

1.1.- ANTECEDENTES

Actualmente se ha generado una tendencia futura en los sistemas energéticos, marcado por el agotamiento de los combustibles tradicionales, el aumento del precio de los combustibles, las emisiones contaminantes, la necesidad de la búsqueda de nuevos yacimientos y su coste para extraerlo, el fuerte crecimiento de la población y del consumo, la dependencia entre países, así como la introducción de las renovables, etc. todo ello hace que se estudien los sistemas de generación de energía que en otras condiciones tal vez no se estudiaran, como es el caso de los motores Stirling.

El motor Stirling desarrolla un ciclo cerrado denominado con el mismo nombre que el motor, y puesto se caracterizan por ser de combustión externa, estos motores tienen capacidad de operación con gran variedad de combustibles (combustibles fósiles, biomasa, etc.) e incluso como fuente de calor puede utilizar la energía solar concentrada.

1.2.- INTRODUCCIÓN

El motor Stirling fué inventado en 1816 por Robert Stirling en Escocia. Unos ochenta años antes que el motor Diesel. El motor Stirling opera bajo un ciclo termodinámico regenerativo, con expansión y compresión del fluido de trabajo a diferente temperatura. El fluido de trabajo opera de tal manera que es capaz de producir trabajo a partir de calor, o bien también es capaz de producir frío a través de trabajo.

Este motor también es llamado como motor de aire, motor de gas, o con unas designaciones concretas reservada según la disposición del motor.

Con el rápido desarrollo de los motores de combustión interna, así como de las máquinas eléctricas, el desarrollo de este motor se vio seriamente paralizado.

Alta eficiencia térmica, bajo nivel de emisiones, reducido nivel sonoro, así como la capacidad de adaptarse a consumir la gran variedad de combustibles, corriente caliente e incluso radiación solar directa puede cubrir las necesidades de demanda energética en algunos escenarios, principalmente a la generación de energía distribuida. El motor Stirling es considerado como de los más versátiles en este sentido. Actualmente se encuentra en desarrollo a nivel mundial, tres subsistemas [D.G. Thombare, S.K. Verma, Technological development in the Stirling cycle engines, ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1-38] de estudios que son:

- El circuito del fluido de trabajo.
- La incidencia solar recibida.
- Los mecanismos de transmisión.

En 1980 con la crisis de los combustibles y debido al gran avance tecnológico en el desarrollo de materiales los motores Stirling parecen ser una atractiva y viable

alternativa, considerándose como la segunda etapa de la transformación de los motores Stirling.

Un motor Stirling puede establecerse como un sistema mecánico donde el flujo es controlado por las variaciones de volumen, debido al efecto térmico y a las contracciones y expansiones que realizan los dispositivos mecánicos que lo acompañan, produciendo así la conversión de calor en trabajo o de trabajo en calor y/o frío.

Bajo esta definición tan generalizada abarca una extensa familia de máquinas con diferentes funciones, características y configuraciones.

Estas máquinas también son capaces de operar en sistemas de refrigeración, bombas de calor, así como generadoras de presión. [Walker, Graham, Stirling engines, ISBN-19-856209-8] otros nombres particulares que reciben por designaciones particulares son por ejemplo, Heinrici, Robinson o Rankine-Napier. Siendo el resultado de esto la falta de claridad a la designación de estos motores. La designación más argumentada es la designada por el ciclo, Stirling la cual debería reservarse particularmente al ciclo termodinámico ideal.

Existe una clara distinción entre los motores Stirling donde el fluido de trabajo es controlado por su variación de volumen, y entre motores Ericsson que es controlado por válvulas. [Walker, Graham, Stirling engines, ISBN 0-19-856209-8]

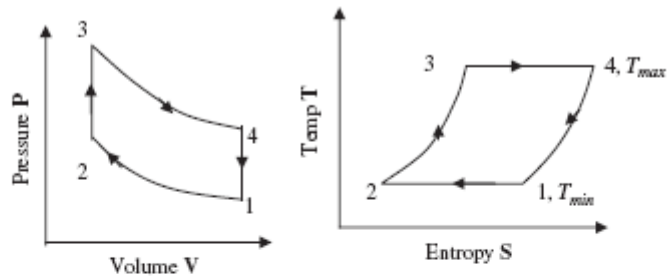
1.3.- EL CICLO STIRLING

En la medida que el funcionamiento del regenerador se acerca al caso ideal, el rendimiento del ciclo se aproxima al del ciclo de Carnot, en este supuesto el motor estaría compuesto por dos cilindros y un regenerador situado entre ambos. En dicha hipótesis, el regenerador puede ser considerado como un dispositivo que idealmente absorbe y cede calor alternativamente con el fluido de trabajo en. Este puede ser una malla formada por finos alambres ó matriz metálica , por lo que puede ser considerado como un material poroso. Uno de los volúmenes, el comprendido por las paredes del cilindro y que se encuentra en la sección caliente se denomina volumen de expansión, o bien, espacio de expansión cuyo espacio es desplazado cuando el émbolo se mueve entre el PMS y PMI se designa como volumen de desplazamiento de expansión, análogamente se hace la misma designación para el cilindro de compresión, el cual se encuentra dispuesto en la sección fría del motor.

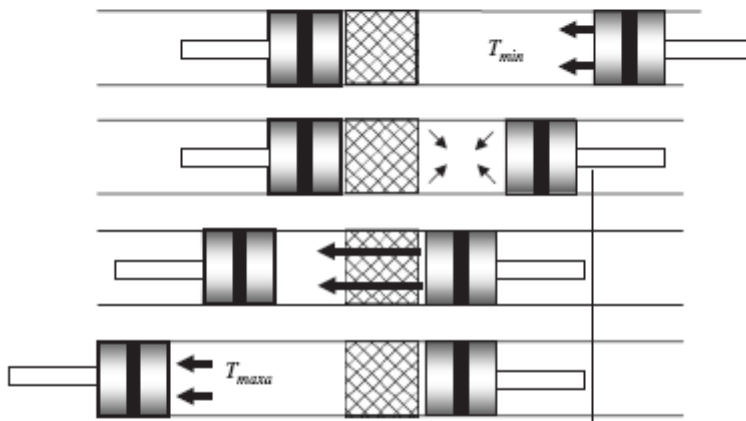
Dado que se dan dos volúmenes a distintas temperaturas, existe por tanto un gradiente de temperatura a todo lo largo del sistema y por consiguiente en el regenerador.

Al suponer el ciclo ideal, se supone que no existen pérdidas por fricción en el fluido de trabajo y mecánica, al desplazarse el pistón por el cilindro o los pistones por sus correspondientes cilindros, además de no producirse pérdidas por fugas en el gas de trabajo que se encuentra encerrado entre ellos.

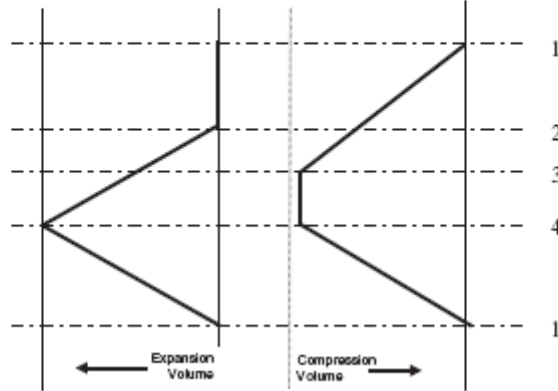
ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE UN MODELO NODAL APLICADO A MOTORES STIRLING.
 CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.



(a) PV and TS diagram for Stirling engine



(b) Engine arrangement and piston



(c) Time displacement diagram

En el inicio del ciclo ideal el volumen es máximo, y la presión y la temperatura se encuentran a los valores mínimos, como se muestra el punto 1 del diagrama PV y TS adjunto.

Durante el proceso de compresión (del estado 1 al 2), el pistón de compresión se desplaza al punto muerto superior y el pistón en el espacio de expansión permanece estacionario y por lo tanto, la presión del gas de trabajo aumenta.

La temperatura se mantiene constante porque el calor Q_c es entregado en la sección fría, que coincide con la zona de compresión desde el fluido de trabajo hacia el exterior.

En el proceso 2-3 (Del estado 2 al estado 3) ambos pistones se desplazan al mismo tiempo, el pistón de compresión hacia el regenerador y el pistón de expansión desde el regenerador, manteniéndose idealmente el volumen constante entre ellos.

Por lo que el fluido de trabajo es desplazado desde el espacio de compresión al espacio de expansión, desde el enfriador al calentador, a través de la matriz porosa metálica del regenerador.

En el paso a través del regenerador, el fluido de trabajo se calienta desde la T_{\min} hasta la T_{\max} por aporte de calor a través del regenerador, llegando al espacio de expansión a la temperatura T_{\max} . Este aumento de temperatura a través del paso del regenerador, se mantiene el volumen constante, lo que causa un aumento de presión.

En el proceso de expansión (del estado 3 al estado 4), el pistón de expansión continúa desplazándose desde el regenerador al punto muerto inferior, permaneciendo el pistón de compresión en el punto muerto superior. A medida que aumenta la expansión, la presión disminuye y el volumen aumenta. La temperatura se mantiene constante ya que el calor Q_a es añadido al sistema por una fuente externa.

El final del ciclo es el proceso del 4-1 (Del estado 1 al estado 4) donde ambos pistones vuelven a desplazar el gas a través del paso por el regenerador a volumen constante, es decir, del espacio de expansión al de compresión. A través del paso

por el regenerador, desde el calentador al enfriador, el fluido de trabajo se enfría transfiriendo el calor al regenerador, decreciendo así su temperatura, llegando al espacio de compresión hasta conseguir su temperatura mínima (T_{\min}).

El calor transferido es almacenado en la matriz del regenerador, para transferirlo al gas en el proceso 2-3 del ciclo.

Por lo que el ciclo reversible lo componen 4 procesos:

- Proceso 1-2: Compresión Isotérmica. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo hacia el exterior, hasta su temperatura mínima.
- Proceso 2-3: Volumen constante. Transferencia de calor desde la matriz del regenerador al fluido de trabajo.
- Proceso 3-4: Expansión Isotérmica. Transferencia de calor desde la fuente externa de calor al fluido de trabajo, hasta su temperatura máxima.
- Proceso 4-1: Volumen constante. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo al regenerador.

A través de los diagramas PV y TS, podemos hacer una comparación entre el ciclo de Carnot y el Stirling, entre los límites señalados de Presión, volumen y temperatura, en croquis 1 mostrándose en su respectiva figura.

Las áreas sombreadas 5-2-3 y 1-6-4 representan el trabajo adicional que se obtiene al sustituir el proceso isentrópico por un proceso a volumen constante.

Los procesos isotérmicos (1-5 y 3-6) del ciclo de Carnot se extienden a los procesos 1-2 y 3-4, respectivamente, de modo que las cantidades de calor suministrado (y rechazado) del ciclo Stirling se incrementan en la misma proporción que el trabajo desarrollado. La fracción de calor aportado y que se convierte en trabajo (la eficiencia), es la misma en ambos ciclos.

Para el inicio del ciclo se supone que el pistón que se encuentra en el espacio de compresión se encuentra en el PMI. Encontrándose el volumen al máximo siendo su presión y temperaturas las menores del ciclo, representándose en el punto 1 de los diagramas PV y TS dispuestos.

Para los cuatro procesos tenemos:

PROCESO 1-2: Proceso de compresión isotérmica:

El pistón de compresión se desplaza hacia el regenerador mientras que el pistón de expansión permanece estacionario, por lo que durante este proceso aumenta la presión ya que se comprime el fluido de trabajo. En este proceso la temperatura permanece constante debido a la cesión del calor a través de las paredes por las cuales circula el fluido de trabajo. Hay disminución de la entropía, dándose un proceso de compresión isotérmica del fluido de trabajo transfiriendo calor al exterior hasta la temperatura mínima.

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = P_1 r_v \quad T_1 = T_2 = T_{\min}$$

El calor aportado es igual al trabajo realizado.

$$Q = W_c = P_1 V_1 \ln\left(\frac{1}{r_v}\right) = mRT_1 \ln\left(\frac{1}{r_v}\right)$$

La variación de entropía será,

$$s_1 - s_2 = R \ln(1/r_v)$$

PROCESO 2-3: Proceso de regeneración constante.

Se da una transferencia de calor desde el regenerador al fluido de trabajo. En este proceso ambos pistones se desplazan al mismo tiempo. El pistón que se encuentra en el espacio de compresión se desplaza en dirección al regenerador, y el pistón que se encuentra en el espacio de expansión se desplaza en la dirección contraria al regenerador, este proceso se realiza de forma que el volumen permanezca constante.

En este proceso el fluido de trabajo es traspasado desde el espacio de compresión al espacio de expansión pasando por la matriz porosa que forma el regenerador, aumentando la temperatura del fluido de trabajo desde $T_{\text{mín}}$ a $T_{\text{máx}}$ debido a la transferencia de calor desde la matriz porosa del regenerador al fluido de trabajo. Este aumento de temperatura que se realiza de forma gradual que experimenta el fluido de trabajo al pasar por el regenerador produce un aumento de presión, de la energía interna del fluido y de la entropía, sin realizarse trabajo ya que el volumen permanece constante.

En este proceso isócoro (volumen constante) ocurre una transferencia de calor desde el regenerador al fluido de trabajo, donde:

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2} = \frac{P_2}{\tau} \quad V_3 = V_2$$

Donde τ es la relación de temperaturas definida por Gustav Schmidt.

El calor transferido será:

$$Q = C_v(T_3 - T_2)$$

Siendo el trabajo realizado nulo y la variación de entropía igual a:

$$s_2 - s_3 = C_v \ln \frac{1}{r}$$

PROCESO 3-4: Proceso de expansión isotérmica.

En este proceso de expansión, su pistón continúa distanciándose del regenerador hasta su punto muerto superior, mientras el pistón de compresión permanece en estado estacionario en su punto muerto inferior y por consiguiente en la posición más cercana al regenerador. A medida que se produce la expansión la presión disminuye y aumenta su volumen. La temperatura se mantiene constante mediante el aporte de calor al sistema desde la fuente de calor externa a la temperatura $T_{\text{máx}}$. El trabajo desarrollado por el fluido es igual en magnitud al calor suministrado, aumentando la entropía en el fluido y no habiendo cambios de la energía interna.

$$P_4 = \frac{P_3 V_3}{V_4} = \frac{P_3}{r_v} \quad T_4 = T_3 = T_{\text{máx}}$$

El calor transferido es igual al trabajo realizado, por lo que:

$$Q = W = P_3 V_3 \ln(r_v) = mRT_3 \ln(r_v)$$

La variación de entropía será:

$$s_3 - s_4 = R \ln(r_v)$$

PROCESO 4-1: Proceso de transferencia regenerativo.

En este proceso ambos pistones se mueven simultáneamente para desplazar el fluido de trabajo desde el espacio de expansión al espacio de compresión a través del regenerador a volumen constante. Se transfiere calor desde el fluido de trabajo a la matriz del regenerador reduciéndose así a la temperatura mínima $T_{\text{mín}}$, no se realiza trabajo, disminuye la energía interna y la entropía del fluido de trabajo. Es un proceso isócoro (volumen constante) donde se elimina calor.

$$P_1 = \frac{P_4 T_4}{T_1} = P_1 \tau \quad V_1 = V_4$$

El calor transferido es:

$$Q = C_v (T_1 - T_4)$$

La variación de entropía es:

$$s_1 - s_4 = C_v \ln(\tau)$$

Donde:

$$r_v = \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2}$$

El calor total aportado es

$$Q_a = RT_3 \ln(r_v)$$

Y el rechazado es:

$$Q_r = RT_1 \ln(r_v)$$

La eficiencia es:

$$\eta_t = \frac{Q_a - Q_r}{Q_a} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \tau$$

Este ciclo termodinámico idealizado el cual consta de dos procesos isotérmicos y dos procesos isócoros hace suponer que los intercambiadores de calor tienen una eficiencia de la unidad, y esto implica una transferencia de calor entre el fluido de trabajo y las superficies envolventes de éste como un intercambiador de calor a contraflujo de longitud infinita. En dicho intercambiador uno de los fluidos (el fluido de trabajo, o bien, el que se encuentra en contacto con las paredes superficiales exteriores del fluido de trabajo) experimentará la máxima diferencia de temperatura posible, es decir, el fluido de trabajo se podría calentar a la temperatura de entrada

del fluido que se encuentra en contacto con las paredes superficiales exteriores del fluido de trabajo, o bien el fluido de trabajo se enfriará a la temperatura de entrada del fluido frío. Esto supondrá un área de transferencia de calor infinita. Por otra parte, esto supone también que no se da una transferencia de calor entre las paredes del intercambiador de calor y los respectivos fluidos.

Con objeto de obtener un alto rendimiento en la operación del motor, el fluido de trabajo debe operar con una gran variación térmica entre las secciones fría y caliente y a elevadas presiones, provocando este hecho problemas de estanqueidad del fluido de trabajo.

1.4.- EL CICLO ERICSSON.

En el ciclo Ericsson, el proceso regenerativo de la transferencia de calor a volumen constante, descrita anteriormente, se reemplaza por un proceso regenerativo a presión constante, la eficiencia en el ciclo es la misma que en el de Carnot, pero al igual que con el ciclo Stirling, el trabajo desarrollado y la cantidad de calor transferido son mayores, viniendo dados por los límites de presión, volumen y temperatura.

1.5.- LA FUERZA IMPULSORA DEL CICLO STIRLING.

El calor aportado al ciclo es a la temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}$, y parte de este calor se convierte en trabajo, y parte de este calor es rechazado hasta llegar a la temperatura mínima.

Esto describe la operación de la fuerza impulsora del ciclo, la máquina produce trabajo tras recibir calor a alta temperatura desde una fuente externa, y lo libera hasta conseguir una temperatura menor.

1.6.- EL CICLO DE REFRIGERACIÓN STIRLING.

La diferencia principal en relación a lo anterior es que la temperatura a la cual se le aplica calor desde la fuente externa durante el proceso de expansión es a menor temperatura a la cual el calor es rechazado en el ciclo de durante la compresión.

$$\text{COP} = T_{\text{ref}} / (T_{\text{min}} - T_{\text{ref}})$$

El COP para los ciclos Stirling, Ericsson, y Carnot son los mismos, para temperaturas límites, pero las capacidades de los ciclos Ericsson y Stirling, son mucho mayores que el ciclo de Carnot, dado por los límites de presión y volumen.

1.7.- EL CICLO STIRLING COMO BOMBA DE CALOR.

El sistema puede trabajar como bomba de calor, las temperaturas sería las apropiadas para que la temperatura ambiental pueda ser modificada dentro de los límites razonables.

1.8.- EL CICLO STIRLING COMO UN GENERADOR DE PRESIÓN.

También tiene su aplicación donde el objetivo es impulsar un fluido, y aumentar la presión. Cuando el líquido a bombear es un líquido (o gas), separados por el diafragma (o pistón) del fluido de trabajo.

