

CICLOS TERMODINÁMICOS IDEALES

Motor Térmico de Carnot

La eficiencia de un ciclo de motor térmico depende en gran medida de cómo se ejecutan los procesos individuales que componen el ciclo. El trabajo neto, y por lo tanto la eficiencia del ciclo, se puede maximizar mediante el uso de procesos que requieren la menor cantidad de trabajo y entregan más, es decir, mediante el uso de procesos reversibles. Por lo tanto, no es de extrañar que los ciclos más eficientes sean ciclos reversibles, es decir, ciclos que consisten enteramente en procesos reversibles. Los ciclos reversibles no se pueden lograr en la práctica porque las irreversibilidades asociadas con cada proceso no se pueden eliminar. Sin embargo, los ciclos reversibles proporcionan límites superiores en el rendimiento de los ciclos reales.

Los motores térmicos y refrigeradores que funcionan en ciclos reversibles sirven como modelos con los que se pueden comparar los motores térmicos y refrigeradores reales. Los ciclos reversibles también sirven como puntos de partida en el desarrollo de ciclos reales y se modifican según sea necesario para cumplir con ciertos requisitos. Probablemente el ciclo reversible más conocido es el ciclo de Carnot, propuesto por primera vez en 1824 por el ingeniero francés Sadi Carnot. El motor térmico teórico que opera en el ciclo de Carnot se llama motor térmico de Carnot. El ciclo de Carnot se compone de cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos, y se puede ejecutar en un sistema cerrado o de flujo constante. En la Figura 1 se muestra el ciclo de funcionamiento del ciclo de Carnot (Çengel & Boles, 2009).

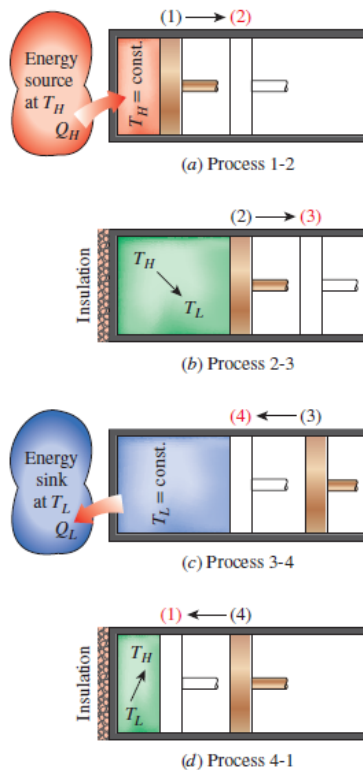


Figura 1. Ciclo de Carnot (Çengel & Boles, 2009).

1. **Expansión Isotérmica Reversible** (proceso 1-2, $T_H = \text{constante}$). Inicialmente (estado 1), la temperatura del gas es T_H y la culata está en estrecho contacto con una fuente a temperatura T_H . Se permite que el gas se expanda lentamente, trabajando en el entorno. A medida que el gas se expande, la temperatura del gas tiende a disminuir. Pero tan pronto como la temperatura desciende en una cantidad infinitesimal dT , se transfiere algo de calor del depósito al gas, elevando la temperatura del gas a T_H . Por tanto, la temperatura del gas se mantiene constante en T_H . Dado que la diferencia de temperatura entre el gas y el depósito nunca excede una cantidad diferencial dT , este es un proceso de transferencia de calor reversible. Continúa hasta que el pistón alcanza la posición 2. La cantidad de calor total transferido al gas durante este proceso es Q_H .

2. **Expansión adiabática reversible** (proceso 2-3, la temperatura desciende de T_H a T_L). En el estado 2, el depósito que estaba en contacto con la culata se retira y se reemplaza por aislamiento para que el sistema se vuelva adiabático. El gas continúa expandiéndose lentamente, trabajando en el entorno hasta que su temperatura desciende de T_H a T_L (estado 3). Se supone que el pistón no tiene fricción y que el proceso es cuasi-equilibrado, por lo que el proceso es reversible y adiabático.

3. **Compresión isotérmica reversible** (proceso 3-4, $T_L =$ constante). En el estado 3, se quita el aislamiento de la culata y el cilindro se pone en contacto con un sumidero a temperatura T_L . Ahora el pistón es empujado hacia adentro por una fuerza externa, haciendo trabajo sobre el gas. A medida que se comprime el gas, su temperatura tiende a aumentar. Pero tan pronto como aumenta en una cantidad infinitesimal dT , el calor se transfiere del gas al sumidero, lo que hace que la temperatura del gas descienda a T_L . Por tanto, la temperatura del gas permanece constante en T_L . Dado que la diferencia de temperatura entre el gas y el sumidero nunca excede una cantidad diferencial dT , este es un proceso de transferencia de calor reversible. Continúa hasta que el pistón alcanza el estado 4. La cantidad de calor rechazado del gas durante este proceso es Q_L .

4. **Compresión adiabática reversible** (proceso 4-1, la temperatura aumenta de T_L a T_H). El estado 4 es tal que cuando se retira el depósito de baja temperatura, el aislamiento se vuelve a colocar en la culata y el gas se comprime de manera reversible, por lo que el gas vuelve a su estado inicial (estado 1). La temperatura aumenta de T_L a T_H durante este proceso de compresión adiabática reversible, que completa el ciclo.

Ciclo de Carnot

El diagrama PV de este ciclo se muestra en la Figura 2. Recordando que en un diagrama PV el área bajo la curva del proceso representa el trabajo de frontera para procesos de cuasi-equilibrio (internamente reversibles), vemos que el área bajo la curva 1-2-3 es el trabajo realizado por el gas durante la parte de expansión del ciclo, y el área bajo la curva 3-4-1 es el trabajo realizado sobre el gas durante la parte de compresión del ciclo. El área encerrada por la ruta del ciclo (área 1-2-3-4-1) es la diferencia entre estos dos y representa el trabajo neto realizado durante el ciclo.

Tenga en cuenta que si actuamos con tacañería y comprimimos el gas en el estado 3 adiabáticamente en lugar de isotermicamente en un esfuerzo por salvar Q_L , terminaríamos de nuevo en el estado 2, volviendo sobre el camino del proceso 3-2. Al hacerlo, ahorraríamos Q_L , pero no podríamos obtener ningún resultado de trabajo neto de este motor. Esto ilustra una vez más la necesidad de un motor térmico que intercambie calor con al menos dos depósitos a diferentes temperaturas para funcionar en un ciclo y producir una cantidad neta de trabajo. El ciclo de Carnot también se puede ejecutar en un sistema de flujo constante. Al ser un ciclo reversible, el ciclo de Carnot es el ciclo más eficiente que opera entre dos límites de temperatura especificados. Aunque el ciclo de Carnot no se puede lograr en la realidad, la eficiencia de los ciclos reales se puede mejorar intentando aproximándose al ciclo de Carnot (Çengel & Boles, 2009).

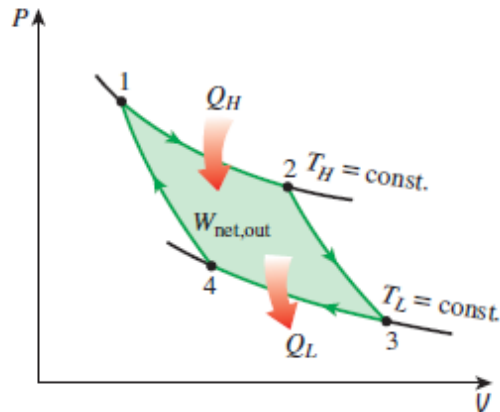


Figura 2. Diagrama del ciclo de Carnot (Çengel & Boles, 2009).

Ciclo Otto

El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes de encendido por chispa. Recibe ese nombre en honor a Nikolaus A. Otto, quien en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Frenchman Beau de Rochas en 1862. En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el émbolo ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos. Un diagrama esquemático de cada tiempo, así como el diagrama P-v para una máquina real de encendido por chispa de cuatro tiempos se presenta en la Figura 3. Inicialmente, tanto la válvula de admisión como la de escape están cerradas y el émbolo se encuentra en su posición más baja (PMI). Durante la carrera de compresión, el émbolo se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire y combustible. Un poco antes de que el émbolo alcance su posición más alta (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, con lo cual aumenta la presión y la temperatura del sistema. Los gases de alta presión impulsan al émbolo hacia abajo, el cual a su vez obliga a

rotar al cigüeñal, lo que produce una salida de trabajo útil durante la carrera de expansión o carrera de potencia. Al final de esta carrera, el émbolo se encuentra en su posición más baja (la terminación del primer ciclo mecánico) y el cilindro se llena con los productos de la combustión. Después el émbolo se mueve hacia arriba una vez más y evacua los gases de escape por la válvula de escape (carrera de escape), para descender por segunda vez extrayendo una mezcla fresca de aire y combustible a través de la válvula de admisión (carrera de admisión). Observe que la presión en el cilindro está un poco arriba del valor atmosférico durante la carrera de escape y un poco abajo durante la carrera de admisión (Çengel & Boles, 2009).

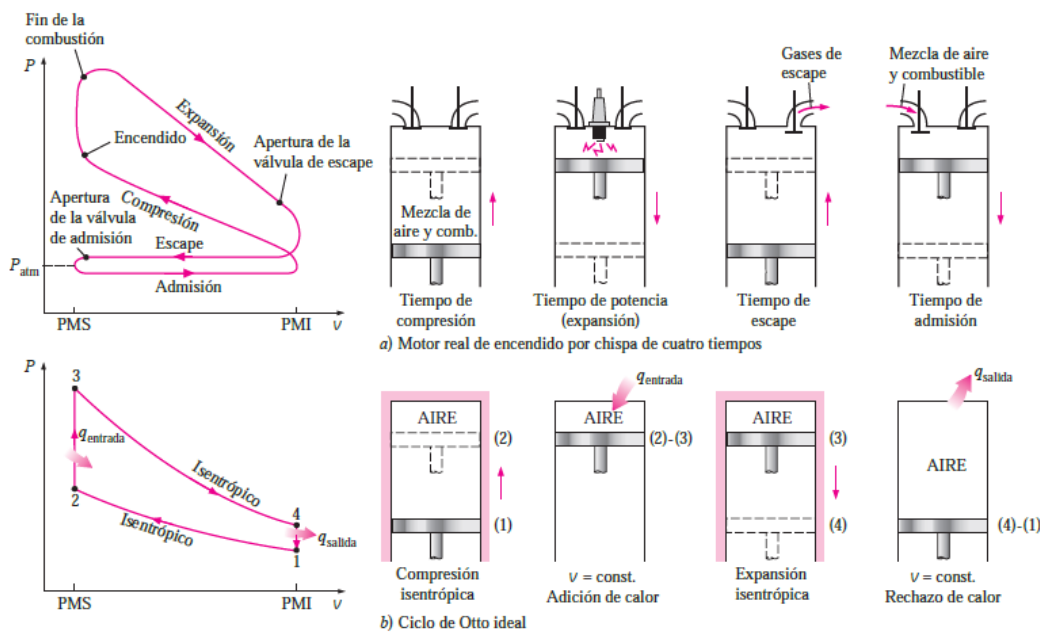


Figura 3. Ciclo de Otto (Çengel & Boles, 2009).

Ciclo Diesel

El ciclo Diesel es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes ECOM. El motor ECOM, por primera vez propuesto por Rudolph Diesel en la década de 1890, es muy similar al motor ECH estudiado en la última sección; la diferencia principal está en el método de inicio de la

combustión. En los motores de encendido por chispa (conocidos también como motores de gasolina), la mezcla de aire y combustible se comprime hasta una temperatura inferior a la temperatura de autoencendido del combustible y el proceso de combustión se inicia al encender una bujía. En los motores ECOM (también conocidos como motores diesel) el aire se comprime hasta una temperatura que es superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire caliente. Por lo tanto, en los motores diesel la bujía y el carburador son sustituidos por un inyector de combustible (Figura 4). En los motores de gasolina, una mezcla de aire y combustible se comprime durante la carrera de compresión, mientras que las relaciones de compresión están limitadas por el comienzo del autoencendido o el golpeteo del motor. En los diesel, solamente el aire se comprime durante la carrera de compresión, eliminando la posibilidad de autoencendido (Chung, 2001).

Por lo tanto, los motores diesel pueden ser diseñados para operar a relaciones de compresión mucho más altas, generalmente entre 12 y 24. No tener el problema del autoencendido conlleva otro beneficio: muchos de los exigentes requerimientos impuestos a la gasolina pueden ser eliminados, de manera que los combustibles menos refinados (y por lo tanto menos costosos) pueden utilizarse en los motores diesel. El proceso de inyección de combustible en los motores diesel empieza cuando el émbolo se aproxima al PMS y continúa durante la primera parte de la carrera de potencia. Por lo tanto, en estos motores el proceso de combustión sucede durante un período más largo. Debido a esta mayor duración, el proceso de combustión en el ciclo Diesel ideal se obtiene como un proceso de adición de calor a presión constante. De hecho, este es el único proceso donde los ciclos de Otto y Diesel difieren. Los tres procesos restantes son los mismos para ambos ciclos ideales. Es decir, el proceso 1-2 es una compresión isentrópica, el 3-4 una expansión

isentrópica y el 4-1 un rechazo de calor a volumen constante. La similitud entre los dos ciclos es también evidente (Çengel & Boles, 2009).

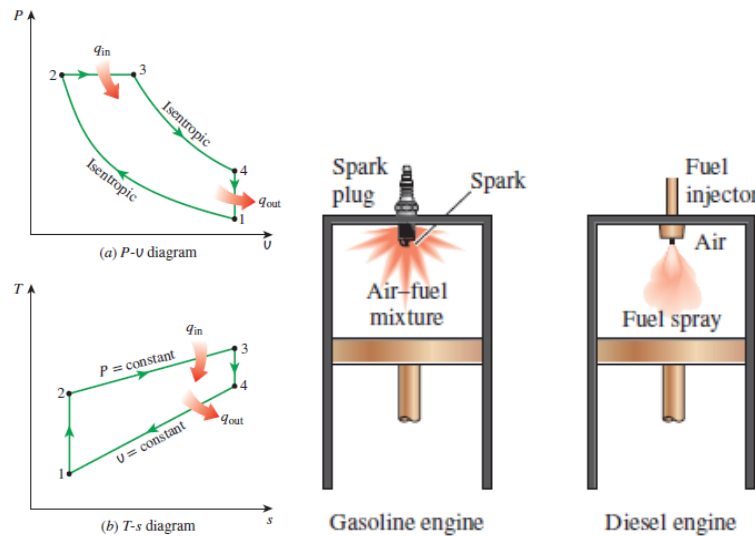


Figura 4. Ciclo Diesel (Çengel & Boles, 2009).

Ciclos Stirling y Ericsson

Los ciclos ideales de Otto y Diesel discutidos en las secciones anteriores se componen completamente de procesos internamente reversibles y, por lo tanto, son ciclos internamente reversibles. Sin embargo, estos ciclos no son totalmente reversibles, ya que implican transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita durante los procesos no isotérmicos de adición y rechazo de calor, que son irreversibles. Por lo tanto, la eficiencia térmica de un motor Otto o Diesel será menor que la de un motor Carnot operando entre los mismos límites de temperatura. Considere un motor térmico que funciona entre una fuente de calor en T_H y un disipador de calor en T_L . Para que el ciclo del motor térmico sea totalmente reversible, la diferencia de temperatura entre el fluido de trabajo y la fuente de calor (o disipador) nunca debe exceder una cantidad

diferencial dT durante cualquier proceso de transferencia de calor. Es decir, tanto el proceso de adición de calor como el de rechazo de calor durante el ciclo deben tener lugar de forma isotérmica, uno a una temperatura de T_H y el otro a una temperatura de T_L . Esto es precisamente lo que sucede en un ciclo de Carnot.

Hay otros dos ciclos que implican un proceso de adición de calor isotérmico en T_H y un proceso de rechazo de calor isotérmico en T_L : el ciclo de Stirling y el ciclo de Ericsson. Se diferencian del ciclo de Carnot en que los dos procesos isentrópicos son reemplazados por dos procesos de regeneración de volumen constante en el ciclo de Stirling y por dos procesos de regeneración de presión constante en el ciclo de Ericsson. Ambos ciclos utilizan la regeneración, un proceso durante el cual el calor se transfiere a un dispositivo de almacenamiento de energía térmica (llamado regenerador) durante una parte del ciclo y se transfiere de nuevo al fluido de trabajo durante otra parte del ciclo (Figura 13). y diagramas Pv del ciclo de Stirling, que se compone de cuatro procesos totalmente reversibles:

1-2 $T =$ expansión constante (adición de calor de la fuente externa)
2-3 $v =$ regeneración constante (transferencia de calor interna del fluido de trabajo al regenerador) 3-4 $T =$ compresión constante (rechazo de calor al sumidero externo) 4-1 $v =$ regeneración constante (transferencia de calor interna del regenerador al fluido de trabajo).

La ejecución del ciclo de Stirling requiere un hardware bastante innovador. Los motores Stirling reales, incluido el original patentado por Robert Stirling, son pesados y complicados. Para ahorrarle al lector las complejidades, la ejecución del ciclo de Stirling en un sistema cerrado se explica con la ayuda del motor hipotético, las comparaciones de los diferentes ciclos se muestran en la Figura 5.

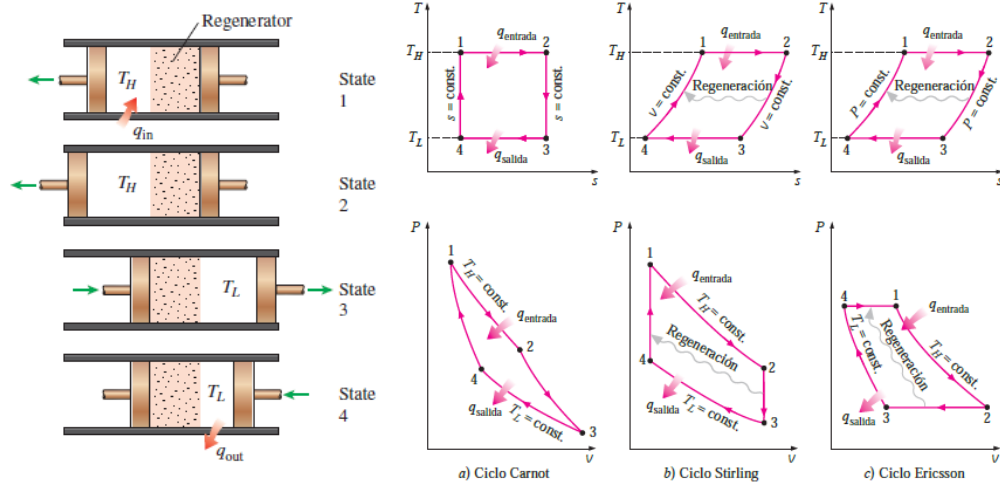


Figura 5. Diagramas T-s y P-v de los ciclos Carnot, Stirling y Ericsson (Çengel & Boles, 2009).

Referencias:

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica* (M. Á. T. Castellanos (ed.); Sexta). McGraw-Hill.

Chung, D. D. L. (2001). *Applied materials science: Applications of engineering materials in structural, electronics, thermal, and other industries*. In *Applied Materials Science: Applications of Engineering Materials in Structural, Electronics, Thermal, and Other Industries* (First). CRC Pr I Llc.

Pr I Llc