

# **Trabajo en los procesos termodinámicos**

# Trabajo en los procesos termodinámicos: variables de estado

En termodinámica, **el estado macroscópico** de un sistema mediante magnitudes tales como la presión, el volumen, la temperatura y la energía interna. Por eso a estas magnitudes se las denomina como **variables de estado**.

Para cualquier condición dada del sistema, podemos identificar los valores de las variables de estado

Pero, para definirla es necesario darse cuenta de que el estado macroscópico de un sistema sólo puede quedar especificado si el sistema se encuentra en equilibrio térmico interno

Por ejemplo, en el caso de un gas contenido en un recipiente, el equilibrio térmico interno exige que todas las partes del gas estén a la misma presión y temperatura

Las variables de estado son características de un sistema en equilibrio térmico

# **Trabajo en los procesos termodinámicos: variables de transferencia**

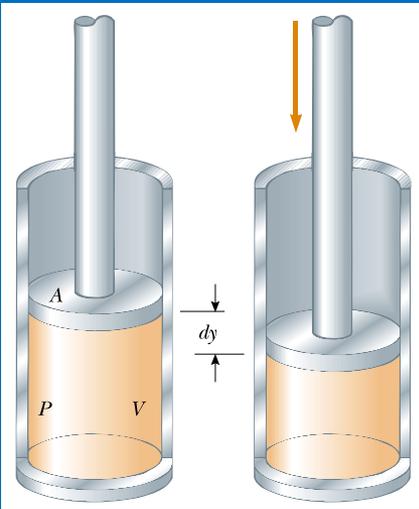
**Estas variables sólo tienen un valor distinto de cero si tiene lugar un proceso en el que se transfiera energía a través de los límites del sistema**

**No están asociadas a un estado determinado del sistema,  
sino a un cambio en el estado del mismo**

**Las variables de transferencia son características de un proceso en el que se transfiere energía entre un sistema y su entorno**

# Trabajo en los procesos termodinámicos: trabajo realizado sobre un sistema deformable (gas)

Supongamos un gas en equilibrio térmico contenido en un recipiente cilíndrico cerrado mediante un émbolo móvil y sin rozamiento de área  $A$



El gas ocupa un volumen  $V$  y ejerce una presión uniforme  $P$  sobre las paredes del cilindro y del émbolo

Supongamos que el gas se comprime cuasi-estáticamente (lo suficientemente despacio como para conseguir que el sistema esté en equilibrio térmico en todo momento)

Cuando una fuerza exterior empuja el émbolo hacia el interior del cilindro (si tomamos el eje  $y$  creciendo hacia arriba, la fuerza tendrá signo negativo), desplazándolo una distancia  $d\vec{r} = dy \vec{j}$

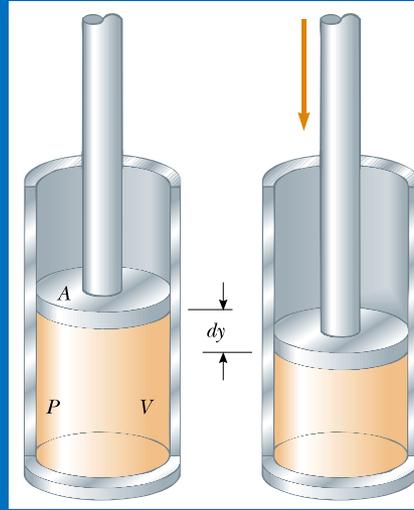
El trabajo realizado **sobre el gas**

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} = -F \vec{j} \cdot dy \vec{j} = -F dy = -P A dy$$

Dado que  $A dy = dV$  es la variación del volumen del gas

$$dW = -P dV$$

# Trabajo en los procesos termodinámicos: trabajo realizado sobre un sistema deformable (gas)



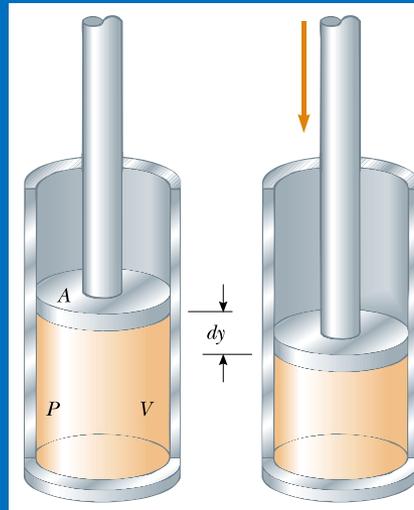
$$dW = -PdV$$

Si se comprime el gas  $dV$  es negativo y el trabajo realizado sobre el gas es positivo

Si se expande el gas  $dV$  es positivo y el trabajo realizado sobre el gas es negativo

Si el volumen permanece constante, el trabajo realizado sobre el gas es cero

# Trabajo en los procesos termodinámicos: trabajo realizado sobre un sistema deformable (gas)



$$dW = -PdV$$

El trabajo total realizado sobre el gas cuando el volumen varía de  $V_i$  a  $V_f$  es

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} PdV$$

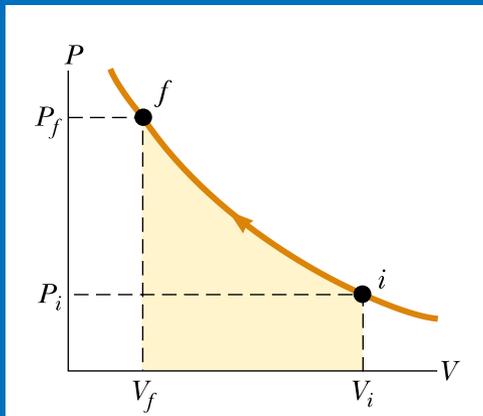
Para evaluar esta integral es necesario saber cómo varía la presión en función del volumen durante el proceso de expansión

# Trabajo en los procesos termodinámicos: trabajo realizado sobre un sistema deformable (gas)

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

En general, la presión no es constante durante el proceso que lleva un gas desde el estado inicial hasta un cierto estado final

Si la presión y el volumen son conocidos en cada paso del proceso, podemos dibujar el estado del sistema en cada paso del proceso en un **diagrama  $PV$**



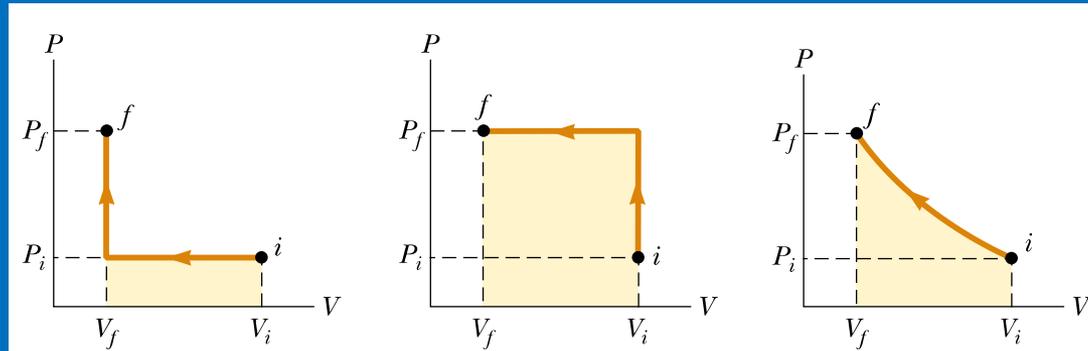
La curva representada es la trayectoria seguida entre los estados inicial y final

**El trabajo realizado sobre un gas en un proceso cuasi-estático que lo lleve desde un estado inicial a un estado final es igual al área (con signo negativo) situada bajo la curva del diagrama  $PV$ , evaluada entre los puntos inicial y final**

# Trabajo en los procesos termodinámicos: trabajo realizado sobre un sistema deformable (gas)

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

Para el caso de la compresión de un gas contenido en un cilindro,  
el trabajo realizado depende de la trayectoria seguida entre el  
estado inicial y el estado final



$$W = -P_i (V_f - V_i)$$

$$W = -P_f (V_f - V_i)$$

**La función  $P(V)$   
debe ser conocida**

# Primera ley de la termodinámica

Es un caso particular de la ley de conservación de la energía, en la cual:

- la única variación en la energía de un sistema se produce en su energía interna  $E_{\text{int}}$
- los únicos mecanismos de transferencia de energía son el calor  $Q$  y el trabajo  $W$

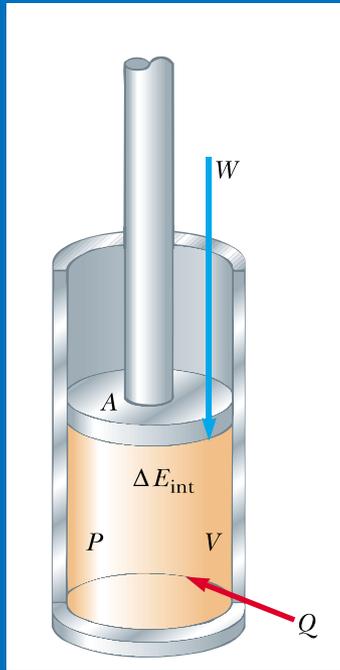
$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

**La variación de la energía interna de un sistema es igual a la suma de la energía transferida a través de los límites del sistema por medio de calor y la transferida por medio de trabajo**

Aunque el calor y el trabajo considerados por separado dependan del camino recorrido para conectar los estados inicial y final, la suma de ambos es independiente, y sólo está determinada por los estados inicial y final

# Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica: proceso adiabático

En un **proceso adiabático** ninguna energía entra o sale del sistema en forma de calor ( $Q = 0$ )



Ejemplo 1: caso en el que todas las superficies del émbolo son aislantes perfectos

Ejemplo 2: procesos muy rápidos (la transmisión de energía en forma de calor es un proceso lento)

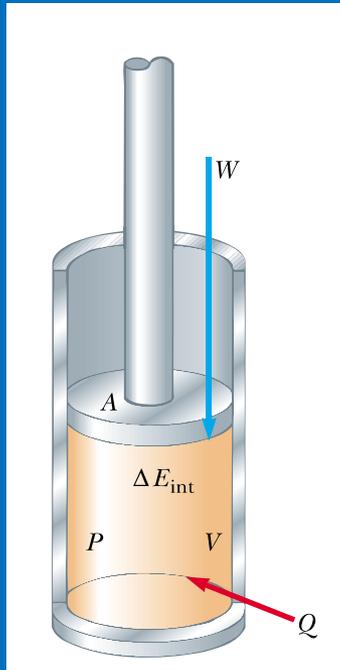
$$\Delta E_{\text{int}} = W$$

Cuando se comprime un gas adiabáticamente, tanto  $\Delta E_{\text{int}}$  como  $W$  son positivos (se realiza un trabajo sobre el gas, es decir, se transfiere energía hacia el sistema de modo que su energía interna aumenta).

Cuando se expande un gas adiabáticamente,  $\Delta E_{\text{int}}$  es negativa

# Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica: proceso adiabático

En un **proceso adiabático** ninguna energía entra o sale del sistema en forma de calor ( $Q = 0$ )



Ejemplo 1: caso en el que todas las superficies del émbolo son aislantes perfectos

Ejemplo 2: procesos muy rápidos (la transmisión de energía en forma de calor es un proceso lento)

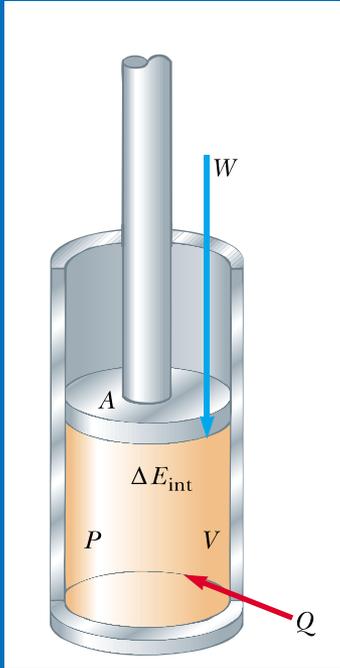
$$\Delta E_{\text{int}} = W$$

Cuando se comprime un gas adiabáticamente, tanto  $\Delta E_{\text{int}}$  como  $W$  son positivos (se realiza un trabajo sobre el gas, es decir, se transfiere energía hacia el sistema de modo que su energía interna aumenta).

Cuando se expande un gas adiabáticamente,  $\Delta E_{\text{int}}$  es negativa

# Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica: proceso isobárico

Un proceso que se realiza a presión constante se denomina **proceso isobárico**



Si el émbolo puede moverse libremente, la presión del gas que haya en el interior del cilindro se debe a la presión atmosférica y al peso del émbolo

El émbolo puede considerarse como una partícula en equilibrio

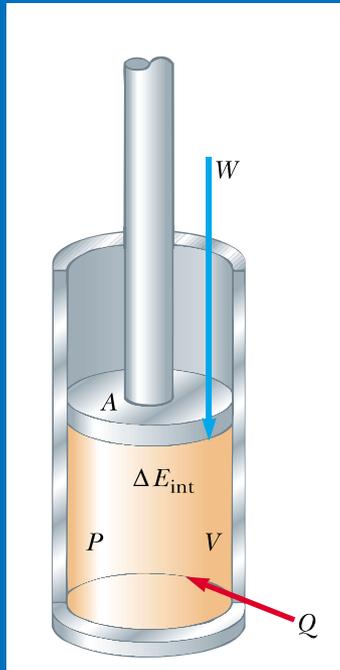
El trabajo realizado sobre el gas es simplemente el producto de la presión constante por la variación en el volumen (cambiado de signo)

$$W = -P(V_f - V_i)$$

En un diagrama  $PV$ , un proceso isobárico se representa por una línea horizontal

# Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica: proceso isócoro

Un proceso en el que el volumen se mantiene constante: **proceso isócoro**



Si fijamos el émbolo para que no se pueda mover

El trabajo realizado es cero (ya que el volumen no varía)

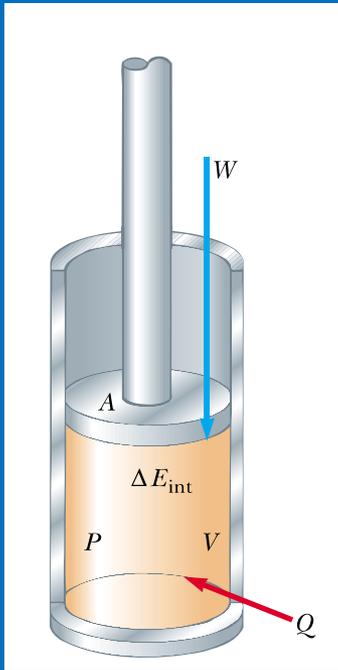
$$\Delta E_{\text{int}} = Q$$

En un proceso isócoro, si se suministra energía en forma de calor toda la energía se utiliza en aumentar su energía interna

En un diagrama  $PV$ , un proceso isócoro se representa por una línea vertical

# Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica: proceso isotérmico

Un proceso que se desarrolla a temperatura constante: **proceso isotérmico**



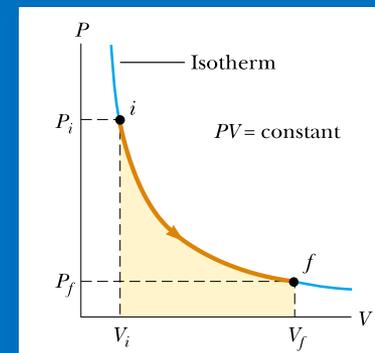
En un gas ideal, la energía interna es función únicamente de la temperatura.  
Si la temperatura es constante

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

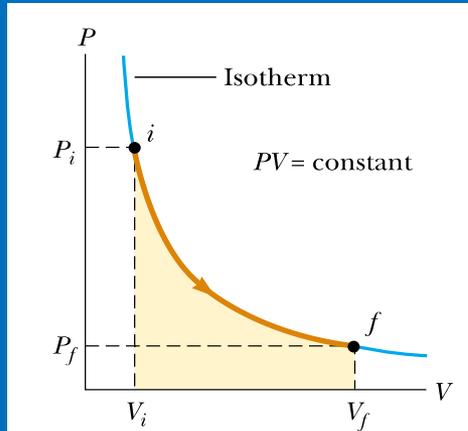
$$Q = -W$$

En un proceso isotérmico, cualquier cantidad de energía que se suministre al gas en forma de trabajo abandona el sistema en forma de calor, por lo que la energía interna permanece constante

En un diagrama  $PV$ , un proceso isotérmico se representa por una línea curva



# Trabajo realizado sobre un gas ideal en expansión en un proceso isotérmico



Supongamos un gas ideal al que se le permite expandir de forma cuasi-estática a temperatura constante

El trabajo realizado sobre el gas viene dado por la expresión

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

Como el gas es ideal y el proceso es cuasiestático (a temperatura constante)

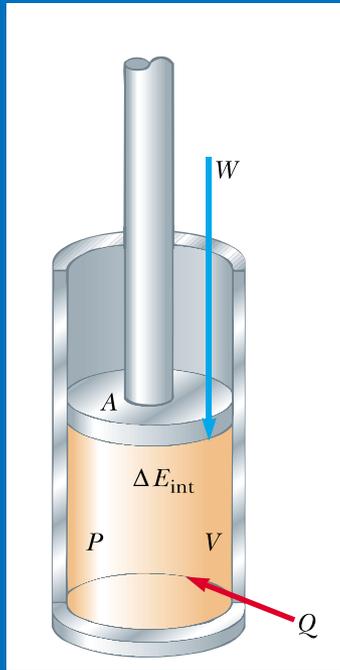
$$PV = nRT$$

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = -nRT \ln V \Big|_{V_i}^{V_f}$$

$$W = nRT \ln \left( \frac{V_i}{V_f} \right)$$

# Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica: sistema no aislado en un proceso cíclico

Un **proceso cíclico** es aquel que comienza y termina en el mismo estado



La variación de energía interna debe ser cero, ya que la energía interna es una variable de estado y los estados inicial y final son los mismos

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = -W$$

Durante un ciclo, la energía en forma de calor suministrada al sistema debe ser igual al opuesto del trabajo realizado sobre el sistema

El trabajo neto realizado en un ciclo es igual al área delimitada por la trayectoria que representa el proceso en un diagrama  $PV$

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Primer principio de la termodinámica es una forma  
de la ley de conservación de la energía

Sin embargo, no nos dice nada acerca de por qué fenómenos que  
no violan ese principio, no ocurren de manera espontánea

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Una máquina térmica es un dispositivo que convierte energía interna en otras formas útiles de energía (por ejemplo, energía cinética)

En general, una máquina térmica conduce una sustancia de trabajo a través de procesos cíclicos durante los cuales:

1. Se extrae energía de un foco de mayor temperatura
2. La máquina realiza un trabajo
3. La máquina cede energía a un foco de menor temperatura

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Ejemplo de máquina térmica: una máquina de vapor

En general, una máquina térmica conduce una sustancia de trabajo (agua) a través de procesos cíclicos durante los cuales:

1. Se extrae energía de un foco de mayor temperatura (se necesita un fuego, foco de mayor temperatura, para convertir el agua líquida en vapor de agua en el interior de una caldera)
2. La máquina realiza un trabajo (el vapor de agua se expande contra un émbolo, realizando un trabajo)
3. La máquina cede energía a un foco de menor temperatura (se condensa el vapor con agua de refrigeración, el foco de menor temperatura, y se devuelve a la caldera)

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

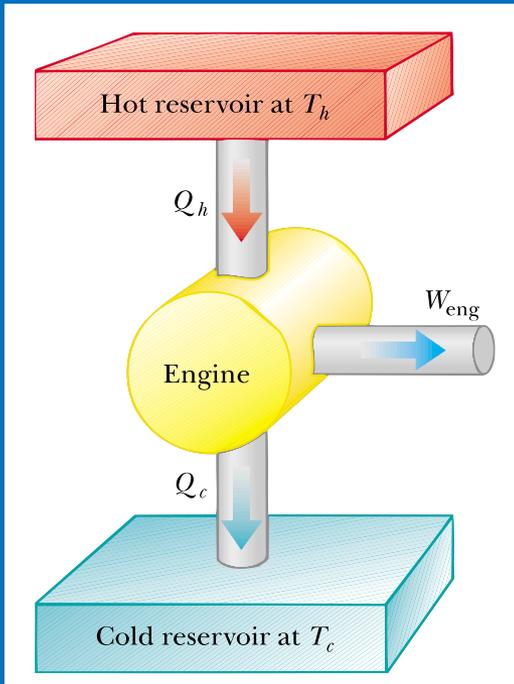
Ejemplo de máquina térmica: una máquina de vapor

En general, una máquina térmica conduce una sustancia de trabajo (agua) a través de procesos cíclicos durante los cuales:

1. Se extrae energía de un foco de mayor temperatura (se necesita un fuego, foco de mayor temperatura, para convertir el agua líquida en vapor de agua en el interior de una caldera)
2. La máquina realiza un trabajo (el vapor de agua se expande contra un émbolo, realizando un trabajo)
3. La máquina cede energía a un foco de menor temperatura (se condensa el vapor con agua de refrigeración, el foco de menor temperatura, y se devuelve a la caldera)

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Representación esquemática de una máquina térmica



La máquina absorbe una cantidad de energía  $Q_c$  del foco caliente

La máquina realiza un trabajo  $W_{maq}$  o lo que es lo mismo, sobre la máquina se realiza un trabajo negativo  $W = -W_{maq}$

La máquina cede una energía  $Q_f$  al foco frío

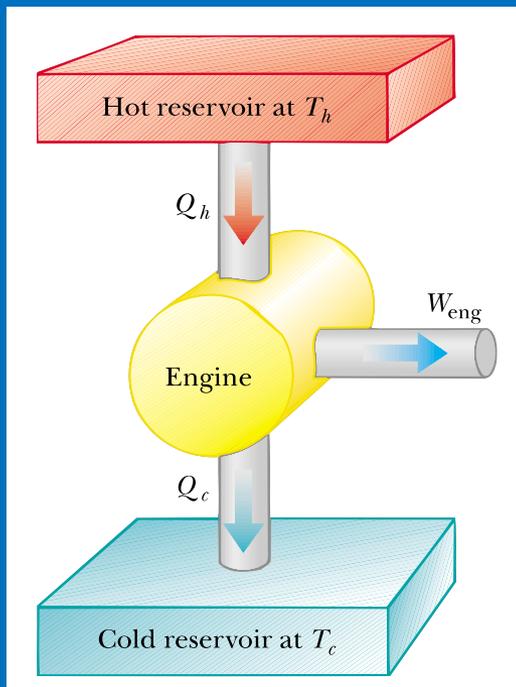
Puesto que la sustancia de trabajo recorre un ciclo, sus energías inicial y final son iguales

$$\Delta U = Q + W \rightarrow Q_c - Q_f + W = 0 \rightarrow Q_{neto} = -W = W_{maq}$$

$$Q_{neto} = |Q_c| - |Q_f|$$

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Representación esquemática de una máquina térmica



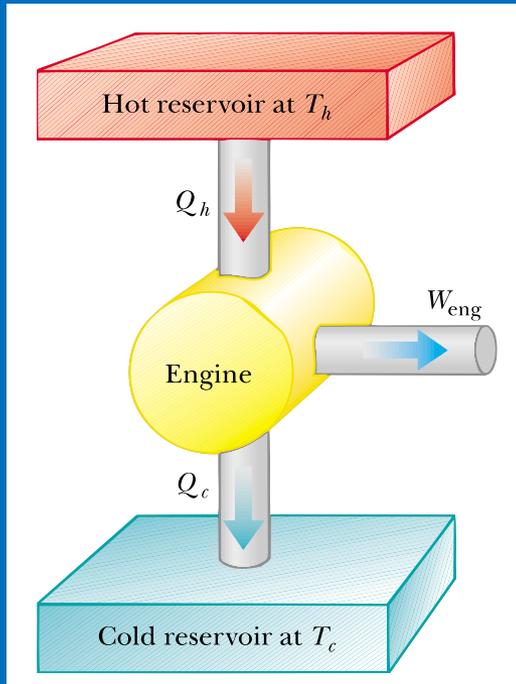
El trabajo realizado por una máquina térmica  $W_{maq}$  es igual a la energía neta absorbida por la máquina

$$W = |Q_c| - |Q_f|$$

Si la sustancia de trabajo es un gas, el trabajo neto realizado por la máquina en un proceso cíclico es el área encerrada por la curva que representa el proceso en un diagrama  $PV$

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Representación esquemática de una máquina térmica

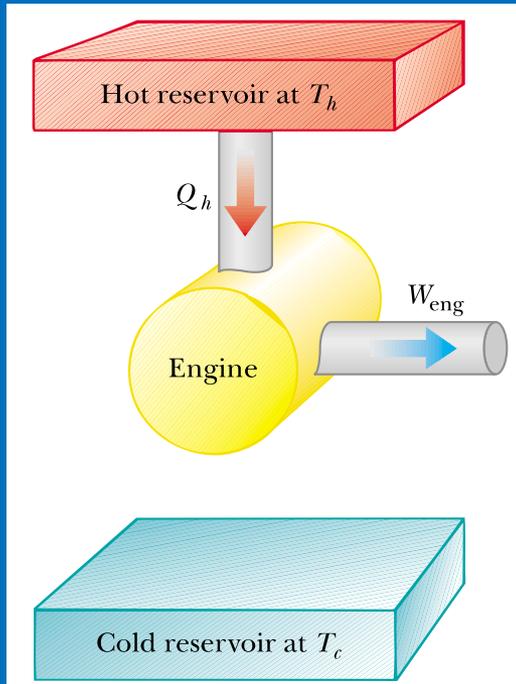


El rendimiento térmico  $\eta$  de una máquina térmica se define como el cociente entre el trabajo neto realizado por la máquina y la energía absorbida del foco caliente durante un ciclo

$$\eta = \frac{W_{\text{maq}}}{|Q_c|} = \frac{|Q_c| - |Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|}$$

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Representación esquemática de una máquina térmica



El rendimiento térmico  $\eta$  de una máquina térmica se define como el cociente entre el trabajo neto realizado por la máquina y la energía absorbida del foco caliente durante un ciclo

$$\eta = \frac{W_{\text{maq}}}{|Q_c|} = \frac{|Q_c| - |Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|}$$

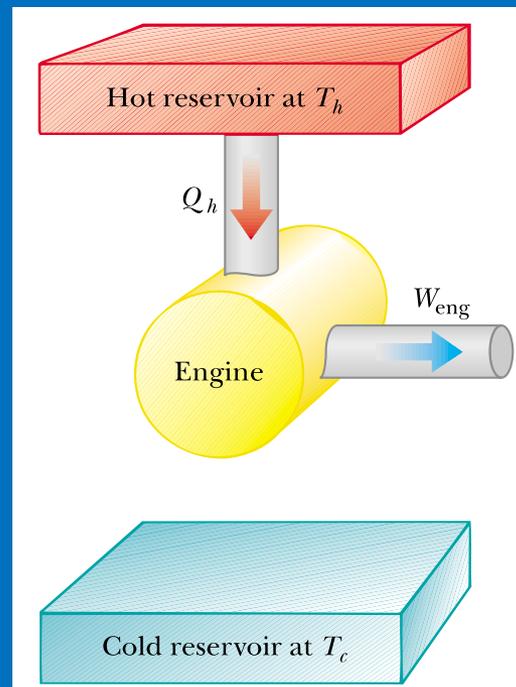
En una máquina perfecta, el rendimiento sería del 100%. Es decir,  $\eta = 1$  y  $Q_f = 0$

En una máquina térmica de rendimiento perfecto tendría que ceder en forma de trabajo mecánico toda la energía que absorbe

# Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Segunda ley de la termodinámica:

Es imposible construir una máquina térmica que, funcionando de manera cíclica, sólo produzca el efecto de absorber energía de un foco y convertirla en igual cantidad de trabajo



La máquina imposible

# Procesos reversibles e irreversibles

**Proceso reversible:** aquel para el cual el sistema puede devolverse a las condiciones iniciales a lo largo del mismo camino y, para el cual cada punto a lo largo de dicho camino está en equilibrio térmico.

**Proceso irreversible:** aquel que no cumple estas condiciones

Todos los procesos reales son irreversibles

# La máquina de Carnot

¿Cuál es la máquina más eficiente posible?

Una máquina térmica operando en un ciclo reversible ideal (denominado ciclo de Carnot) entre dos reservorios de energía es la máquina más eficiente posible

El trabajo neto realizado por una sustancia de trabajo conducida a través del ciclo de Carnot es el máximo trabajo posible para una cantidad dada de energía, suministrada a la sustancia a la temperatura mas alta

# El ciclo de Carnot

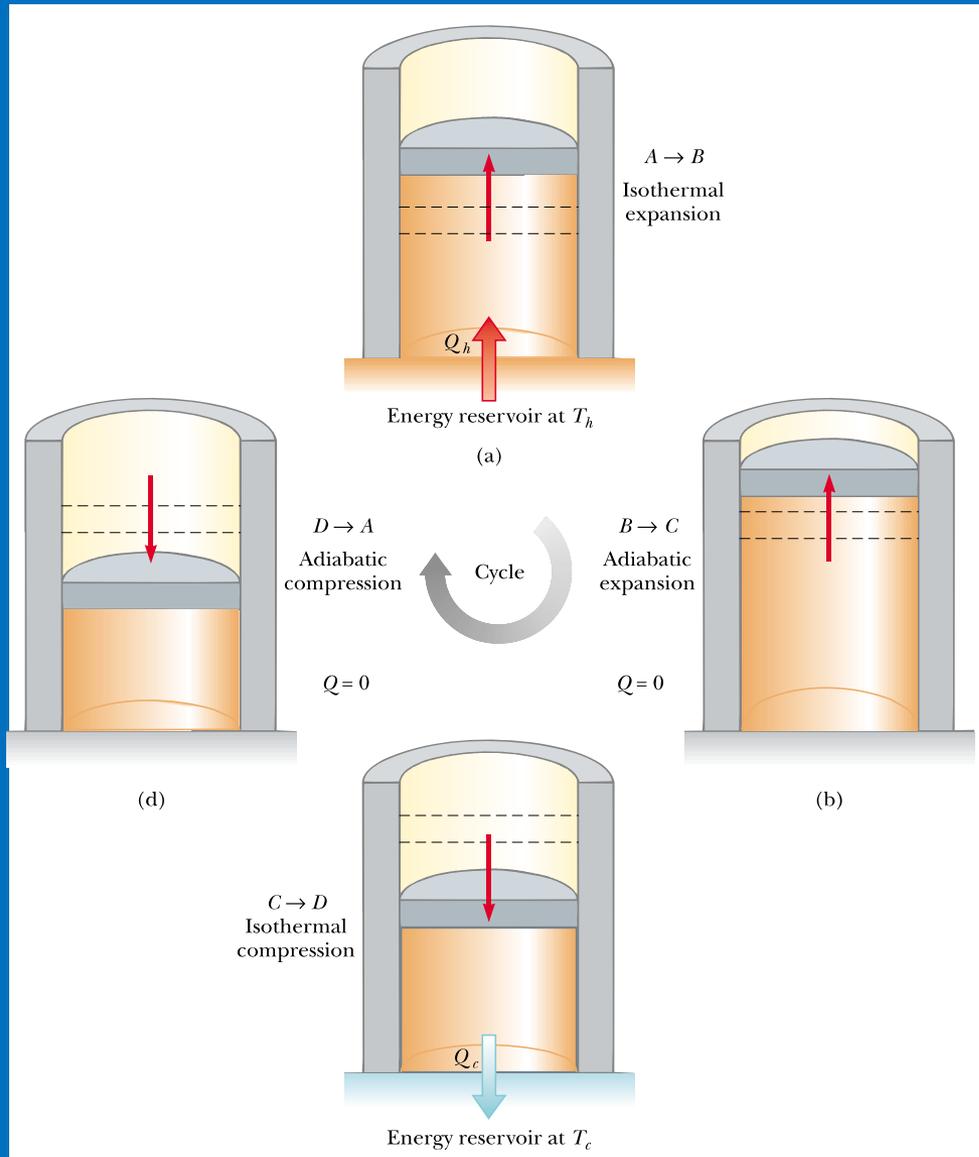
Supondremos que la sustancia de trabajo es un gas ideal contenido en un cilindro con un émbolo móvil en un extremo

Las paredes del cilindro y el émbolo son aislantes térmicos

El ciclo consta de cuatro etapas, todas ellas reversibles:

- dos procesos adiabáticos
- dos procesos isotérmicos

# El ciclo de Carnot



Supondremos que la sustancia de trabajo es un gas ideal contenido en un cilindro con un émbolo móvil en un extremo

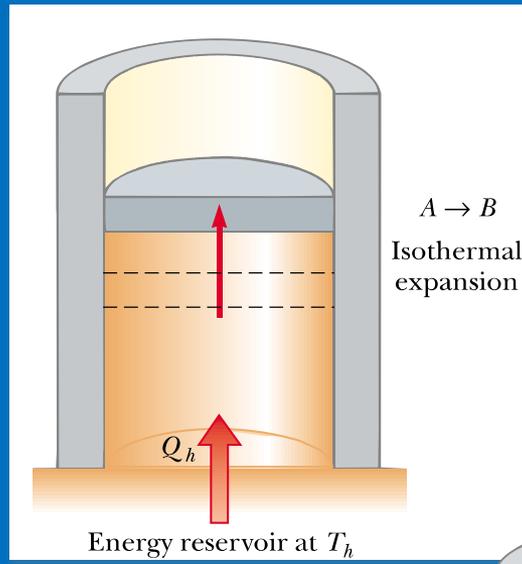
Las paredes del cilindro y el émbolo son aislantes térmicos

El ciclo consta de cuatro etapas, todas ellas reversibles:

- dos procesos adiabáticos
- dos procesos isotérmicos

# El ciclo de Carnot: proceso 1:

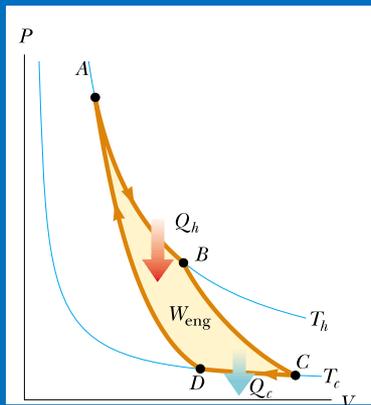
$A \rightarrow B$  Expansión isotérmica a temperatura  $T_c$



El gas se pone en contacto con un foco térmico a temperatura  $T_c$

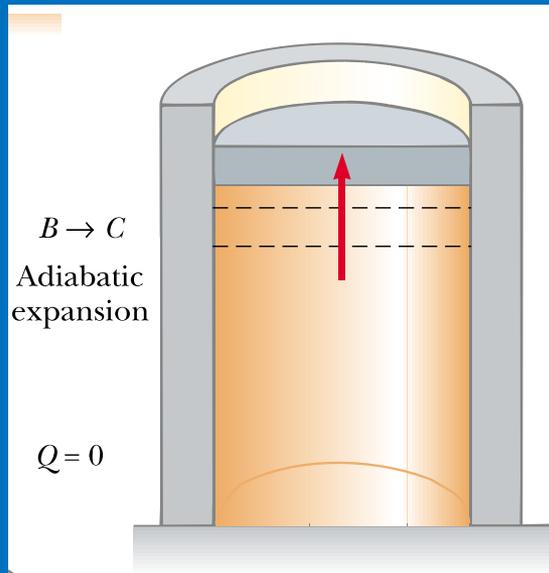
Durante el proceso el gas absorbe una energía  $Q_c$  en forma de calor del foco térmico a través de la base del cilindro

El gas realiza un trabajo  $W_{AB}$  empleado en elevar el émbolo



# El ciclo de Carnot: proceso 2:

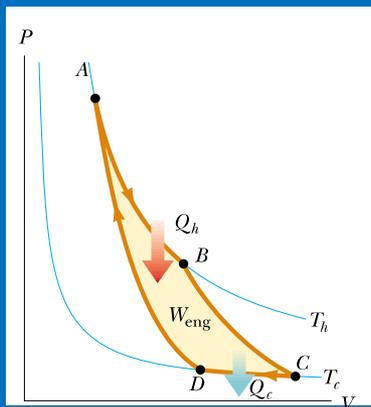
## $B \rightarrow C$ Expansión adiabática



La base del cilindro se reemplaza por un material aislante térmico y el gas se expande adiabáticamente (ninguna energía entra o sale del sistema en forma de calor)

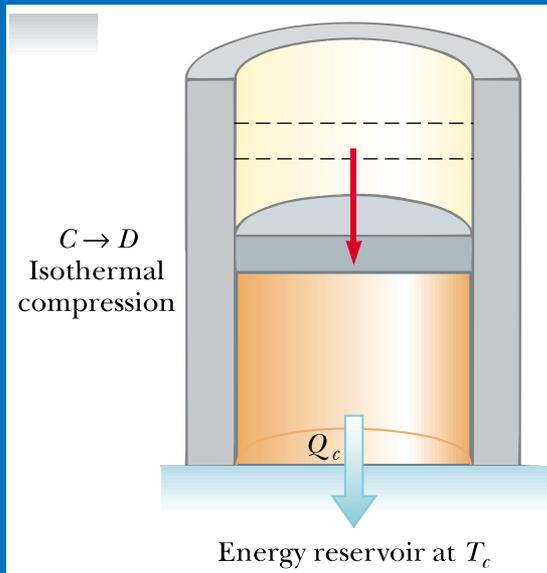
Durante el proceso, la temperatura baja de  $T_c$  a  $T_f$

El gas realiza un trabajo  $W_{BC}$ , empleado en elevar el émbolo



# El ciclo de Carnot: proceso 3:

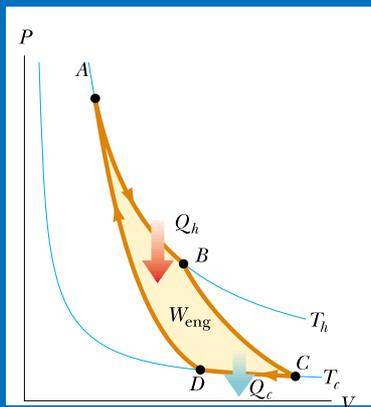
## $C \rightarrow D$ Compresión isotérmica



El gas se pone en contacto térmico con un foco térmico a temperatura  $T_f$  y se comprime isotérmicamente a esa temperatura

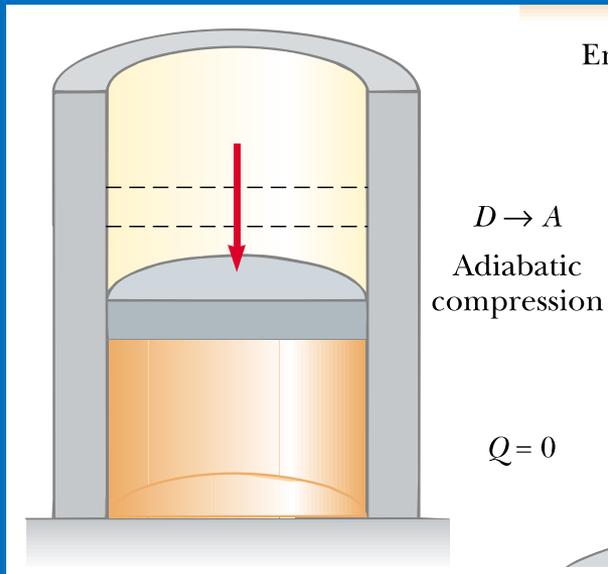
El gas cede una energía  $Q_f$  al foco térmico

El trabajo realizado sobre el gas es  $W_{CD}$



# El ciclo de Carnot: proceso 4:

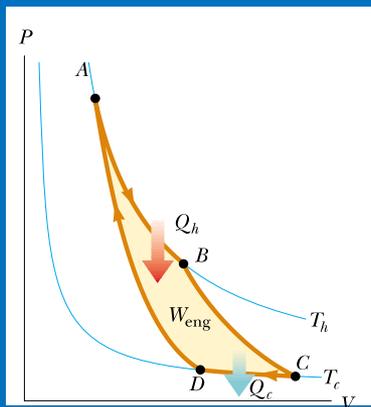
## $D \rightarrow A$ Compresión adiabática



La base del cilindro se reemplaza una vez más por una pared de material aislante térmico y el gas se comprime adiabáticamente

La temperatura del gas aumenta hasta  $T_c$

El trabajo realizado sobre el gas es  $W_{DA}$



# El ciclo de Carnot:

## Eficiencia:

Para un ciclo como este, Carnot demostró que

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

El rendimiento térmico de una máquina de Carnot es

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

**Cualquier máquina real tiene menor rendimiento que la máquina de Carnot, porque todas ellas operan de forma irreversible para completar un ciclo en un periodo de tiempo breve**

# El ciclo de Carnot:

## Eficiencia:

Para un ciclo como este, Carnot demostró que

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

El rendimiento térmico de una máquina de Carnot es

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

La eficiencia es cero si  $T_f = T_c$

La eficiencia aumenta al aumentar  $T_c$  y disminuir  $T_f$

Eficiencia máxima para  $T_f = 0$

**Tercer principio de la termodinámica**  
**Es imposible alcanzar el cero absoluto de temperaturas.**  
**Costaría una cantidad de energía infinita**