



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Teorema de Carnot para un motor térmico

Apellidos, nombre	Atarés Huerta, Lorena (loathue@tal.upv.es)
Departamento	Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	ETSIAMN (Universidad Politécnica de Valencia)



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a exponer conceptos termodinámicos: motor térmico, rendimiento, condiciones reversibles (idealizadas) e irreversibles (reales). A través de una deducción sencilla demostraremos el teorema de Carnot, que afirma que el rendimiento máximo de un motor térmico se obtiene si trabaja en condiciones ideales. Los motores reales por tanto no podrán nunca superar el rendimiento de la máquina de Carnot (idealizada), y en la práctica no lo podrán alcanzar.

2 Introducción

La termodinámica es la rama de la física que describe los estados de equilibrio termodinámico a nivel macroscópico. Esta disciplina se desarrolló en el contexto histórico previo a la revolución industrial, con el interés de mejorar el rendimiento de las máquinas térmicas (motores, refrigeradores y bombas de calor).

La segunda ley de la termodinámica se ha enunciado de diferentes maneras, una de las cuales recibe el nombre de Teorema de Carnot, objeto de este artículo docente. Este teorema establece que, una vez fijadas las temperaturas de los focos caliente y frío, el rendimiento máximo de un motor se conseguirá si trabaja en condiciones reversibles (idealizadas: con equilibrio térmico y sin rozamiento). Como consecuencia, cualquier motor real (que trabajará en condiciones irreversibles) tendrá un rendimiento inferior al de la máquina ideal. El rendimiento de las máquinas reales puede mejorarse en la medida en que trabajen en condiciones más próximas a la idealidad, puesto que de ese modo se minimizan las pérdidas de energía.

3 Objetivos

Con la redacción del presente artículo docente, se pretende que el alumnado sea capaz de:

- Comprender el concepto de rendimiento de un motor térmico
- Comprender el fundamento del teorema de Carnot
- Diferenciar entre un motor idealizado y un motor real, así como entre el rendimiento de ambos

4 Desarrollo

4.1 Rendimiento de un motor térmico

Un motor térmico es una máquina que transforma calor en trabajo, para lo cual funciona entre dos fuentes a temperaturas diferentes: un foco caliente y un foco frío. La fuente de calor suministra al motor el calor (q_1) necesario para realizar esa transformación, y la fuente fría absorbe las pérdidas de calor (q_2).

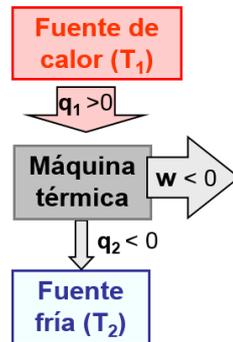


Figura 1: motor térmico trabajando entre una fuente de calor a la temperatura T_1 y una fuente fría a la temperatura T_2 ($T_2 < T_1$).

Dada la imposibilidad de crear o destruir energía, deberá cumplirse la igualdad entre los flujos de energía que entran al sistema (q_1) y los que salen del sistema (W y q_2). El rendimiento (e) de un motor térmico se define como el cociente entre el trabajo que se obtiene del motor ($-W$) y el calor que recibe de la fuente de calor (q_1). Dado que W sale del motor, se considera un flujo de energía con signo negativo y es necesario considerar $-W$ para obtener rendimiento positivo. En el caso de un motor perfecto, W y q_1 serían iguales y el rendimiento sería 1. Debido a las pérdidas de calor hacia el foco frío, el rendimiento será siempre menor que 1.

$$e = \frac{-W}{q_1}$$

Ecuación 1: rendimiento (e) de un motor térmico

El teorema de Carnot afirma que **el máximo rendimiento de un motor se consigue cuando trabaja de forma reversible**. Un motor trabaja de manera reversible cuando (1) el sistema permanece en equilibrio térmico con ambas fuentes alternativamente durante todo el proceso y (2) no existe rozamiento de la pared móvil, y por lo tanto no hay una pérdida de calor debida a esta causa. A continuación, se va a demostrar este principio.

4.2 Teorema de Carnot

Consideremos dos focos a diferentes temperaturas, y dos motores funcionando en paralelo entre ellos. Uno de los motores funciona de manera reversible (idealizado) y el otro de modo irreversible (real). Se les designará respectivamente como "R" e "I". Veamos ahora, analizando diferentes posibilidades, cuál de los dos tendrá mayor rendimiento.

4.2.1 ¿Es posible que la máquina irreversible tenga mayor rendimiento que la reversible?

Consideremos que cada uno de los dos motores recibe calor de la fuente a mayor temperatura, y que el rendimiento de la máquina I es mayor que el de la máquina R (hipótesis contraria al teorema de Carnot). En la figura 2 se muestra un ejemplo de esta situación con valores numéricos para todos los flujos de energía. En la máquina I el rendimiento sería 0.75 ($60/80$) y el de R sería 0.60 ($60/100$), cumpliéndose por tanto que $e_I > e_R$.

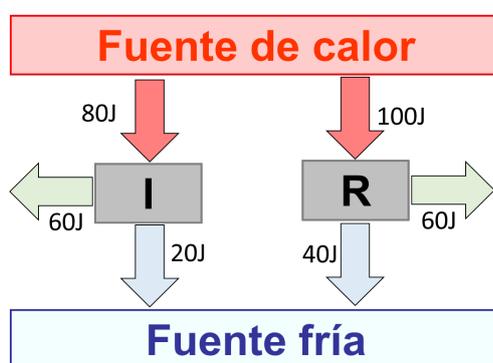


Figura 2: dos máquinas (irreversible y reversible) funcionando en paralelo entre dos focos a diferentes temperaturas. El rendimiento mayor es el de I.

Veamos ahora si efectivamente esta situación puede darse. Para ello, se debe considerar que, puesto que la máquina reversible puede funcionar en ambos sentidos, invierte su funcionamiento. De este modo, R pasará a tomar calor de la fuente fría y cederlo al foco caliente, para lo cual necesita un aporte de trabajo. Consideremos también que ese flujo de trabajo procediera de la máquina I, de tal modo que ambas máquinas funcionarían de manera acoplada, formando así una máquina conjunta.

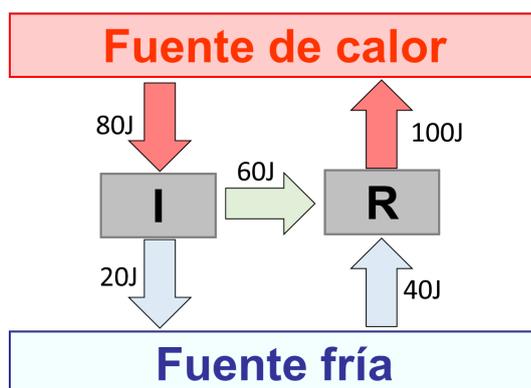


Figura 3: dos máquinas (irreversible y reversible) funcionando acopladas, donde el rendimiento de I es mayor que el de R.

Para analizar cómo la máquina conjunta intercambia calor con ambas fuentes, conviene trazar una línea alrededor de las máquinas, tal y como ves en la figura 4.

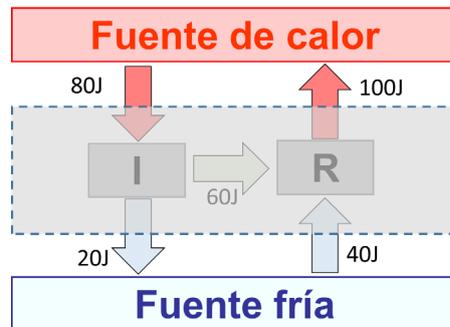


Figura 4: máquina conjunta (I+R) funcionando entre dos fuentes de calor

La máquina conjunta estaría por un lado recibiendo 80J de la fuente de calor, y por otro cediéndole 100J, por tanto el flujo neto sería 20J desde la máquina hacia la fuente de calor. En cuanto al intercambio con la fuente fría, puesto que la máquina conjunta estaría recibiendo 40J y cediendo 20J, el flujo neto sería una entrada de 20J. Ambos flujos netos se muestran en la figura 5.



Figura 5: flujos netos de energía que la máquina conjunta intercambia con las fuentes de calor, para $e_I > e_R$.

Puede verse finalmente cómo, a partir de la hipótesis inicial ($e_I > e_R$), se llega a una conclusión imposible, puesto que ninguna máquina puede desplazar calor de un foco frío a otro a mayor temperatura sin invertir trabajo (enunciado de Clausius de la segunda ley de la termodinámica). Como respuesta a la pregunta que titula este apartado, obtenemos un rotundo **NO**, y concluimos entonces que es imposible que el rendimiento de la máquina irreversible sea mayor que el de la máquina reversible.

4.2.2. ¿Es posible que ambas máquinas tengan el mismo rendimiento?

Si se realiza una deducción paralela considerando rendimientos iguales para ambas máquinas, al definir la máquina conjunta se observaría cómo los flujos de energía se anularían. Esa máquina no estaría intercambiando calor con ninguna de las dos fuentes, algo también imposible puesto que contradice el sentido natural de flujo del calor.

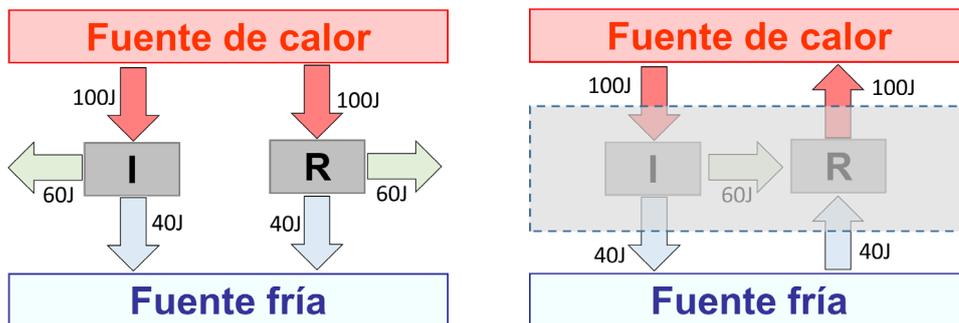


Figura 6: dos máquinas (irreversible y reversible) de igual rendimiento funcionando en paralelo entre dos focos a diferentes temperaturas (izquierda). Al acoplarlas se anulan los flujos de calor con ambas fuentes (derecha).

De nuevo respondemos con un rotundo **NO** a la pregunta que se hace en el título de este apartado.

4.2.3. La máquina reversible tiene mayor rendimiento que la irreversible

Por último, comprobemos la hipótesis correcta: el rendimiento mayor será el de la máquina R. De nuevo planteamos las máquinas funcionando en paralelo, con $e_R > e_I$. Para este ejemplo numérico concreto, e_I es 0.5 (60/120) y e_R es 0.6 (60/100).

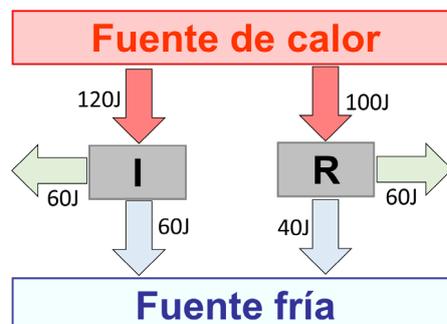


Figura 7: dos máquinas (irreversible y reversible) funcionando en paralelo entre dos focos a diferentes temperaturas. El rendimiento mayor es el de R.

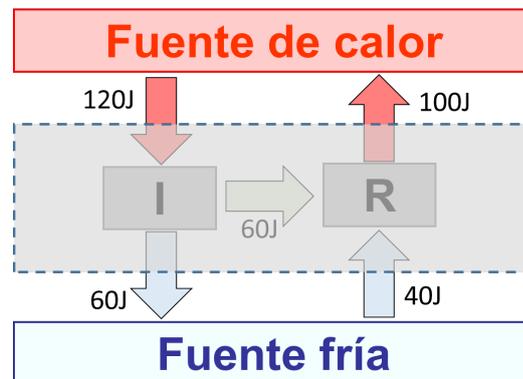


Figura 8: máquina conjunta (I+R) funcionando entre dos fuentes de calor, donde el rendimiento mayor es el de R

Al acoplar ambas máquinas se observa que la máquina conjunta toma 20J de calor de la fuente a mayor temperatura y los cede a la fuente fría, en el sentido espontáneo de transporte de calor (desde allí donde la temperatura es mayor hacia donde la temperatura es menor). Se comprueba así la hipótesis que afirma el mayor rendimiento de la máquina reversible, demostrando el teorema de Carnot.

5 Cierre

En este artículo docente hemos expuesto el teorema de Carnot, que afirma que para unas T_1 y T_2 determinadas, el rendimiento de un motor térmico será máximo si trabaja de manera reversible. Así pues, este motor idealizado (motor de Carnot) tendrá el rendimiento máximo alcanzable para un par de temperaturas T_1 y T_2 dadas.

En la práctica, los motores térmicos no funcionan en condiciones reversibles, puesto que en la realidad no se alcanza equilibrio térmico del sistema con las fuentes y sí que hay rozamiento. En la medida en que, en el diseño de un motor real, se pueda permanecer más cerca del equilibrio térmico y minimizar el rozamiento, ese motor real estará funcionando más cerca de las condiciones de idealidad, se parecerá más al motor de Carnot y su rendimiento será mayor (más parecido al motor de Carnot).

6 Bibliografía

6.1 Libros:

[1] FISICOQUÍMICA. Levine, I. N. McGraw-Hill. 1991

[2] FISICOQUÍMICA. Metz, C.R. Ed. McGraw-Hill. Interamericana. 1991