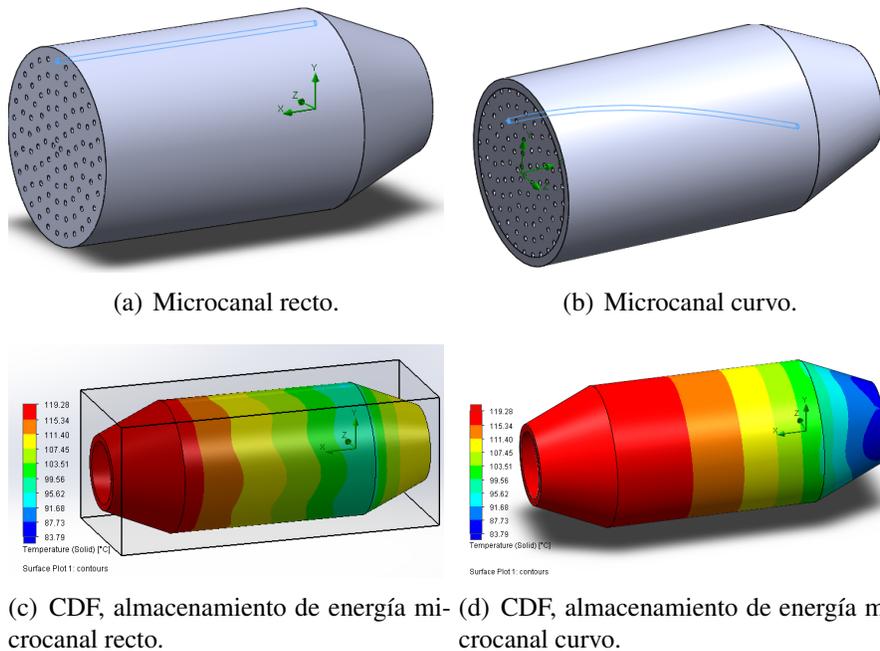


Figura 4.10: Gráfico de simulación CFD, para almacenamiento de energía de los regeneradores propuestos.

Como se observa en la simulación de la figura 4.10, la imagen 4.10(d) de microcanal curvo el color azul hace referencia a una baja temperatura, comparado con los colores mostrados de la figura 4.10(c) de regenerador con microcanal lineal, hay una diferencia de temperaturas obtenidas en la salida de los regeneradores propuestos y como se puede apreciar una mayor transferencia de calor en el regenerador de microcanal curvo con una rotación de 72 grados, cabe resaltar que la simulación se realizó bajo las mismas condiciones, con aire a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presión constante de  $70\text{ }[\frac{lb}{in^2}]$  material aluminio 6061, longitud entre la entrada y salida del regenerador de microcanales es de  $5\text{ }[cm]$  y el diámetro interno para ambos microcanales es de  $0.6\text{ }[mm]$ .

### 4.3. Resultados experimentales del regenerador de microcanales lineales y microcanales curvos

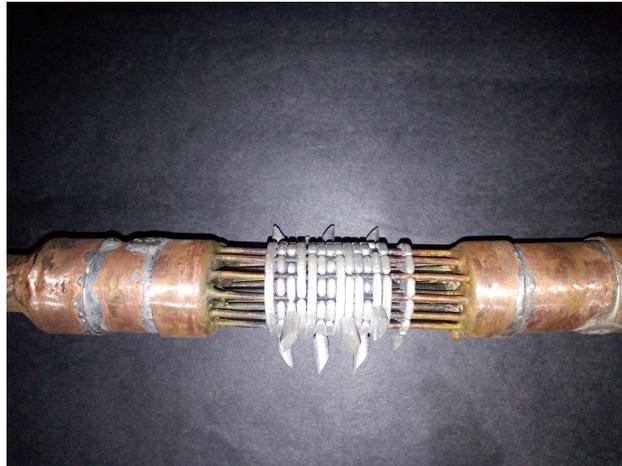


Figura 4.11: Microcanal de trayectoria recta.

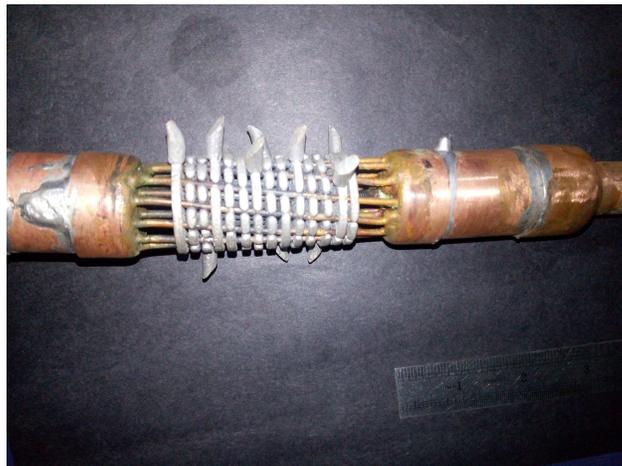


Figura 4.12: Microcanal de trayectoria curva.

El regenerador de la figura 4.11 y 4.12, consisten en 18 microcanales de tubo de cobre con un diámetro interno de  $0.075 [mm]$  y 14 discos de aluminio de  $3 [cm]$  de diámetro,  $3 [mm]$  de espesor y 18 barrenos con un avellanado por ambos lados de  $0.5 [mm]$ , el regenerador curvo tiene una rotación de 30 grados que sirve para cambiar la trayectoria del microcanal.

Los parámetros utilizados en para la experimentación del regenerador de malla de acero inoxidable son los mismos que se utilizaron para el experimento con el regenerador de minicanales de

trayectoria lineal y curva, con la excepción del caudal de aire, el cual es de  $10 \left[ \frac{L}{min} \right]$  para el segundo experimento.

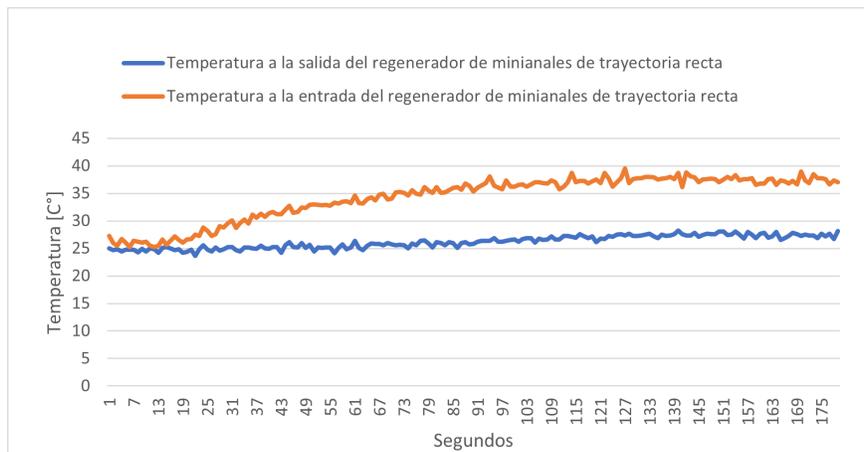


Figura 4.13: Prueba 1, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria recta.

En la figura 4.13 y 4.14 se puede observar la graficas de temperatura de las pruebas para el regenerador de microcanales de trayectoria lineal, las cuales fueran realizadas considerando el caudal de  $10 \left[ \frac{L}{min} \right]$ , con caídas de presión fue de  $244 \text{ [mmca]}$  y  $239 \text{ [mmca]}$  respectivamente.

En las figuras 4.15 y 4.16 se puede observar la graficas de temperatura de las pruebas para el regenerador de microcanales de trayectoria curva, las cuales fueran realizadas considerando el caudal de  $10 \left[ \frac{L}{min} \right]$ , con caídas de presión fue de  $258 \text{ [mmca]}$  y  $251 \text{ [mmca]}$  respectivamente.

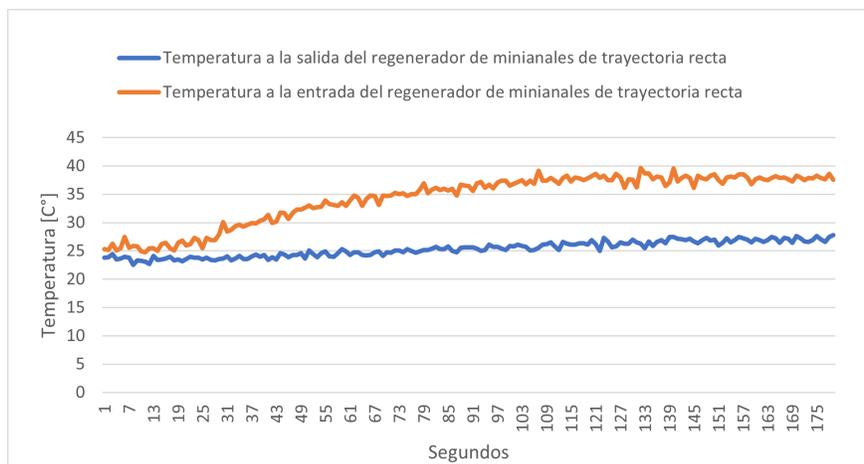


Figura 4.14: Prueba 2, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria recta.

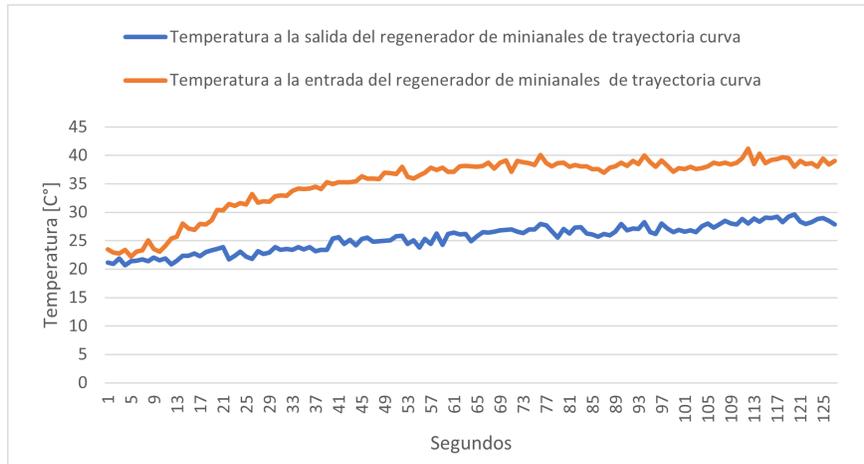


Figura 4.15: Prueba 1, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria curva.

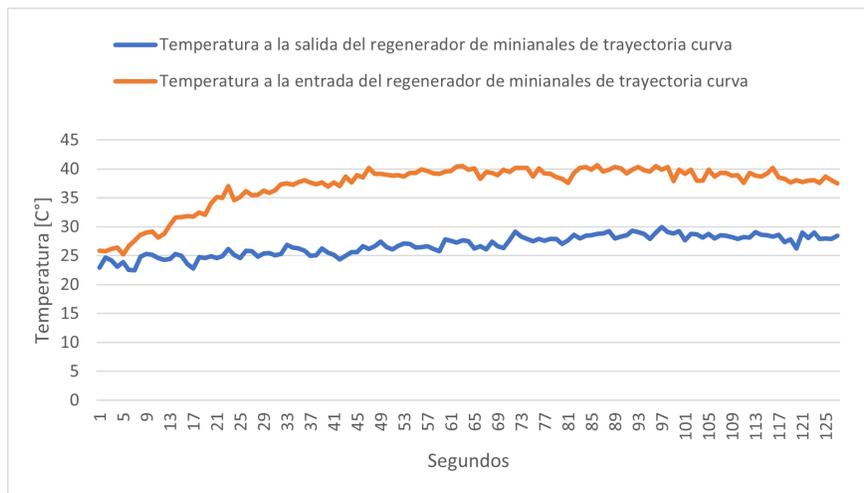


Figura 4.16: Prueba 2, gráfica de temperatura de entrada y salida del regenerador de minicanales de trayectoria curva.

En el Cuadro 4.3 muestra una porción de los diferenciales de temperatura en la entrada y la salida del regenerador de microcanales de trayectoria lineal y curva, en la última fila del cuadro mencionado, el valor que corresponde a la media para la prueba 1 de trayectoria recta es de 8.053 [°C], el valor que corresponde a la media para la prueba 2 de trayectoria recta es de 8.921 [°C], el valor que corresponde a la media para la prueba 1 de trayectoria curva es de 9.384 [°C], el valor que corresponde a la media para la prueba 2 de trayectoria curva es de 9.747 [°C], con estos comparando la media se puede confirmar que la trayectoria curva de los microcanales presenta un mayor diferencial de temperatura por lo cual también se puede argumentar que el diseño propuesto de regenerador puede generar un efecto positivo en el desempeño de los motores Stirling.

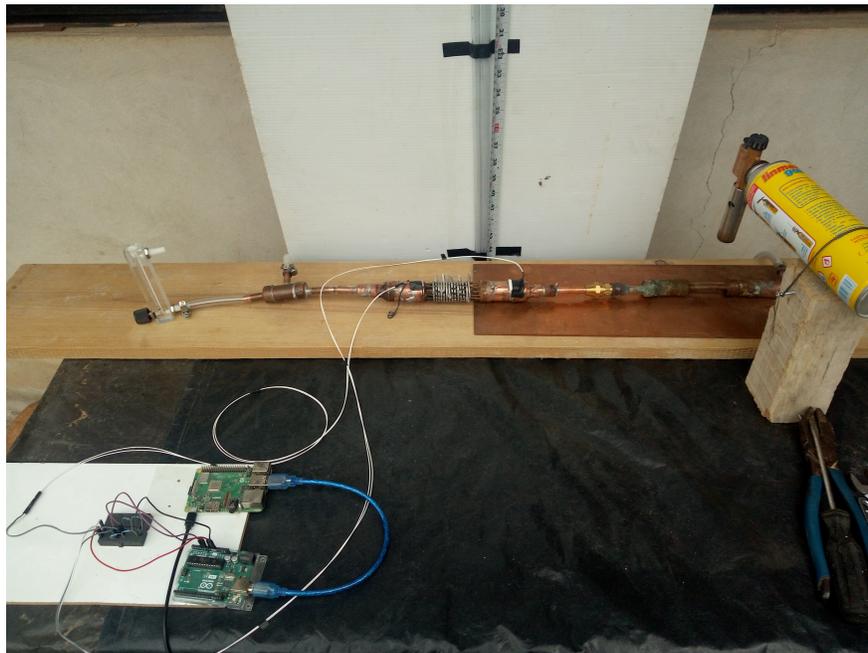


Figura 4.17: Banco de pruebas con regenerador de microcanales.

Cuadro 4.3: Tabla del diferencial de temperatura de las pruebas de las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16

No.	Diferencial de temperatura [°C].			
	Prueba 1 T. recta	Prueba 2 T. recta	Prueba 1 T. curva	Prueba 2 T. curva
1	8.77	8.32	8.23	9.76
2	8.02	8	8.98	8.76
3	8.22	9.59	7.7	8.53
4	8.11	10.03	7.49	9.22
5	8.47	9.64	9.16	11.38
6	8.53	8.62	10.59	8.53
7	8.38	9.97	10.05	9.26
8	7.88	10.47	10.9	8.98
9	8.96	9.93	9.38	8.97
10	9.42	8.2	10.59	9.6
11	7.9	10.65	10.26	9.33
12	8.36	9.93	9.65	10.37
13	8.36	10.12	10.73	10.32
14	9.61	10.16	10.89	10.58
15	9.63	9.96	10.4	10.32
16	9.51	10.42	11.26	11.84
17	9.56	9.39	12.1	9.6
18	9.66	10.05	10.59	9.63
19	9.42	10.41	10.83	10.78
20	8.42	10.94	11.53	10.07
21	9.72	11.78	12.2	11.25
22	9.56	9.97	12.67	11.08
23	9.87	10.49	12.28	10.41
24	9.99	11.78	11.42	11.13
25	9.07	9.97	11.42	10.94
26	9.61	10.49	12.49	11.96
27	9.39	10.44	12.68	11.77
28	9.97	10.48	13.71	10.95
29	11.06	10.68	12.05	12.09
30	9.96	9.85	13.3	11.78
31	10.59	10.95	11.89	10.86
32	10.64	10.03	14.04	7.73
<i>M</i>	8.053	8.921	9.384	9.747

## 4.4. Aporte científico-tecnológico de la investigación

Toda la aportación del trabajo se da en el regenerador, al diseñarlo, se logró tener un diseño original de regenerador con solicitud de patente en este momento en revisión en la oficina de patentes de la Facultad de Ingeniería y un banco de pruebas para regenerador, aceptado para publicación en el congreso XX Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas del IPN.

## 4.5. Impacto sostenible de la investigación

El este tipo de proyectos es de los principales temas de investigación debido a las condiciones actuales que se viven de forma global respecto al cambio climático, es necesario desarrollar alternativas de fuentes renovables para lo cual es indispensable incentivar la investigación de temas relacionados.

## 4.6. Entregables y productos

- Banco de pruebas aceptado para presentación en congreso XX Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas del IPN: Se desarrolló el banco de pruebas para regenerador de motor Stirling como se muestran en la figura 4.18.

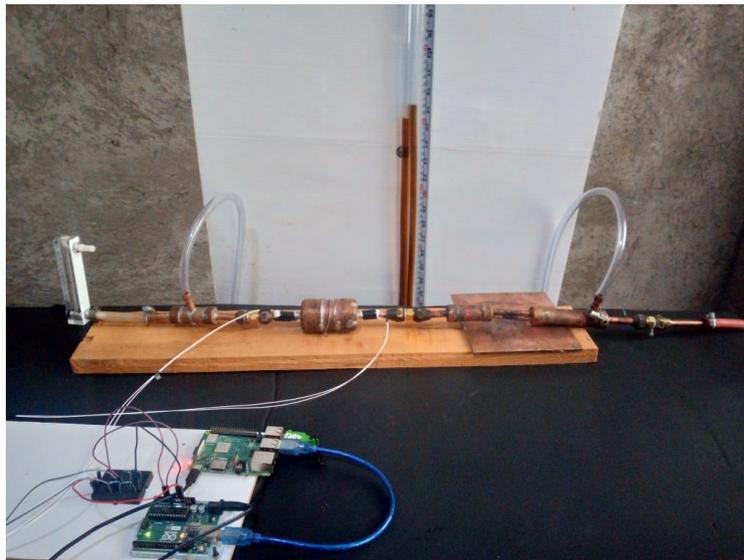


Figura 4.18: Banco de pruebas para regenerador de motor Stirling.

- **Publicación de artículo:** Se envió un artículo al congreso XX Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas.
- **Una solicitud de propiedad intelectual en la sección de modelo de utilidad:** se realizó el documento para la solicitud del modelo de utilidad con el nombre Regenerador de minicanales de trayectoria ajustable para motor Stirling.

# Conclusiones

## 5.1. Conclusiones

Como se mencionó en el presente documento, las características principales por las cuales un regenerador de motor Stirling es eficiente, son la alta transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el regenerador, baja caída de presión del fluido de trabajo y una baja transferencia de calor axial a lo largo del regenerador, el regenerador diseñado y construido de microcanales cumple las características deseadas y que fueron probadas experimentalmente, con una mayor tasa de transferencia de calor, como se muestra en la comparación de los diferenciales de temperatura del cuadro 4.3.

La trayectoria curva genera una mayor transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el regenerador con respecto al regenerador convencional de microcanales de trayectoria recta.

En cuanto a la caída de presión, se presentó una diferencia mínima en contra del regenerador propuesto.

En el punto tres que hace referencia a la transferencia de calor axial, el regenerador propuesto tiene una ventaja significativa debido a su diseño de discos y tubos, estos discos se pueden separar y aislar, para disminuir la transferencia de calor de forma axial, por estas consideraciones el diseño de regenerador de microcanales de trayectoria curva tiene un mejor desempeño térmico en el diferencial de temperatura entre la entrada y la salida del regenerador a comparación del diseño actual de trayectoria recta.

El desarrollo de proyectos ligados a generación de energías renovables son de gran importancia

en la época que vivimos, por lo tanto, es importante enfatizar que los proyectos de investigación no solo se deben de quedar en escrito, el desarrollo del proyecto presente fue motivado por las ideas mencionadas anteriormente y lo importante de llevar la realización en físico de un proyecto ayuda a comprender las dificultades para la construcción de cada una de las partes que constituyen un prototipo.

Como se menciona en el párrafo anterior, es importante la realización física de un proyecto, pero también es relevante hacer una búsqueda de la información disponible hasta el momento respecto a un tema en específico, como se mostró en el capítulo 1, la indagación de buscar información en la base de datos de patentes fue fundamental para desarrollar un prototipo de regenerador no aplicado hasta el momento del desarrollo del presente trabajo. Se pudo también constatar que varios artículos científicos se desarrollaron años después de las patentes otorgadas de prototipos similares, respecto a las patentes también se realizó un archivo técnico para la solicitud de patente de prototipo de regenerador con trayectoria ajustable para motor Stirling y por motivos de los requisitos para patentar no se muestra información de documento técnico de patente del regenerador propuesto hasta que no se tenga un número oficial de solicitud de patente ante el IMPI.

## **5.2. Trabajo futuro**

Para todo experimento es sumamente importante tener un ambiente controlado para asegurar que fenómenos externos no influyan en la experimentación, por lo cual se deben resaltar las siguientes partes en las cuales hay posibilidad de mejorar el banco de pruebas propuesto.

- Adaptar sensores de presión al sistema.
- Realizar un control para la regulación de temperatura del aire.
- Cambiar el flujómetro por uno de mayor capacidad.
- Adaptar un arreglo de válvulas para la configuración del un flujo bidireccional.

## **5.3. Proyectos futuros**

- Propuesta de diseño de motor Stirling.
- Motor Stirling con plato parabólico para conversión de energía solar a eléctrica.

- Control de posición de plato parabólico para mejorar la conversión de energía solar a eléctrica de un motor Stirling.

---

# Bibliografía

- Abuelyamen, Ahmed and Rached Ben-Mansour. 2018. Energy efficiency comparison of Stirling engine types ( $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$ ) using detailed CFD modeling. *International Journal of Thermal Sciences* 132:411–423.
- Alanne, Kari, Niklas Söderholm, Kai Sirén and Ian Beausoleil-Morrison. 2010. Techno-economic assessment and optimization of Stirling engine micro-cogeneration systems in residential buildings. *Energy Conversion and Management* 51(12):2635–2646.
- Alfarawi, Suliman, Raya Al-Dadah and Saad Mahmoud. 2017. Potentiality of new miniature-channels Stirling regenerator. *Energy conversion and management* 133:264–274.
- Chen, Wen-lih, Li, Yueh-heng, Wu, Yu-ting, Huang and Chao-wei. 2020. Regenerative displacer for use in a stirling engine.  
**URL:** <https://www.freepatentsonline.com/10787992.html>
- Cheng, Chin-Hsiang, Hang-Suin Yang and Lam Keong. 2013. Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine. *Energy* 59:590–599.
- Demtröder, Wolfgang. 2017. *Mechanics and Thermodynamics*. Springer.
- Gheith, Ramla, Fethi Aloui and Sassi Ben Nasrallah. 2012. Study of the regenerator constituting material influence on a Gamma type Stirling engine. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26(4):1251–1255.
- Gheith, Ramla, Fethi Aloui and Sassi Ben Nasrallah. 2015. Determination of adequate regenerator for a Gamma-type Stirling engine. *Applied energy* 139:272–280.
- Goswami, D Yogi and Frank Kreith. 2007. *Handbook of energy efficiency and renewable energy*. Crc Press.

- Gutiérrez Pulido, Humberto, Román De la Vara Salazar and Adolfo Rev Técnica Cano Carrasco. 2008. Análisis y Diseño de experimentos. McGraw Hill Interamericana.
- I, Urieli and Berchowitz. 1984. Stirling cycle engine analysis.
- Kamen, Dean L, Christopher C Langenfeld, Kingston Owens and Jonathan Strimling. 2005. Regenerator for a Stirling engine.  
**URL:** <https://www.freepatentsonline.com/6862883.html>
- Karabulut, HALİT, C Çınar, E Oztürk and HS Yücesu. 2010. Torque and power characteristics of a helium charged Stirling engine with a lever controlled displacer driving mechanism. *Renewable Energy* 35(1):138–143.
- Katayama and Yoshiaki Hiroyuki, Ogura. 2008. Regenerator method for manufacturing regenerator, system for manufacturing regenerator and stirling refrigerating machine.  
**URL:** <https://www.freepatentsonline.com/7383687.html>
- Khosravi, Ali, Sanna Syri, Juan JG Pabon, Oscar R Sandoval, Bryan Castro Caetano and Miguel H Barrientos. 2019. Energy modeling of a solar dish/Stirling by artificial intelligence approach. *Energy Conversion and Management* 199:112021.
- Kumar, Umesh and MN Karimi. 2014. Low grade waste heat recovery for optimized energy efficiencies and enhanced sustainability in process industries: a comprehensive review. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering* 5.
- Li, Tie, DaWei Tang, Zhigang Li, Jinglong Du, Tian Zhou and Yu Jia. 2012. Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro-CHP system. *Applied thermal engineering* 33:119–123.
- Nielsen, Anders S, Brayden T York and Brendan D MacDonald. 2019. Stirling engine regenerators: How to attain over 95 % regenerator effectiveness with sub-regenerators and thermal mass ratios. *Applied Energy* 253:113557.
- NOM-004-STPS-1999. N.d. Norma Oficial Mexicana NOM-004-STPS-1999, Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo.
- NOM-027-STPS-2008. N.d. Norma oficial mexicana NOM-027-STPS-2008, actividades de soldadura y corte-condiciones de seguridad.

- Noskov, Alexander Victorovich, Ackimov, Alexander Ivanovich, Ignatenko and Arteom Pavlovich. 2016. REGENERATOR FOR AN EXTERNAL HEAT ENGINE.  
**URL:** <https://www.freepatentsonline.com/y2016/0237947.html>
- Otto, Ilona M, Jonathan F Donges, Roger Cremades, Avit Bhowmik, Richard J Hewitt, Wolfgang Lucht, Johan Rockström, Franziska Allerberger, Mark McCaffrey, Sylvanus SP Doe et al. 2020. Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(5):2354–2365.
- Puech, Pascal and Victoria Tishkova. 2011. Thermodynamic analysis of a Stirling engine including regenerator dead volume. *Renewable Energy* 36(2):872–878.
- Qiu, Songgang and Augenblick. 2006. Channelized stratified regenerator system and method.  
**URL:** <https://www.freepatentsonline.com/7089735.html>
- SENER. 2018. Secretaría de Energía, Balance Nacional de Energía 2018, Available online:..  
[urlhttp://sindominio.net/ash](http://sindominio.net/ash).
- Shendage, DJ, SB Kedare and SL Bapat. 2011. An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism. *Renewable energy* 36(1):289–297.
- Stackhouse, PW and JM Kusterer. 2000. POWER Data Access Viewer. NASA Langley ASDC User Serv p. 1.
- Stirling, Robert. 1816. *Stirling Regenerator and Hot Air Engines*.
- Stirling, Robert and J. 1827. *Hot Air Engines*.
- Struchtrup, Henning. 2014. *Thermodynamics and energy conversion*. Springer.
- Thombare, DG and SK Verma. 2008. Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1):1–38.
- Toghyani, Somayeh, Alibakhsh Kasaeian, Seyyed Hasan Hashemabadi and Morteza Salimi. 2014. Multi-objective optimization of GPU3 Stirling engine using third order analysis. *Energy Conversion and Management* 87:521–529.
- Wang, Huanguang, Yunhao Bao, Yuming Tang, Meng Liu, Bilin Zhang, Shuai Zhu and Zhonghao Rao. 2021. Analytical solutions of heat storage and heat transfer performance of parallel-plate regenerators in Stirling cycle. *International Journal of Energy Research* 45(2):3327–3342.