

# SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Fís. Carlos Adrián Jiménez Carballo  
Escuela de Física  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

## Objetivos

El estudiante debe ser capaz de:

- Interpretar los conceptos de máquinas térmicas y refrigeradores.
- Diferenciar entre un proceso reversible y uno irreversible.
- Calcular la eficiencia de una máquina térmica.
- Calcular el rendimiento de un refrigerador.
- Identificar el ciclo de Carnot, el ciclo de Otto y el ciclo de Diesel.
- Interpretar la segunda ley de la termodinámica.
- Interpretar el concepto de entropía.
- Calcular la entropía de procesos reversibles y procesos irreversibles.

## Conocimientos previos

Para esta sección los estudiantes deben tener conocimientos previos en

- Matemática básica.
- Cálculo diferencial, principalmente los conceptos de derivada e integral
- Física general, principalmente los conceptos de mecánica clásica, como por ejemplo las leyes de newton, los conceptos de posición, distancia, velocidad y aceleración, las definiciones de energía cinética, energía potencial y energía mecánica.

## Contenido

Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

Segunda Ley de la Termodinámica

Máquina y refrigerador de Carnot

Entropía y la segunda ley de la termodinámica

# Contenido

## Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

Segunda Ley de la Termodinámica

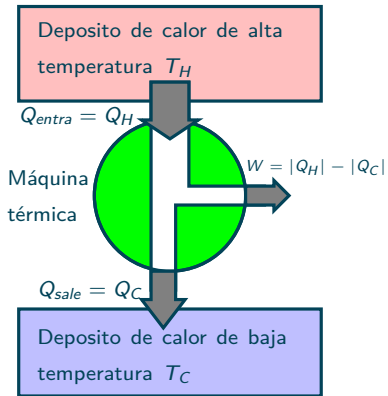
Máquina y refrigerador de Carnot

Entropía y la segunda ley de la termodinámica

## Máquinas térmicas

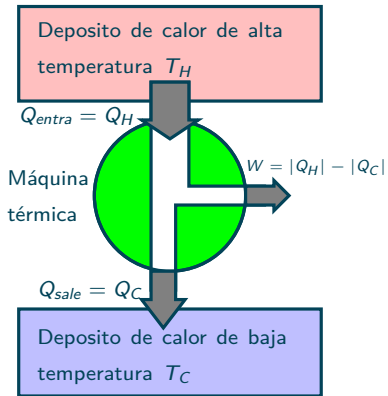
Una **máquina térmica** es cualquier dispositivo que convierte energía calorífica en trabajo mecánico.

Las máquinas térmicas utilizan una sustancia de trabajo, por ejemplo, para el caso de los motores de combustión interna (como un automóvil) la sustancia de trabajo es una mezcla de aire y combustible, en una máquina de vapor es el agua. Dentro de la máquina la sustancia de trabajo experimenta entrada y salida de calor, expansión y compresión, y algunas veces puede cambiar de fase.



## Calor y trabajo en una máquina térmica

Todas las máquinas térmicas absorben calor  $Q_H(> 0)$  de un depósito de calor de alta temperatura  $T_H$ , realizan un trabajo mecánico  $W(> 0)$  y desechan algo de calor  $Q_C(< 0)$  en un depósito de calor a temperatura baja  $T_C$ . En lo que a la máquina concierne, el calor desechado se desperdicia. En los motores de combustión interna, éste es el calor que se elimina en los gases de escape y en el sistema de enfriamiento.



## Eficiencia de una máquina térmica

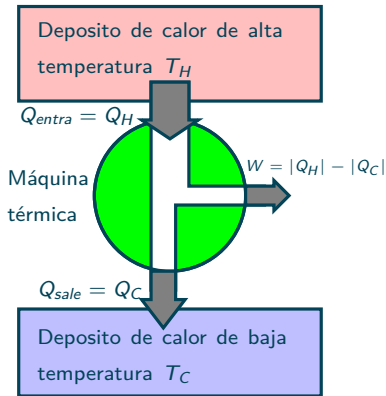
La **eficiencia de una maquina** se define como

$$e = \frac{W}{Q_H},$$

lo cual indica cuanto trabajo mecánico realiza la máquina a partir de la energía que se le trasfiere  $Q_H$ .

El trabajo neto realizado por la máquina se determina  $W = |Q_H| - |Q_C|$  con lo que la eficiencia térmica de la máquina se determina

$$e = 1 - \left| \frac{Q_C}{Q_H} \right|.$$





# Contenido

Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

Segunda Ley de la Termodinámica

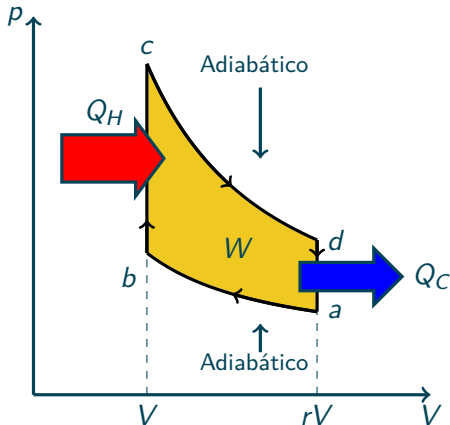
Máquina y refrigerador de Carnot

Entropía y la segunda ley de la termodinámica

## Motores de gasolina: Ciclo de Otto

El **ciclo de Otto** es un modelo idealizado de los procesos termodinámicos en un motor de gasolina. Dicho ciclo consta de

- Proceso de compresión adiabática  $a \rightarrow b$
- Calentamiento a volumen constante, proceso  $b \rightarrow c$
- Proceso de expansión adiabática  $c \rightarrow d$
- Enfriamiento a volumen constante, proceso  $d \rightarrow a$



## Eficiencia ciclo de Otto

Se puede mostrar usando la primera ley de la termodinámica

$$Q_H = nC_V(T_c - T_b) \quad Q_C = nC_V(T_a - T_d)$$

Usando la definición de eficiencia de una máquina térmica se tiene para el ciclo de Otto

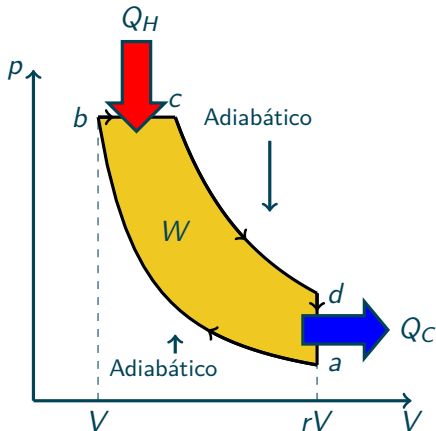
$$e = \frac{T_c - T_b + T_a - T_d}{T_c - T_b} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

donde  $r$  se conoce como razón de compresión; el cual para motores de automóviles modernos suele estar entre 8 y 10.

## Motores de Diesel: Ciclo de Diesel

El **ciclo de Diesel** es un modelo idealizado de los procesos termodinámicos en un motor de diesel. Dicho ciclo consta de

- Proceso de compresión adiabática  $a \rightarrow b$
- Calentamiento a presión constante, proceso  $b \rightarrow c$
- Proceso de expansión adiabática  $c \rightarrow d$
- Enfriamiento a volumen constante, proceso  $d \rightarrow a$



# Contenido

Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

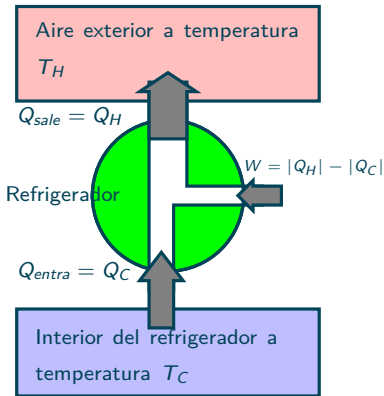
Segunda Ley de la Termodinámica

Máquina y refrigerador de Carnot

Entropía y la segunda ley de la termodinámica

## Refrigeradores

La función que desempeña un **refrigerador** es básicamente opuesta a la de una máquina térmica. Una máquina térmica toma calor de un lugar caliente y cede calor a un lugar más frío mientras que un refrigerador extrae calor  $Q_C (> 0)$  de un lugar frío  $T_C$  (el interior del refrigerador) y cede calor  $Q_H$  a un lugar más caliente  $T_H$  (aire del exterior). Una máquina térmica tiene una salida neta de trabajo mecánico en cambio el refrigerador requiere de una entrada neta de trabajo mecánico.



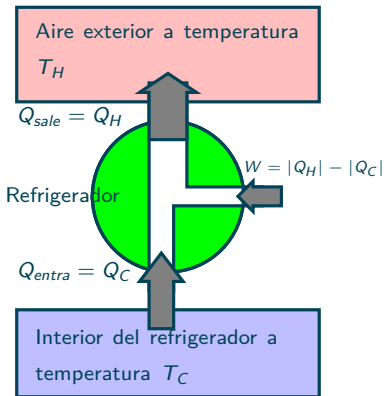
## Coeficiente de rendimiento de un refrigerador

El coeficiente de rendimiento de un refrigerador es la razón entre el calor  $Q_C$  extraído del interior del refrigerador y el trabajo aportado  $W$

$$K = |Q_C| / |W|$$

cuanto mayor sea  $K$ , mejor será el desempeño. Durante el funcionamiento normal de un refrigerador, el aporte de trabajo  $W$  es menor que el calor extraído  $Q_C$ , así que  $K$  es mayor a 1. Con ayuda de la primera ley de la termodinámica se tiene  $W = Q_H - Q_C$  lo que lleva a

$$K = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|}$$



# Contenido

Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

Segunda Ley de la Termodinámica

Máquina y refrigerador de Carnot

Entropía y la segunda ley de la termodinámica



## Segunda Ley de La Termodinámica

La **segunda ley de la termodinámica** indica ciertos procesos no suceden, o que nunca se ha observado que sucedan, aunque sean congruentes con la primera ley.

Existen muchos planteamientos equivalentes de la segunda ley, redactados según su aplicación. Entre ellos se encuentran los siguientes

- El calor fluye espontáneamente de un cuerpo más caliente a uno más frío.
- En un ciclo térmico, la energía calorífica absorbida no puede transformarse totalmente en trabajo mecánico. Las pruebas experimentales sugieren que es imposible construir una máquina térmica que convierta calor totalmente en trabajo, es decir, una máquina con una eficiencia térmica del 100 %.
- Es imposible construir una máquina funcional de movimiento perpetuo. Se ha intentado sin éxito construir máquinas así.

En general, la segunda ley de la termodinámica es válida para todas las formas de energía. Se le considera cierta porque nadie ha encontrado jamás una excepción a ella.

## Contenido

Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

Segunda Ley de la Termodinámica

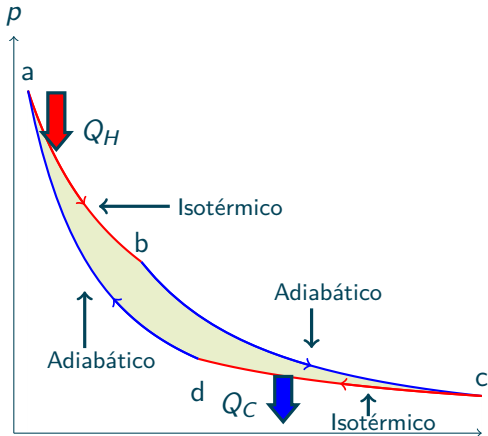
**Máquina y refrigerador de Carnot**

Entropía y la segunda ley de la termodinámica

## Ciclo de Carnot

Es un proceso reversible el cual consiste de :

- ★ El gas se expande isotérmicamente a temperatura  $T_H$ , absorbiendo calor  $Q_H$  ( $ab$ ).
- ★ El gas se expande adiabáticamente hasta que su temperatura baja a  $T_C$  ( $bc$ ).
- ★ El gas se comprime isotérmicamente a  $T_C$ , expulsando calor
- ★ El gas se comprime adiabáticamente hasta su estado inicial a temperatura  $T_H$



## Máquina térmica y refrigerador de Carnot

Una **máquina de Carnot** es una máquina idealizada que cumple con el ciclo de Carnot y es la máquina térmica con la eficiencia máxima posible de acuerdo con la segunda Ley de la Termodinámica.

La eficiencia de una máquina de Carnot se determina

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H}.$$

La ecuación anterior expresa la eficiencia de una máquina de Carnot y establece un límite superior para la eficiencia de una máquina real, como una turbina de vapor.

Dado que cada paso del ciclo de Carnot es reversible, todo el ciclo podría revertirse, convirtiendo la máquina en refrigerador. El coeficiente de rendimiento del refrigerador de Carnot se obtiene combinando la definición general de  $K$ :

$$K = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

## Principios de Carnot

- La eficiencia de cualquier máquina térmica que opere entre dos temperaturas específicas nunca podrá superar la eficiencia de una máquina de Carnot
- Todas las máquinas de Carnot que operan entre las mismas dos temperaturas tienen la misma eficiencia, sea cual fuere la naturaleza de la sustancia de trabajo
- Ningún refrigerador puede tener un coeficiente de rendimiento mayor que el de un refrigerador de Carnot que opera entre las mismas dos temperaturas.

## Contenido

Maquinas térmicas

Motores de combustión interna

Refrigeradores

Segunda Ley de la Termodinámica

Máquina y refrigerador de Carnot

Entropía y la segunda ley de la termodinámica

## Entropía y la segunda ley de la termodinámica

La **entropía** es una propiedad que indica la dirección natural de un proceso. El concepto de entropía tiene muchas interpretaciones físicas diferentes entre las que están.

- La entropía es una medida del desorden.
- La entropía es una medida de la capacidad que tiene un sistema para realizar trabajo útil.
- La entropía determina la dirección del tiempo.

El cambio de entropía de un proceso se puede determinar:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

La segunda ley de la termodinámica se puede plantear en términos de la entropía de la siguientes manera ***“Durante cualquier proceso, la entropía del Universo sólo puede aumentar o permanecer constante, lo que significa  $\Delta S \geq 0.$ ”***

## Procesos irreversibles

Un **proceso irreversible** es un proceso que se efectúa espontáneamente en una dirección pero no en otra. Los procesos irreversibles no están en equilibrio, en el sentido a que el sistema no está en equilibrio termodinámico en ningún punto hasta el final del proceso. La palabra “irreversible” no implica que el sistema no es capaz de regresar a su estado inicial si no que no es posible volver por el mismo camino exactamente, debido a las condiciones de no equilibrio que existieron. Todos los procesos termodinámicos que se dan en la naturaleza son procesos irreversibles.



## Ejemplos de procesos irreversibles

Algunos ejemplos de procesos irreversibles son:

- el flujo de calor de un cuerpo caliente a uno más frío es irreversible,
- la expansión libre de un gas y la conversión de trabajo en calor por fricción son procesos irreversibles,
- un movimiento con fricción,
- la transferencia de energía como calor debido a diferencia de temperatura,
- mezcla de materia de diversa composición o estado.

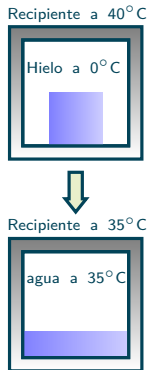


Figura: Proceso irreversible

## Proceso reversible

Un **proceso reversible** es un proceso idealizado en el que se puede cambiar la dirección de un proceso. Dichos procesos siempre están muy cerca del equilibrio termodinámico dentro de sí y con su entorno. Por lo general los procesos reversibles cumplen las siguientes condiciones:

- son procesos cuasiestáticos (el sistema siempre se encuentre en un estado de equilibrio termodinámico,
- no presentan transformaciones de energía mecánica en térmica por debido a fuerzas disipativas,
- La transferencia de energía como el calor sólo puede suceder cuando las diferencias de temperatura entre los objetos son infinitesimales.

## Ejemplos de procesos reversibles

Algunos ejemplos de procesos reversibles son:

- transferencia de energía como calor por diferencias infinitesimales de la temperatura,
- reacción química restringida
- el movimiento sin fricción,
- la expansión o compresión restringida.



Figura: Proceso reversible

## Entropía y procesos reversibles e irreversibles

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica durante cualquier proceso, la entropía del Universo sólo puede aumentar o permanecer constante, lo que significa  $\Delta S \geq 0$ .

De acuerdo con lo anterior para un proceso reversible se debe cumplir

$$\Delta S = 0$$

Para un proceso irreversible se debe cumplir

$$\Delta S > 0$$

## Relaciones importantes

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

$$e = \frac{W}{Q_H}$$

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

$$K = \left| \frac{Q_C}{W} \right|$$

$$K = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

**Todas las fórmulas que no aparecen aquí deben ser demostradas en el examen**

## Bibliografía

- Sears, F.W., Zemansky, M.W., Young, H.D., Freedman, R.A. (2013). *Física Universitaria*. Volumen I. Décimo tercera edición. México: Pearson Education.
- Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. (2013). *Física*. Volumen I. 5ta. Edición. México: Grupo Editorial Patria.
- Wilson, J.D., Buffa, A.J. y Lou, B. (2007). *Física*. 6ta Edición. México: Pearson educación.
- Schroeder D. V. (1999). *An Introduction to Thermal Physics*. 1era Edición. San Francisco: Addison Wesley Longman.

## Créditos

- Vicerrectoría de Docencia
- CEDA - TEC Digital
- Proyecto de Virtualización 2016-2017
- Física General III
- Fís. Carlos Adrián Jiménez Carballo (profesor)
- Ing. Paula Morales Rodríguez (coordinadora de diseño)
- Andrés Salazar Trejos (Asistente)