

Máquinas Térmicas

David Gómez



Física de Calor y Ondas

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

3 de diciembre de 2023

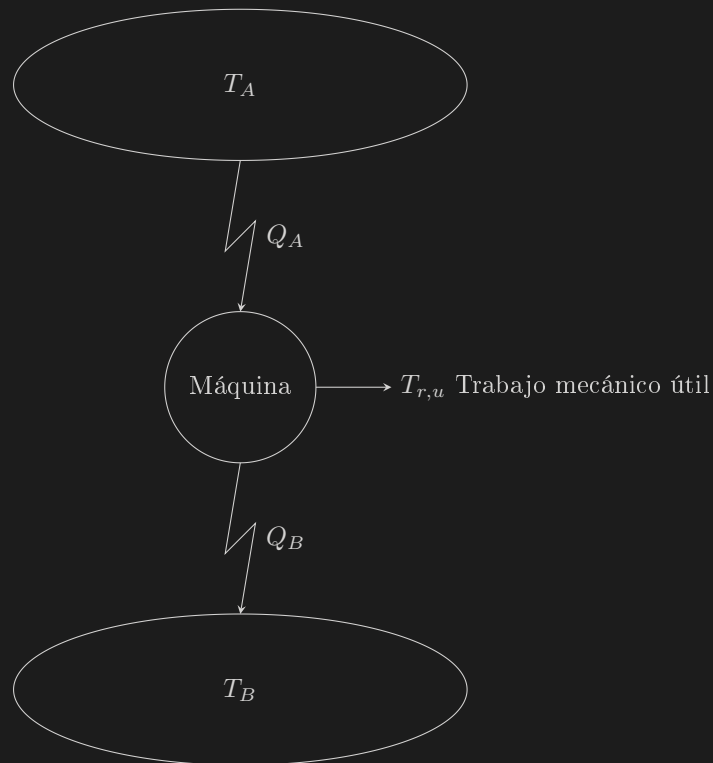
Índice

1. Introducción	2
2. Segunda Ley de la Termodinámica	4
3. Bombas Térmicas	5
4. Máquina de Carnot	8
5. El Ciclo Otto	10

1. Introducción

Recordando lo que es una máquina térmica:

Una máquina térmica es un sistema el cual recibe energía de tipo calor desde un reservorio a una temperatura T_A , generar con esta trabajo mecánico útil, y entrega energía de tipo calor a otro reservorio a temperatura T_B . Un reservorio es un sistema que permite el paso de energía de tipo calor sin alterar su temperatura.



Toda máquina térmica requiere de sustancia de trabajo, esta sustancia absorbe la energía Q_A y es la que, como intermediaria, permite la generación del trabajo útil. La eficiencia de una máquina térmica se puede medir en razón de cuanta energía de la que le entra es producida como trabajo, esto es:

$$\text{Eficiencia: } e = \frac{T_{r,u}}{Q_A}$$

Los intercambios de energía se dan en la sustancia de trabajo, la cual siempre está operando en un

ciclo. Esto es, en un plano presión - volumen, se pueden trazar diferentes procesos del funcionamiento de la máquina, y la sustancia de trabajo va a cambiar entre una serie de estados, pero siempre en un ciclo. Es decir, el último estado finaliza en donde empezó el primero.

Ya que la sustancia de trabajo tiene esta propiedad. Considerando todo un ciclo,

$$\Delta U = Q + T_r$$

$$\equiv \langle \text{ Se finaliza en el mismo estado en el que se inició } \rangle$$

$$Q = -T_r$$

Como $Q = Q_A - Q_B$ y $T_{r,u} = -T_r$ entonces la eficiencia se puede escribir como:

$$e = 1 - \frac{Q_B}{Q_A}$$

Un ejemplo de una máquina térmica es un motor de combustión, donde la sustancia de trabajo viene a ser la mezcla del combustible y el aire.

2. Segunda Ley de la Termodinámica

La segunda ley se puede expresar, desde el punto de vista de las máquinas térmicas de la siguiente manera:

No es posible construir o encontrar una máquina térmica la cual absorba una cantidad de energía tipo calor Q_A y la transforme en trabajo mecánico útil completamente. Es decir, toda máquina térmica expulsa tiene una eficiencia $e < 1$.

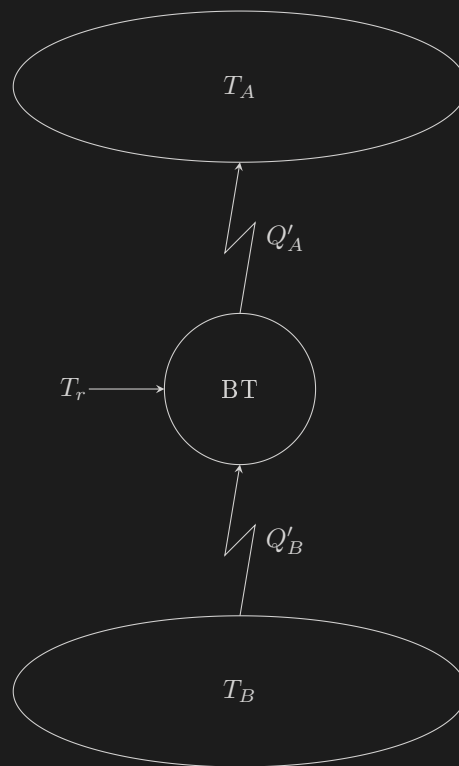
$$T_{r,u} < Q_A \wedge Q_B > 0$$

Todas las cantidades corresponden a las mencionadas en la introducción.

Dicho en otras palabras, todo proceso que se realice en el universo, aumenta la cantidad de posibles estados a los que puedan evolucionar los sistemas involucrados. Esto último es a veces llamado “desorden”. De ahí, que esta ley se exprese en ocasiones como que el desorden de todo sistema siempre está en aumento, en especial del universo entero. Desde el punto de vista de las máquinas térmicas, si $Q_B = 0$, este desorden disminuiría, lo cual entra en contradicción con la segunda ley.

3. Bombas Térmicas

Una bomba térmica (BT), es un dispositivo el cual tiene la capacidad de recibir trabajo externo, y operar en un sistema con dos reservorios, uno a temperatura T_A y otro a temperatura T_B con $T_B < T_A$. La BT absorbe una cantidad de calor Q'_B del reservorio a temperatura baja, y cede una cantidad de calor Q'_A al reservorio a temperatura alta.



De igual forma a las máquinas térmicas, la BT requiere una sustancia de trabajo, la cual también opera en un ciclo, por lo que, considerando este ciclo, los cambios de energía deben ser nulos, pues se retorna a la temperatura con la que comenzó.

$$\Delta U = Q + T_r$$

$$\equiv \langle \text{ Se finaliza en el mismo estado en el que se inició } \rangle$$

$$Q = -T_r$$

La transferencia neta de calor debe ser la energía que recibe, menos la energía que cede, así:

$$Q = Q'_B - Q'_A \quad \wedge \quad T_r = Q'_A - Q'_B$$

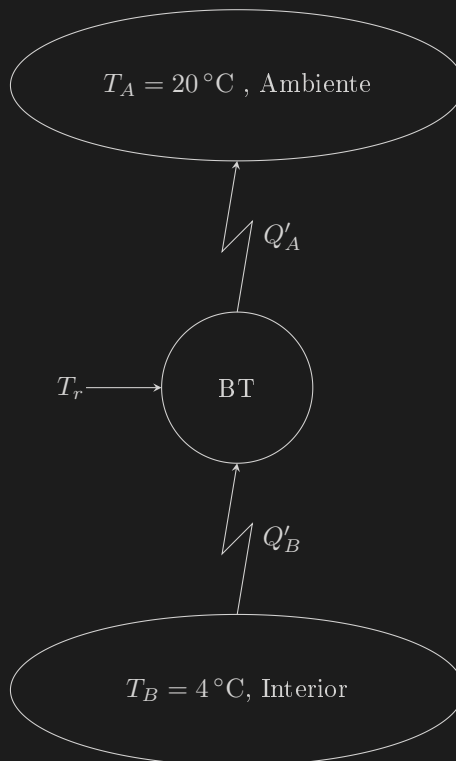
Igualmente, se puede medir la eficiencia de una BT, esto sería la razón entre la energía entregada y la energía recibida.

Debido a como funcionan, este cociente puede llegar a ser mayor que 1, por lo que no coincide del todo con la definición de eficiencia. Por esta razón se le da el nombre de coeficiente de operación, en estos casos.

Las BT, tienen dos modalidades:

(I) Refrigerador:

En esta modalidad, se busca enfriar un ambiente interno, por lo que los reservorios serían respectivamente, en el ejemplo de una nevera:



En este ejemplo, la sustancia de trabajo viene a ser un líquido, el cual tenga su temperatura de fusión bastante más baja que la temperatura deseada. Suponga -30°C . El trabajo es generado por la compresión y descompresión de este líquido, haciendo que pase de una temperatura a otra. El ciclo en el que se mantiene es:

- (i) El líquido va a una temperatura de -5°C .
- (ii) Al pasar por el serbitorio con temperatura interior, pasa a 4°C .
- (iii) Vuelve a la BT, de la cual sale al reservorio exterior a temperatura 30°C .
- (iv) Al pasar por el ambiente, cede calor y vuelve con temperatura 20°C . En la BT, vuelve a su temperatura inicial y repite el ciclo

(II) Calentador:

En esta modalidad, el proceso realmente es el mismo, sin embargo, ahora es el exterior el que está a menor temperatura, y el interior está a mayor. La diferencia radica únicamente en la perspectiva de cual de los dos entornos se quiere mantener a una temperatura no natural. Desde un punto de vista donde el entorno está a 4°C y un entorno interior (un cuarto por ejemplo) se quiere mantener a 20°C , se realiza el mismo proceso, solo que visto desde el otro punto de vista.

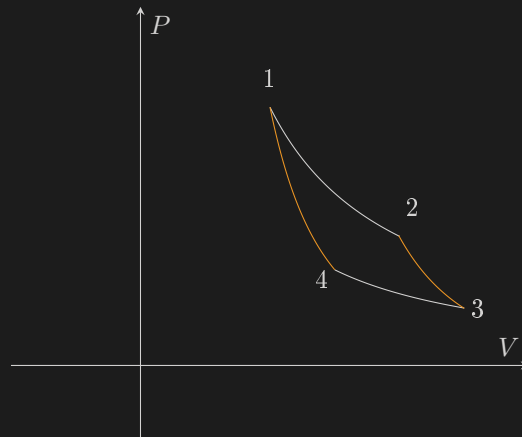
La segunda ley de la termodinámica también se puede expresar en términos de las BT:

No es posible construir o encontrar una BT la cual, sin recibir un trabajo externo, sea capaz de recibir una energía Q_B de un reservorio a temperatura baja T_B , y entregar una energía Q_A a otro reservorio a temperatura alta T_A .

$$T_r > 0$$

4. Máquina de Carnot

La máquina de Carnot es una máquina térmica la cual tiene la mayor eficiencia posible. Se caracteriza por el ciclo de su sustancia de trabajo, la cual consta de dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos.



Las temperaturas correspondientes a los procesos isotérmicos (1 a 2 y 3 a 4), serán llamadas T_1 y T_3 respectivamente.

Como los otros dos procesos son adiabáticos, por definición, la energía de tipo calor en estos es nula. Así, la eficiencia de esta máquina es:

$$e_c = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} = 1 - \frac{|Q_{3,4}|}{|Q_{1,2}|}$$

De los procesos isotérmicos, se tiene entonces que:

- $Q_{1,2} = n R T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$
- $Q_{3,4} = n R T_3 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right)$

De los procesos adiabáticos, se tiene que:

- $T_3 V_3^{\gamma-1} = T_1 V_2^{\gamma-1}$
- $T_3 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$

De esto último se deduce que

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{\gamma-1} &= \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{\gamma-1} \\ \equiv \\ \frac{V_1}{V_4} &= \frac{V_2}{V_3} \end{aligned}$$

Reemplazando en $Q_{3,4}$, y de ahí en la eficiencia, se tiene que:

$$e_c = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

La razón por la que esta es la máxima eficiencia posible se puede ver asumiendo que se tiene una máquina térmica con una eficiencia $e > e_c$, la cual alimenta una bomba térmica que vendría a ser una máquina de Carnot operando en sentido contrario al presentado. Esto resultaría en una nueva bomba térmica, la cual consiste en el conjunto de la máquina y la BT. El problema radica en que la suposición de una eficiencia mayor a e_c , resulta en que esta nueva bomba térmica, estaría absorbiendo energía de un reservorio a menor temperatura que el reservorio al que le está cediendo energía, todo esto sin recibir trabajo externo.

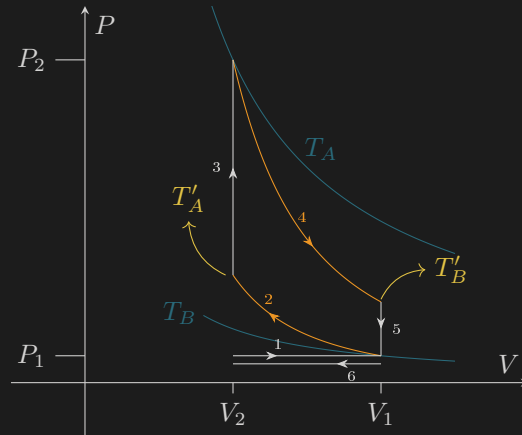
5. El Ciclo Otto

Un ejemplo de una máquina térmica es un motor de combustión, en especial el motor de ciclo Otto. Este ciclo es bien conocido por ser el usado en la mayoría de los motores de los vehículos actualmente.

Tomando V_1 como el volumen de la cámara cuando el pistón está en su punto más bajo, V_2 el volumen de la cámara cuando el pistón está en su punto más alto, P_1 la presión del ambiente y P_2 la presión en la cámara cuando el pistón comprime por completo al combustible.

- (I) En el momento en que la válvula de admisión se abre, permitiendo la de combustible, la presión es la misma del ambiente (P_1), y el volumen de la cámara pasa de V_2 a V_1 .
- (II) Una vez se cierra la válvula de admisión, el pistón empieza a subir, reduciendo el volumen en la cámara. En este momento el combustible se empieza a comprimir. Esto se puede aproximar a un proceso adiabático, pues se puede considerar que no hay transferencias de energía tipo calor, introduciendo una presión distinta a 1 o 2 a volumen V_2 .
- (III) Una vez comprimido, se genera una chispa, lo que genera a su vez una reacción con el combustible y una subida de presión súbita. Debido a la rapidez de la reacción, esto se puede aproximar a un proceso isométrico, con volumen V_2 .
- (IV) La reacción hace que el pistón baje. Nuevamente, se considera que no hay transferencias de calor durante el movimiento del pistón, por lo que se aproxima a otro proceso adiabático, el cual finaliza a otra presión, con volumen V_1 .
- (V) La válvula de escape se abre, generando una caída en la presión. Esto se aproxima a un proceso isométrico, a volumen V_1 .
- (VI) Por último, el pistón sube, liberando el gas a presión ambiente. Esto es un proceso isobárico a presión P_1 , de V_1 a V_2 .

Considerando Q_B el calor absorbido por la reacción de la chispa, y Q_A , el calor liberado tras el escape.



La eficiencia entonces es:

$$e_{\text{Otto}} = 1 - \frac{Q_B}{Q_A}$$

- De (II) se tiene que: $P_1 V_1^\gamma = \alpha_1$, con la ley de los gases ideales, se puede deducir que $T V^\gamma$ es constante en estos procesos. De ahí, $T'_B = T_B \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$.
- De forma similar, en (IV), se obtiene que $T'_A = T_A \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$.
- De (III) se tiene que $Q_A = n C_V (T_A - T'_B)$.
- De (V) se tiene que $Q_B = n C_V (T'_A - T_B)$.

Reemplazando T'_A y T'_B por lo obtenido de (II) y (IV), y computando el cociente de las energías de tipo calor para obtener la eficiencia, se obtiene que:

$$e_{\text{Otto}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1-\gamma}$$

Por ejemplo, un motor V12 a gasolina con 5204 cm^3 . Cada pistón entonces tendrá $433,667 \text{ cm}^3$. Si su relación de compresión (V_1/V_2) es de 9,3, entonces, su eficiencia será $1 - 9,3^{1-1,4} = 0,59$ que corresponde al 59 %