

UA: Ingeniería térmica

Horas teóricas	4.0
Horas prácticas	1.0
Total de horas	5.0
Créditos institucionales	9.0
Título del material	Ciclos de potencia: Motor Stirling
Tipo de unidad de aprendizaje	curso
Carácter de la unidad de aprendizaje	obligatoria
Núcleo de formación	Sustantivo
Programa educativo	Ingeniería Mecánica
Espacio académico	Facultad de Ingeniería
Responsable de la elaboración	Juan Carlos Posadas Basurto

Índice

	Página
Presentación	4
Estructura de la unidad de aprendizaje	5
Contenido de la presentación	7
Introducción	9
Robert Stirling	11
Diseño del motor de Stirling	12
Elementos del motor Stirling	13
Regenerador	14
Funcionamiento del motor Stirling	17
Video del motor Stirling	18
Procesos del ciclo teórico de Stirling	19

	Página
Movimiento de los émbolos	20
Suposiciones para analizar el ciclo Stirling	21
Proceso 1-2, expansión isotérmica	23
Proceso 2-3, enfriamiento isométrico	25
Proceso 3-4, compresión isotérmica	26
Proceso 4-1, calentamiento isométrico	27
Rendimiento térmico	28
Arreglos del motor de Stirling	30
Motor de Stirling tipo alfa	31
Motor de Stirling tipo beta	32
Motor de Stirling tipo gama	33
Motor de Stirling tipo Siemens, Rinia o de doble efecto	34
El motor de Stirling contra el motor de combustión interna	35
Fluidos de trabajo	36
Comportamiento del Aire, Helio e Hidrógeno	37
Bibliografía	38

Presentación

- La unidad de aprendizaje Ingeniería Térmica es obligatoria y se sugiere cursarla en el sexto período.
- Como Unidad de Aprendizaje antecedente está Termodinámica, en el quinto periodo, donde se revisan los principios, las propiedades de las sustancias puras, la ley de los gases ideales, manejo de tablas y diagramas de aire, de vapor de agua y de refrigerantes, análisis de ciclos de acuerdo a las leyes de la Termodinámica.
- El discente que aprueba la Unidad de Aprendizaje Termodinámica es capaz de analizar ciclos termodinámicos. Uno de estos ciclos es el del motor de Stirling.

Estructura de la unidad de aprendizaje

1. De las distintas fuentes de energía suministradas a los sistemas termodinámicos para generar energía mecánica (sistemas de potencia) y para absorber energía térmica (sistemas de refrigeración), valorar la importancia que tiene el estudio de la Ingeniería Térmica (Termodinámica Aplicada) en la aplicación de energías renovables y mejora de los dispositivos térmicos.
2. A partir de motores que utilizan aire como fluido de trabajo y tienen un rendimiento térmico igual al de la máquina de Sadi Carnot, analizar los sistemas de potencia propuestos por Robert Stirling y John Ericcson.
3. Considerando los motores térmicos que actualmente son ensamblados a vehículos terrestres, aéreos y acuáticos, y que utilizan combustibles fósiles para su accionamiento, analizar cada uno de ellos (Otto, Diesel, Dual, Brayton), determinando sus ineficiencias y posibles mejoras.

4. Dada la importancia de generar energía eléctrica para abastecer las necesidades de cualquier ciudad, se analizan las propuestas de sistemas térmicos de potencia (Diesel, Brayton, Rankine) para conectarse a un generador eléctrico, tomando en cuenta el combustible utilizado y la contaminación producida.
5. Para la conservación de alimentos y bebidas en lugares tales como hogares, restaurantes y hoteles, se analiza el sistema de refrigeración por compresión de un vapor considerando las propuestas de mejora del ciclo termodinámico y los fluidos de trabajo utilizados para tal fin.
6. De la propuesta de utilizar aire para un sistema de enfriamiento, se analiza el ciclo de refrigeración por compresión de un gas (aire).
7. Considerando que hay propuestas de mejora de sistemas de refrigeración, se analiza el ciclo de refrigeración por absorción de un vapor, determinando sus mejoras e ineficiencias.

Contenido de la presentación

- La presentación comprende el punto 2 de la estructura de la Unidad de Aprendizaje, ciclo de potencia: motor de Stirling.
- Se da una breve historia del motor de aire caliente (motor Stirling) así como las partes principales que componen la máquina y su funcionamiento.
- Se analiza el ciclo termodinámico de Stirling obteniendo al final su rendimiento y los tipos de arreglos que existen.
- Se compara el motor Stirling con el motor de combustión interna y se describen los fluidos de trabajo más utilizados.
- Al final de la presentación se incluye un apartado de referencias para que tanto el docente como el discente profundicen en los temas de interés.



Ingeniería Térmica

Ciclo de Stirling

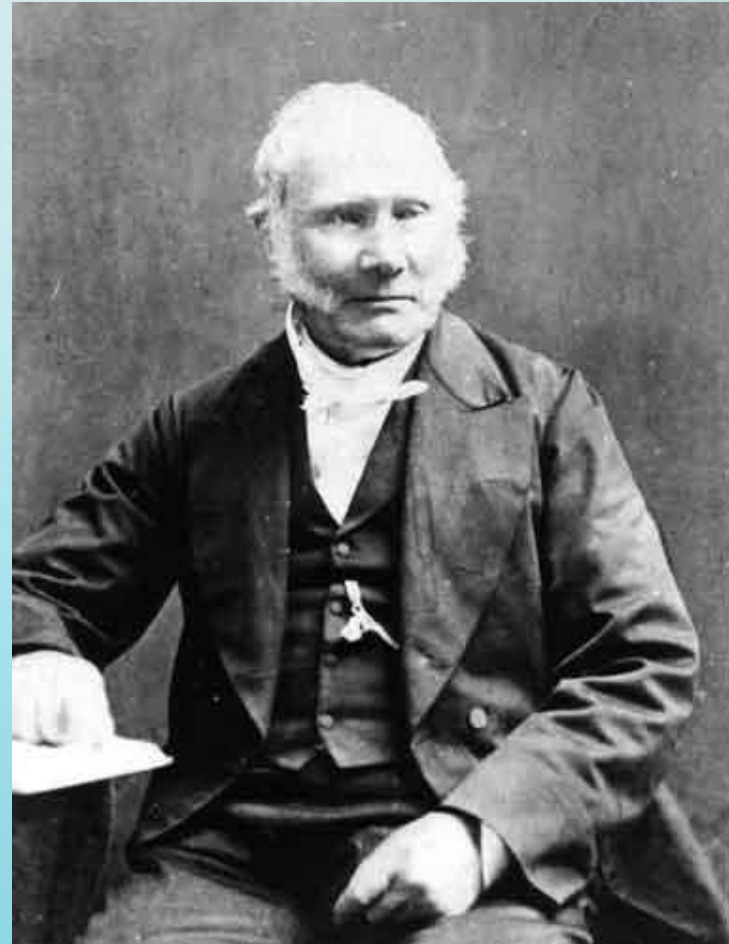
Introducción (Balmer, 2011)

- Muchos de los primeros generadores de vapor explotaron debido a materiales débiles, diseño defectuoso y mala construcción. Debido a la consiguiente pérdida de vidas humanas y propiedades se desarrollaron motores sin un generador de vapor de alta presión.
- El motor de Stirling fue notable, no sólo por su complejidad mecánica y termodinámica, sino por el primer uso de la regeneración térmica donde el calor liberado durante el proceso de expansión se almacena dentro del sistema (en el regenerador) y se suministra nuevamente al fluido de trabajo (aire) durante el proceso de compresión.
- Conocido como motor de aire caliente, el motor de Stirling encontró un uso extensivo en pequeñas granjas entre 1820 y 1920 para el bombeo de agua y otras tareas ligeras.

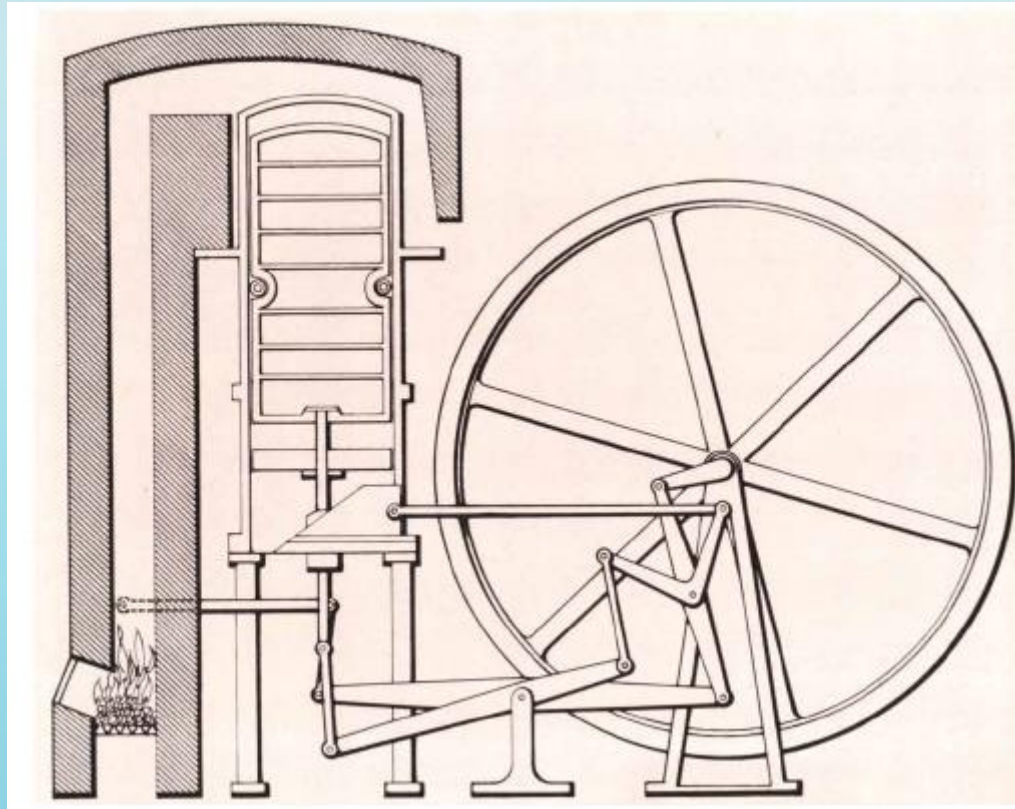
- El diseño del motor Stirling cuenta con un cilindro que aloja dos émbolos. Uno es de potencia y el otro es de desplazamiento. Su función es mover el fluido de trabajo de un espacio a otro a través del regenerador (Wu, 2007).
- A pesar de que el motor de Stirling no logró competir contra los motores de combustión interna después de 1880, su potencial de alto rendimiento térmico (y consecuentemente bajo consumo de combustible) sumado al bajo nivel de ruido y baja contaminación atmosférica, rasgos de un motor de combustión externa, causó interés renovado en el siglo XX para uso automotor.

Robert Stirling

- Clérigo escocés (1790-1878).
- Patentó un motor de combustión externa (1816) de sistema cerrado que utiliza una masa fija de aire (Balmer, 2011).
- El motor original de émbolo alternativo fue diseñado para mejorar el rendimiento de combustible sobre los motores de vapor más comunes de la época (Lane, 2016).



Diseño del motor de Stirling



Dibujo del motor con base en la patente presentada por Robert Stirling (Walker, 1973).

El motor Stirling original se compone de dos émbolos con transferencia de energía térmica externa, propiedad que teóricamente le permite utilizar cualquier fuente térmica (Škorpík, 2013).

Elementos del motor Stirling (Martini, 1983)

- Una Fuente de energía térmica externa.
- Un sólido que transfiere la energía térmica a un fluido de trabajo.
- Un medio de ciclar el fluido de trabajo entre las partes de temperaturas alta y baja del motor, de comprimirlo y expandirlo.
- Un regenerador para mejorar el rendimiento.
- Un control de potencia y sellos para separar el fluido de trabajo del medio ambiente.
- Un enlace para crear potencia útil de la potencia neta indicada.
- Un sumidero de energía residual del motor.

Regenerador

- La función del regenerador es absorber energía térmica del fluido de trabajo en un proceso a volumen constante, disminuyendo su temperatura, y restituyéndosela en otro proceso a volumen constante, aumentando así su temperatura.
- Cuando trabaja el regenerador, el fluido de trabajo absorbe la energía térmica a la temperatura alta del ciclo, donde la función del calentador es mantenerla. Así el ciclo necesita de menos cantidad de combustible.

- El regenerador puede ser una malla de alambre o cerámica o cualquier otro tipo de tapón poroso con una alta masa térmica (masa por calor específico), que se emplea para el almacenamiento temporal de energía térmica (Cengel & Boles, 2009).
- La regeneración ideal se consigue cuando el fluido que entra y sale de la malla alcanza una de las dos temperaturas constantes, T_{alta} en el extremo de expansión y T_{baja} en el extremo de compresión del regenerador. Sólo es posible si las operaciones se realizan infinitamente lentas (proceso cuasiestático) o si el coeficiente de transferencia de calor o el área de transferencia de calor es infinita. También es posible si la capacidad de transferencia de calor del fluido es cero o la capacidad térmica de la malla es infinita (Zarinchang & Yarmahmoudi, 2009).

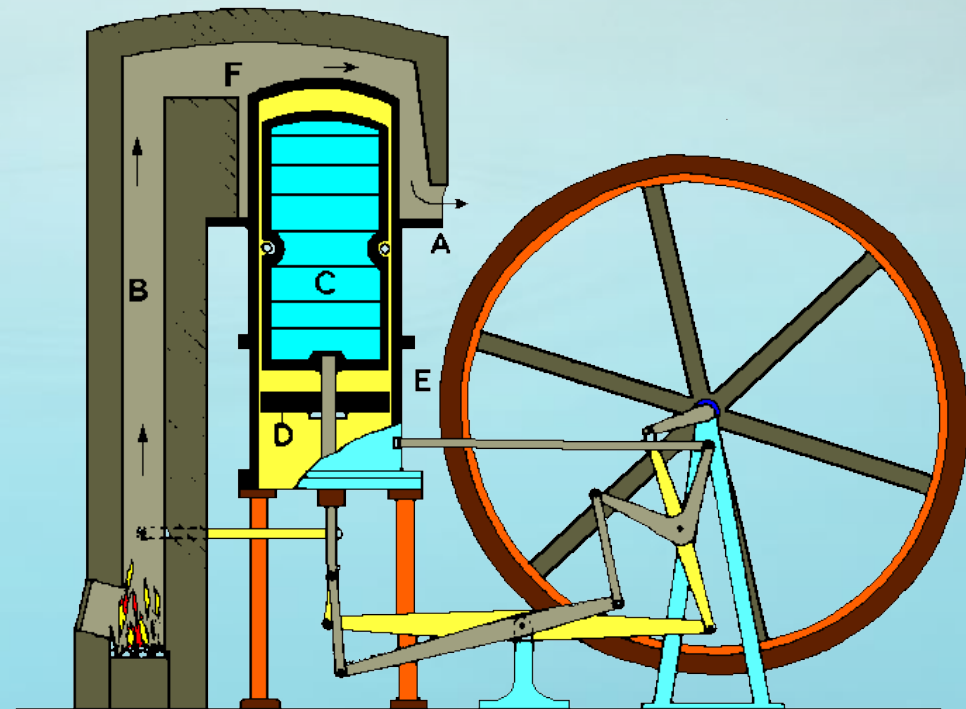
- La malla debe estar finamente dividida, con conducción térmica preferencial a una máxima normal al flujo, y mínima en la dirección del flujo. También la malla actúa como un filtro extremadamente eficaz del fluido de trabajo (Graham, Stirling Engines, 1980).

Por lo tanto, las siguientes características son deseables para una malla regenerativa (Graham, Stirling Engines, 1980):

- ✓ Para la capacidad máxima de calor una gran matriz sólida,
- ✓ Para pérdidas mínimas de flujo una matriz pequeña y altamente porosa,
- ✓ Para el espacio muerto mínimo una matriz pequeña y densa,
- ✓ Para la máxima transferencia de calor una gran matriz finamente dividida,
- ✓ Para la contaminación mínima una matriz sin obstrucción.

Funcionamiento del motor Stirling (Román, 1997)

- Un cilindro A contiene émbolos de potencia D y desplazamiento C, y aire que se calienta con los gases del hogar B.
- Al descender C, que tiene un anillo (regenerador) de material conductor de calor, la mayor parte del aire está arriba, provocando que D descienda entregando trabajo al exterior.
- Un mecanismo mueve C hacia arriba, desplazando la mayor parte del aire hacia la zona fría, bajando su presión y temperatura



Video del motor de Stirling (Cyberneticos,2016)



Procesos del ciclo teórico de Stirling

Diagrama pv del ciclo

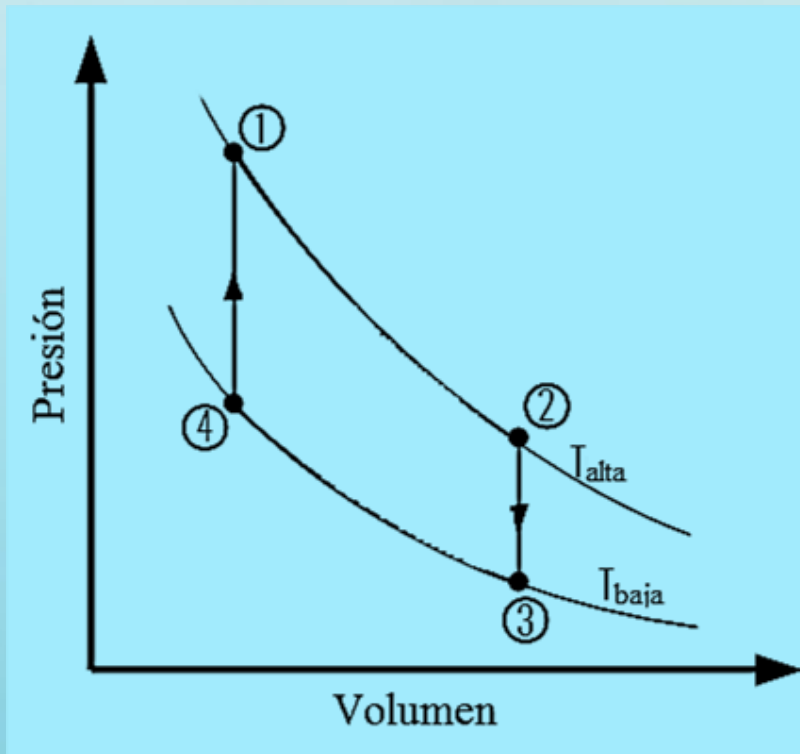
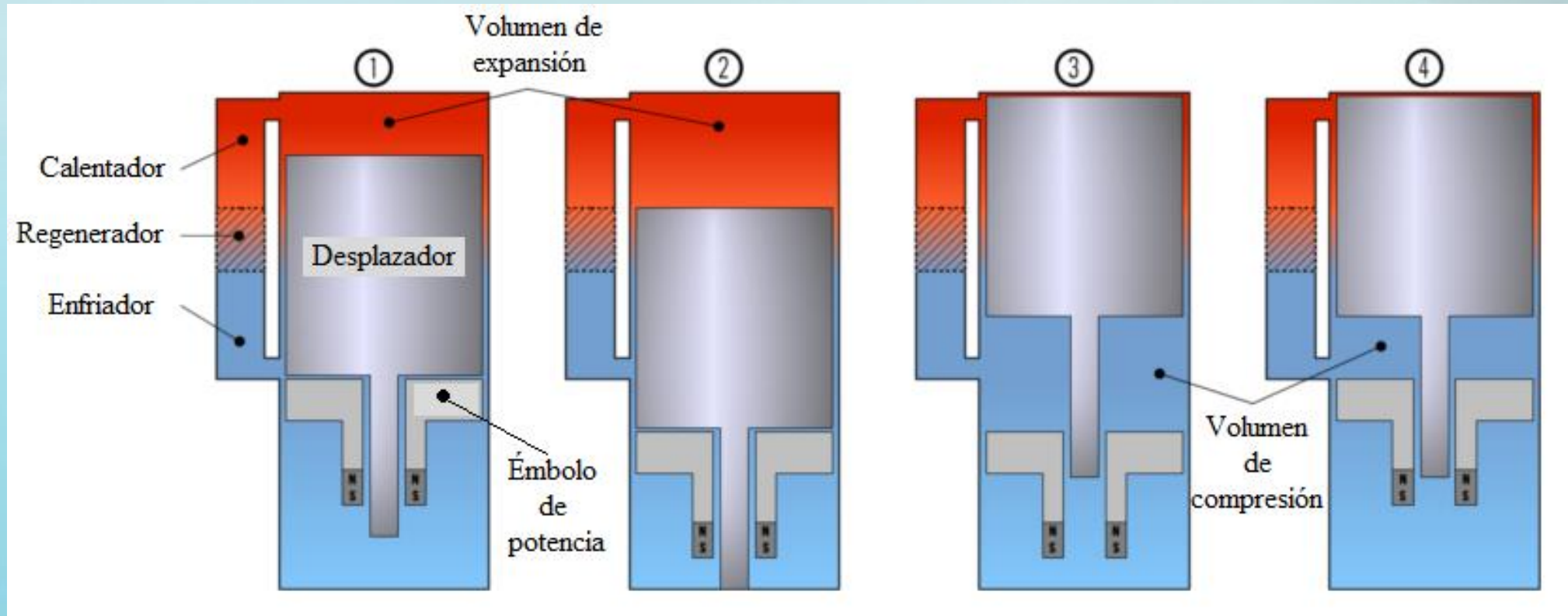


Diagrama Pv del ciclo de Stirling (ENGINE;2014).

Procesos

- (1 a 2) Expansión isotérmica.
- (2 a 3) Enfriamiento a volumen constante.
- (3 a 4) Compresión isotérmica.
- (4 a 1) Calentamiento a volumen constante.

Movimiento de los émbolos (ENGINE;2014)



1-2 Expansión; 2-3 y 4-1 Transferencia de calor; 3-4 Compresión.

Suposiciones para analizar el ciclo Stirling

- El fluido de trabajo es aire o cualquier otro fluido, en fase de vapor o gas, que mantenga su composición química constante y sin reacciones en todo el ciclo de potencia.
- El fluido de trabajo es una sustancia tanto pura como simple compresible.
- Los calores específicos a presión constante c_p [kJ/kg] y a volumen constante c_v [kJ/kg], se mantienen constantes en todo el ciclo de potencia.
- Los cambios de las energías cinética (ΔEC) y potencial (ΔEP) se desprecian.

- El sistema es cerrado y la energía mecánica w [kJ/kg] responde a la ecuación

$$w = \int P dv$$

P : presión [kPa]; v : volumen específico [$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$]

- El balance de energía térmica q [kJ/kg] responde a la ecuación

$$q + u_{inicial} = u_{final} + w$$

u : energía interna [kJ/kg]

- El ciclo es reversible.

Proceso 1-2, expansión isotérmica

- Ya que el sistema se considera cerrado, la energía mecánica se obtiene de la ecuación

$$w_{1-2} = \int_1^2 P dv$$

- Como el gas se considera ideal $P = RTv^{-1}$, donde R (constante del gas [kJ/(kg·K)]) y T (Temperatura [K]) son constantes para el proceso en estudio.

$$w_{1-2} = \int_1^2 \frac{RT_{alta}}{v} dv = RT_{alta} \int_1^2 \frac{dv}{v} = RT_{alta} \ln v \Big|_1^2$$

$$w_{1-2} = RT_{alta} (\ln v_2 - \ln v_1) = RT_{alta} \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

- El balance de energía para sistemas cerrados es

$$q_{1-2} = (u_2 - u_1) + w_{1-2}$$

- Para un proceso isotérmico $u_2 - u_1 = c_{v_2}(T_2) - c_{v_1}(T_1)$.
- Considerando calores específicos constantes, entonces

$$q_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) + RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

- Siendo el proceso isotérmico $T_2 = T_1 = T_{alta}$, por lo que

$$q_{1-2} = RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Proceso 2-3, enfriamiento isométrico

- De la ecuación de energía mecánica (trabajo) se deduce que

$$w_{2-3} = \int_2^3 P dv = 0$$

ya que no existe cambio de volumen.

- Del balance de energía para sistemas cerrados se obtiene la energía térmica absorbida por el regenerador

$$q_{2-3} = (u_3 - u_2) + w_{2-3} = c_v(T_3 - T_2) + 0 = c_v(T_{baja} - T_{alta})$$

Proceso 3-4, compresión isotérmica

- La energía mecánica es

$$w_{3-4} = \int_3^4 P dv = \int_3^4 \frac{RT_{baja}}{v} dv = RT_{baja} \int_3^4 \frac{dv}{v} = RT_{baja} \ln v \Big|_3^4$$
$$w_{3-4} = RT_{baja} (\ln v_4 - \ln v_3) = RT_{baja} \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right)$$

- La energía térmica es

$$q_{3-4} = (u_4 - u_3) + w_{3-4} = c_v(T_4 - T_3) + RT_{baja} \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right)$$
$$q_{3-4} = 0 + RT_{baja} \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right) = RT_{baja} \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right)$$

Proceso 4-1, calentamiento isométrico

- Como no hay cambio de volumen en el proceso

$$w_{4-1} = \int_4^1 P dv = 0$$

- La energía térmica suministrada por el regenerador se obtiene del balance de energía para sistemas cerrados

$$q_{4-1} = (u_1 - u_4) + w_{4-1} = c_v(T_1 - T_4) + 0 = c_v(T_{alta} - T_{baja})$$

Esta energía es igual, en valor absoluto, a la energía térmica en el proceso 2-3. Es decir, el regenerador se considera ideal y toda la energía que absorbe en el proceso 2-3 la suministra en el proceso 4-1.

Rendimiento térmico

- El rendimiento de una motor térmico responde a la ecuación

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

- Para el motor de Stirling

$$W_{neto} = W_{1-2} + W_{3-4}$$
$$Q_{suministrado} = Q_{1-2}$$

- El rendimiento se obtiene de la siguiente relación

$$\eta_{Stirling} = \frac{W_{neto}}{Q_{suministrado}} = \frac{W_{1-2} + W_{3-4}}{Q_{1-2}} = \frac{RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + RT_{baja} \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)}{RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$$

- Ya que $v_1 = v_4$, $v_2 = v_3$, y $\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}$.

$$\eta_{Stirling} = \frac{RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) - RT_{baja} \ln\left(\frac{v_3}{v_4}\right)}{RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$$

$$\eta_{Stirling} = \frac{RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) - RT_{baja} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{RT_{alta} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$$

$$\eta_{Stirling} = \frac{T_{alta} - T_{baja}}{T_{alta}} = 1 - \frac{T_{baja}}{T_{alta}}$$

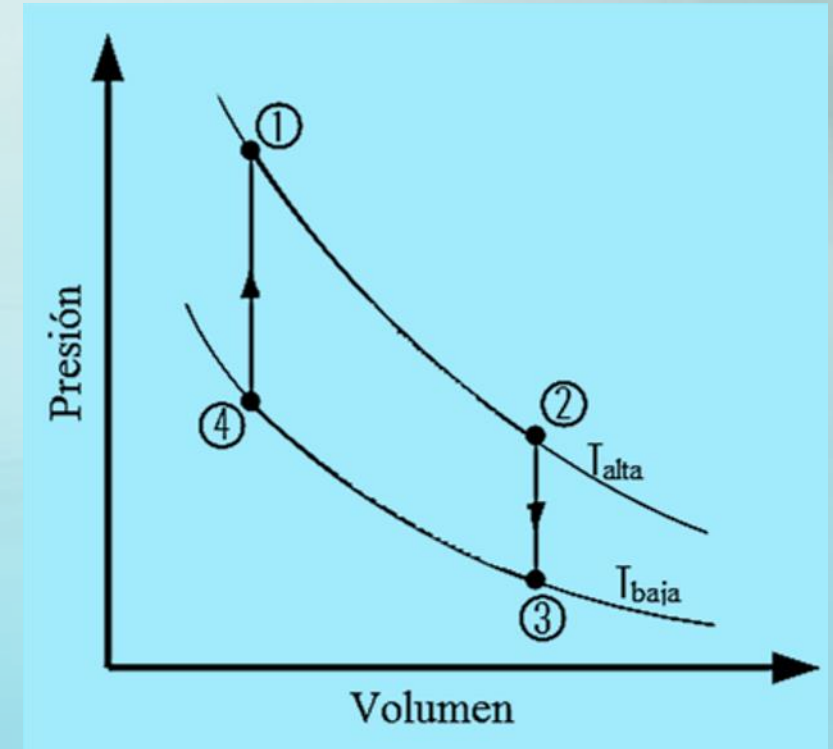
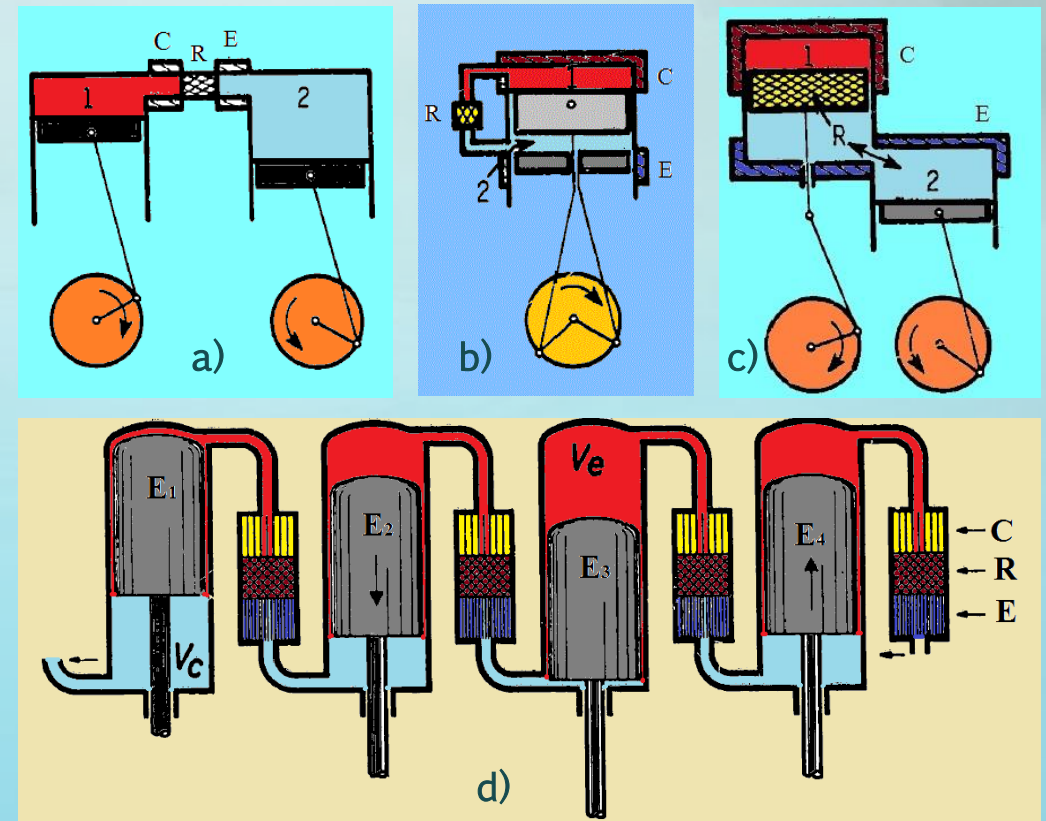


Diagrama Pv del ciclo de Stirling (ENGINE;2014).

Arreglos del motor de Stirling

- Se han desarrollado varios arreglos de motores de Stirling siendo los más importantes:

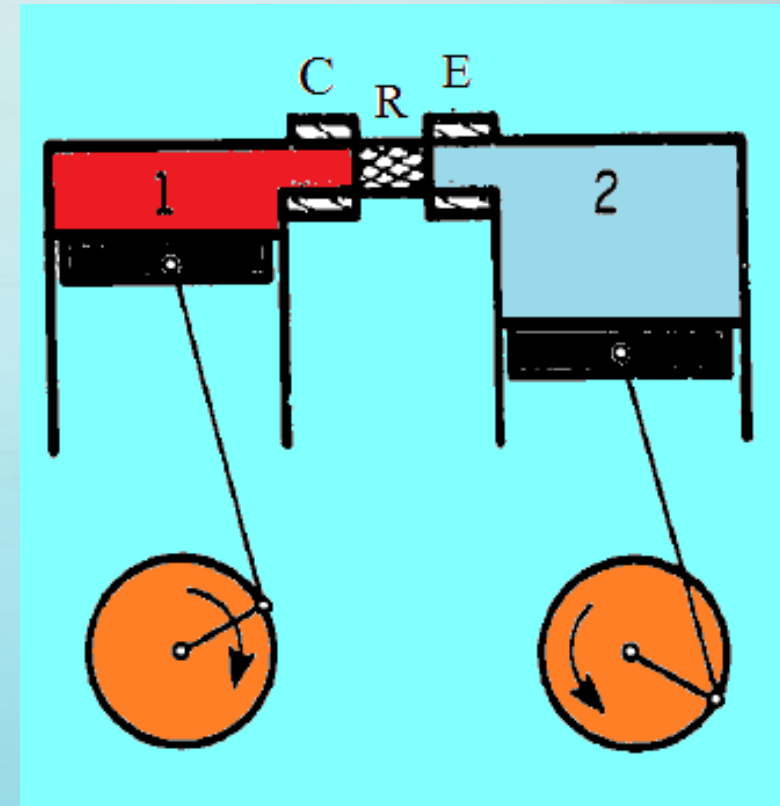
- a) Motor de Stirling tipo alfa.
- b) Motor de Stirling tipo beta.
- c) Motor de Stirling tipo gama.
- d) Motor de Stirling tipo Siemens, Rinia o de doble efecto.



Tipos de motores de Stirling (Martini, 1983).

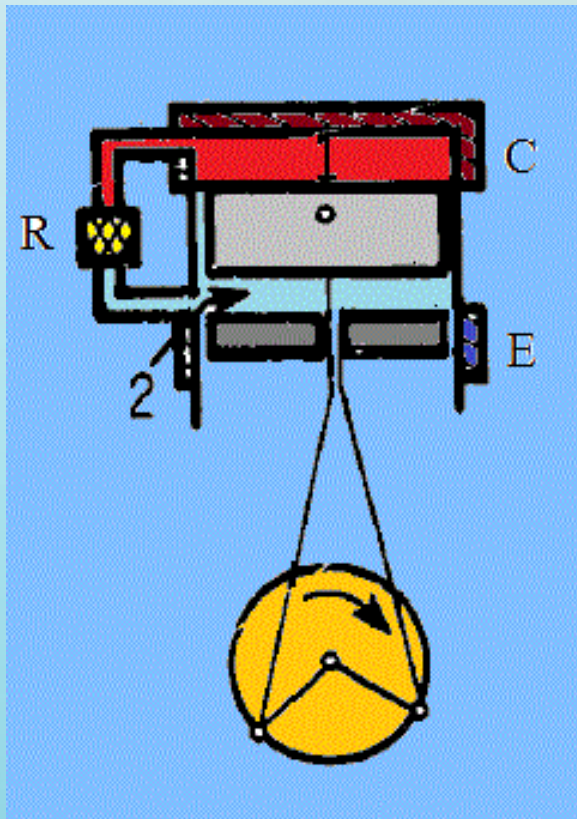
Motor de Stirling tipo alfa (Martini, 1983).

- Se compone de dos cilindros independientes.
- Los cambios de volumen de los lados de temperatura alta y baja están influenciados solamente por un émbolo cada uno.
- Hay un regenerador R, un calentador C y un enfriador E en serie con los espacios de gas caliente y frío.



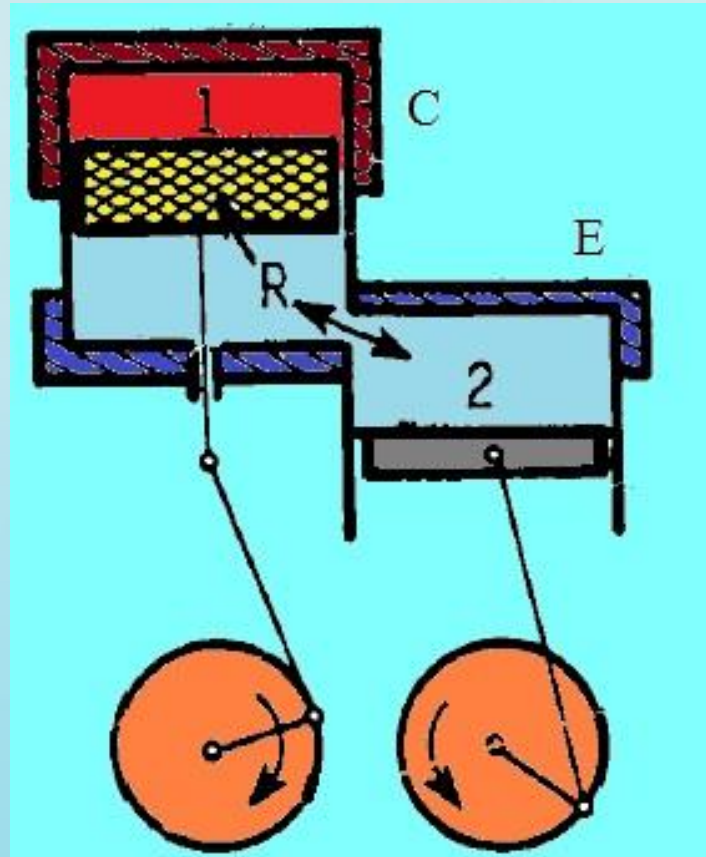
Motor Stirling tipo alfa.1: volumen de expansión; 2: volumen de compresión.

Motor de Stirling tipo beta (Martini, 1983).



Arreglo tipo beta del motor Stirling. R: regenerador; C: Calentador; E: Enfriador; 1: espacio de expansión; 2: espacio de compresión.

- Utiliza un émbolo de desplazamiento y otro de trabajo dentro de un cilindro.
- El émbolo de trabajo hace la compresión y la expansión, y el de desplazamiento transfiere el gas del espacio caliente al frío.
- El arreglo en línea de los émbolos de desplazamiento y de trabajo denomina el ajuste beta.

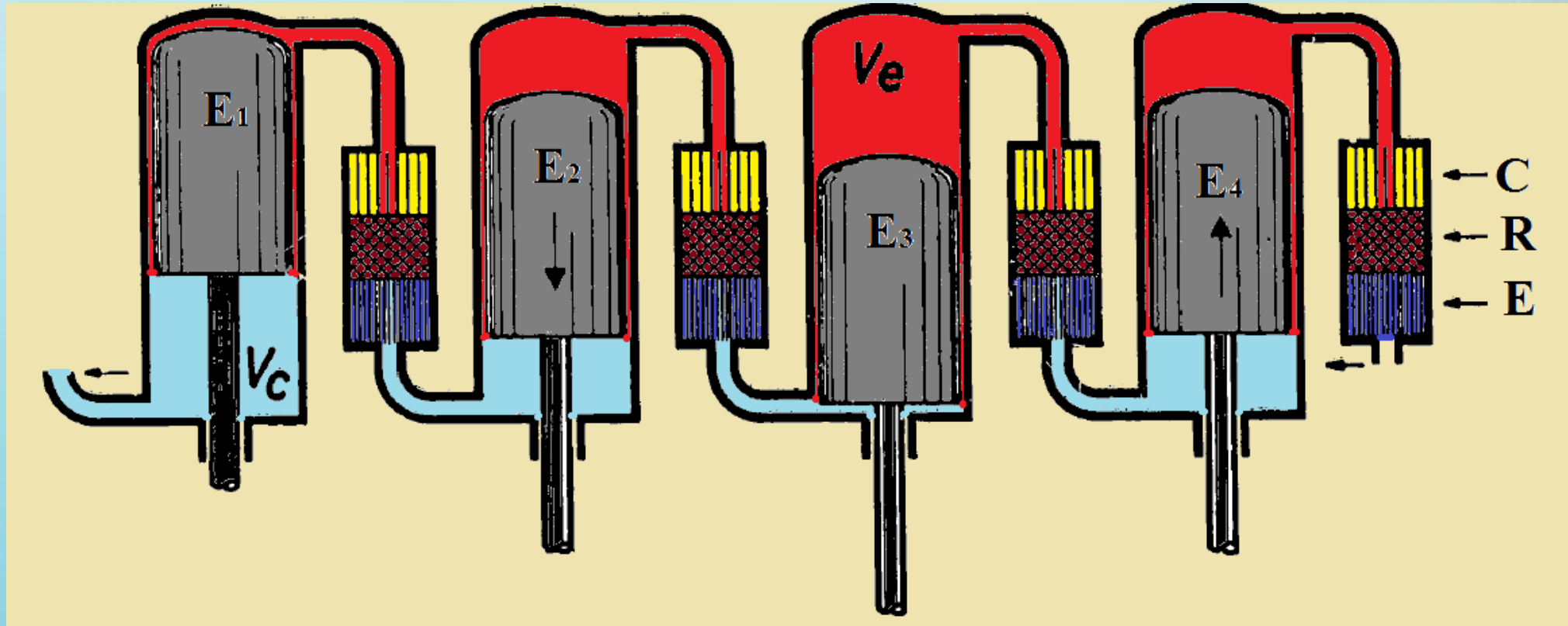


Arreglo tipo gama del motor Stirling. R: regenerador; C: Calentador; E: Enfriador; 1: espacio de expansión; 2: espacio de compresión.

Motor de Stirling tipo gama (Martini, 1983).

El émbolo de trabajo es movido por el de desplazamiento, para permitir una disposición mecánica más simple.

Motor de Stirling tipo Siemens, Rinia o de doble efecto (Martini, 1983).



E1, E2, E3, E4: émbolos; Ve: volumen de expansión; Vc: volumen de compresión; C: calentador; R: regenerador; E: enfriador.

El motor de Stirling contra el motor de combustión interna (Basshuysen & Shafer,2004)

Ventajas

- Bajas emisiones.
- Capacidad de utilizar cualquier fuente de calor adecuada.
- Rendimiento alto en el punto de trabajo óptimo.
- Baja vibración.
- Bajo nivel de ruido.
- Rendimiento ideal igual al de Carnot.

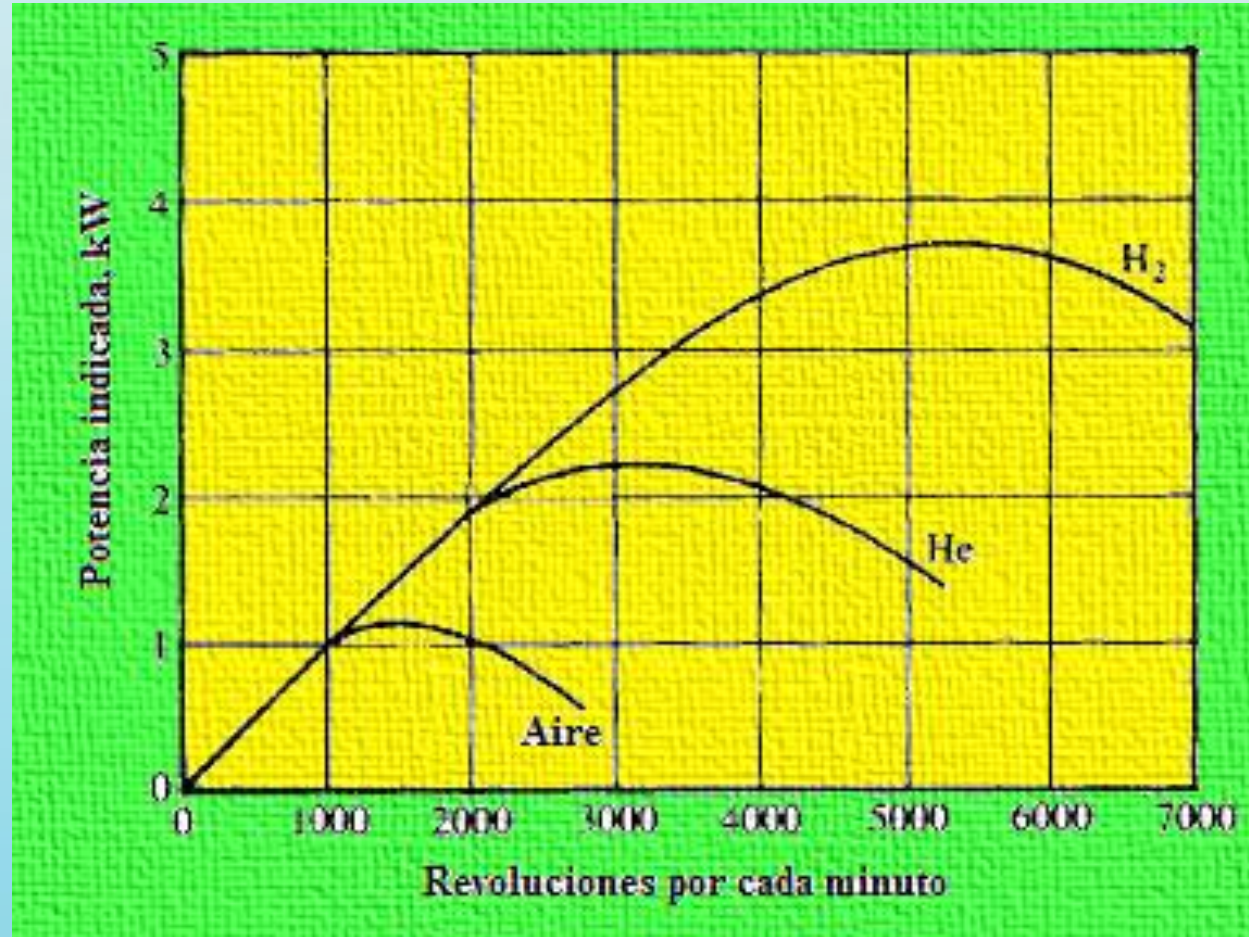
Desventajas

- Aceleración lenta.
- Mayor espacio (debido a los intercambiadores de calor).
- Altos costos de producción.
- Complejidad en su construcción
- Dificultad de obtener compresión y expansión isotérmica a alta velocidad (Wu, 2007).

Fluidos de trabajo (Lozano, 2009)

- El fluido de trabajo es el aire por su abundancia y fácil utilización.
- Desde el punto de vista energético, fluidos como el hidrógeno y el helio son más eficientes que el aire.
- Aunque el hidrógeno presenta el mejor comportamiento, no se recomienda por su alta inflamabilidad y efectos corrosivos a altas temperaturas.
- El helio, gas inerte, genera un buen rendimiento pero su costo es alto comparado con el costo del aire y del hidrógeno.

Comportamiento del Aire, Helio e Hidrógeno



Potencia indicada en función de la velocidad del motor para tres fluidos de trabajo diferentes (Organ, 1987)

Bibliografía

- Balmer, R. T. (2011). Modern Engineering Thermodynamics. Burlington USA: Elsevier Inc.
- Basshuysen, R. v., & Shafer, F. (2004). Combustion Engine Handbook. Warrendale, USA: SAE International.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). Termodinámica. México: McGraw-Hill.
- Cyberneticos. (7 de Diciembre de 2016). Mini motor Stirling. Obtenido de You tube mx: <https://www.youtube.com>
- ENGINE, J. (02 de Marzo de 2014). Qué es un motor Stirling. Obtenido de JEMS ENGINE: <https://jemsengine.wordpress.com/>

- Graham, W. (1973). The Striling Engine. Scientific American, 80-87.
- Graham, W. (1980). Stirling Engines. Oxford: Oxford University Press.
- Lane, N. (10 de October de 2016). The Stirling Engine Celebrates Its Bicentennial. Obtenido de Stirling Ultracold : <http://www.stirlingultracold.com>
- Lozano, J. C. (2009). Diseño y construcción de un prototipo de motor con base en el ciclo Stirling. Tekhnê, 3-11.
- Martini, W. R. (1983). Stirling Engine Design Manual. Washington: U S GOVERNMENT PRINTING OFFICE.
- Román, L. R. (12 de 12 de 1997). APLICACIONES DEL MOTOR STIRLING. Obtenido de ME-43A TERMOTECNIA: <http://www.cec.uchile.cl/~roroman/index.html>

- Škorpík, J. (Marzo de 2013). Stirling engine. Obtenido de TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE: www.transformacnitechologie.
- Wu, C. (2007). THERMODYNAMICS AND HEAT POWERED CYCLES: A COGNITIVE ENGINEERING APPROACH. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- ZARINCHANG, J., & YARMAHMOUDI, A. (2009). Optimization of Thermal Components in a Stirling Engine. WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER, 1-10.