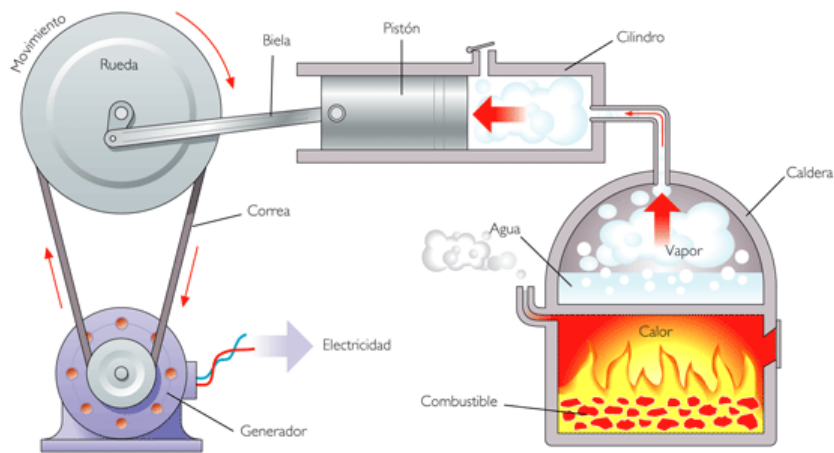


APOYO PARA LA PREPARACION DE LOS ESTUDIOS DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

FÍSICA (PREPARACIÓN A LA UNIVERSIDAD)



Unidad 17: Trabajo, Calor y Principios de la Termodinámica

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

14 de abril de 2010

17.1. Planificación de la unidad

17.1.1. Objetivos

1. Conocer el primer principio de la Termodinámica y saber aplicarlo para calcular el trabajo, la variación de energía interna y el calor en procesos reversibles de un gas ideal.
2. Saber el segundo principio de la Termodinámica.
3. Comprender el Ciclo de Carnot y calcular su rendimiento.

17.1.2. Actividades

1. Lectura del resumen del tema.
2. Realización del cuestionario.
3. Realización de los ejercicios.
4. Actividades complementarias
 - a) Saber el segundo principio de la Termodinámica.
 - b) Realizar un trabajo sobre máquinas térmicas.

17.1.3. Bibliografía

1. Libros de primero y segundo de Bachillerato.
2. P.A. Tipler y G. Mosca, Física para Ciencias e Ingeniería”, 5ª Edición, Editorial Reverté, 2005.

17.1.4. Enlaces relacionados

1. Guía de recursos educativos en la Red. Física: <http://educasites.net>
2. Proyecto Newton:<http://newton.cnice.mec.es>
3. Plataforma moodle UPM: <http://moodle.upm.es/puntodeinicio>
4. Curso Interactivo de Física en Internet: <http://www.sc.ehu.es>
5. Página de Internet con vídeos de Física: <http://cienciasgalilei.com>

17.2. El Trabajo

El trabajo mecánico se define como la energía que se transfiere entre un sistema y el medio que le rodea cuando entre ambos se ejerce una fuerza.

Desde el punto de vista de la termodinámica sólo consideramos el trabajo si el sistema ejerce una fuerza sobre el medio exterior, dando lugar a un desplazamiento. Ej: el trabajo realizado por los gases que se expanden en los cilindros de una locomotora.

Consideramos un sistema contenido en un recinto sobre cuya superficie S , actúa una presión uniforme P_e

El trabajo mecánico elemental W se expresa como el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento:

$$\delta W = \overline{F} \cdot \overline{dl} = F dl \cos\theta = P S dl \cos\theta = P d\mathcal{V} \quad (17.1)$$

El trabajo total:

$$W = \int_1^2 P d\mathcal{V} \quad (17.2)$$

Cuando la transformación es reversible la presión externa está en equilibrio con la presión interna del sistema.

El trabajo es una forma de energía que aparece en el proceso y no una magnitud contenida en el sistema.

El trabajo no es una función de estado, y en una transformación entre dos estados depende del camino recorrido.

17.3. Representación geométrica del trabajo

La relación entre la presión y el volumen de un sistema durante un proceso reversible puede representarse en un diagrama Presión-Volumen, llamado diagrama de Clapeyron. El área comprendida entre la curva y las ordenadas extremas y el eje de los volúmenes es el trabajo realizado en la evolución.

Si el sistema se expande el área es positiva y el trabajo realizado también es positivo.

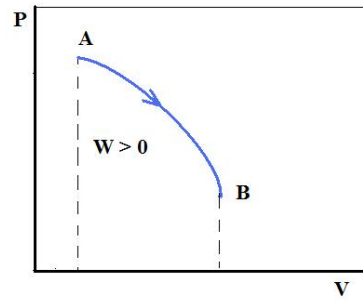


Figura 17.1: Trabajo positivo

Si el sistema se comprime el área es negativa y el trabajo es negativo.

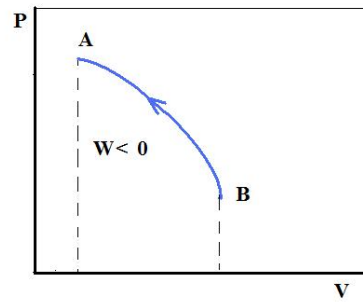


Figura 17.2: Trabajo negativo

Para un ciclo, el sistema realiza una serie de transformaciones volviendo al estado inicial, el área encerrada en el ciclo es el trabajo realizado. Si el ciclo se recorre en el sentido de las agujas del reloj el trabajo es positivo, y si el sentido es contrario negativo.

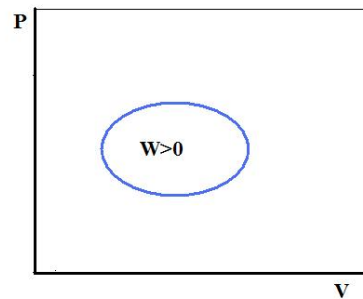


Figura 17.3: Trabajo de un ciclo

17.4. La energía interna

La energía interna de un sistema está integrada por la energía cinética del movimiento de las moléculas, la energía de vibración de los átomos, la energía potencial molecular debida a las fuerzas de atracción y repulsión mutuas, etc. Aunque no podemos medir el valor absoluto de la energía interna de un cuerpo, es decir, su contenido energético, es posible conocer sus variaciones:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (17.3)$$

Donde U_1 y U_2 son las energías internas del sistema en el estado inicial y final de la transformación.

La energía interna es una función de estado, sólo depende del estado inicial y final y no del proceso seguido.

La variación de energía interna en un ciclo termodinámico es nula.

$$\oint dU = 0 \quad (17.4)$$

17.5. Transformaciones termodinámicas

Un sistema termodinámico se transforma ó experimenta una evolución cuando pasa de un estado de equilibrio A, caracterizado por unos valores determinados de las variables termodinámicas, a otro estado de equilibrio B, caracterizado por otros valores distintos.

Las transformaciones pueden ser:

1. **Isócoras.** El volumen es constante ($V = \text{cte}$).
2. **Isobaras.** La presión es constante ($P = \text{cte}$).
3. **Isotermas.** La temperatura es constante ($T = \text{cte}$).
4. **Adiabáticas.** El calor es constante ($\delta Q = 0$).

17.6. Primer principio de la termodinámica

Joule en 1843 estableció la relación entre el calor y el trabajo mecánico dentro del enunciado general de la conservación de la energía.

$$dU = \delta Q - \delta W \quad (17.5)$$

La variación de energía interna experimentada en un proceso es igual a la variación de calor menos el trabajo realizado. En Termodinámica se considera el trabajo positivo cuando es realizado por el sistema, y el calor es positivo cuando lo recibe el sistema.

17.7. Cálculo del trabajo, energía interna y calor en procesos reversibles de un gas ideal

17.7.1. Procesos isócoros ($V=\text{cte}$)

$$dW = P dV = 0 \Rightarrow W = 0 \quad (17.6)$$

$$dU = \delta Q - \delta W = \delta Q_v \quad (17.7)$$

$$dU = \delta Q_v = n c_v \Delta T = n c_v (T_2 - T_1) \quad (17.8)$$

El calor absorbido en una transformación isócara reversible de un gas ideal es igual a la variación de su energía interna.

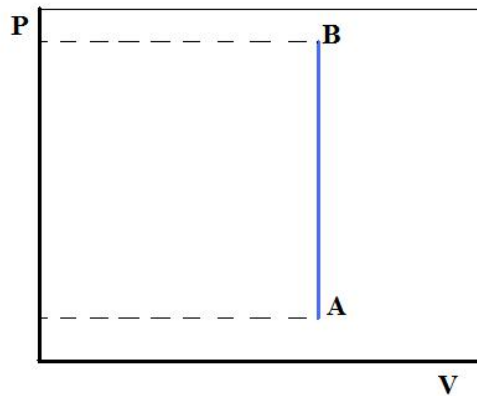


Figura 17.4: Diagrama P - V de un proceso isócoro

17.7.2. Procesos isobaros ($P=\text{cte}$)

El trabajo es:

$$W_{12} = P(\mathcal{V}_2 - \mathcal{V}_1) \quad (17.9)$$

17.7. CÁLCULO DEL TRABAJO, ENERGÍA INTERNA Y CALOR EN PROCESOS REVERSIBLES DE

La variación de energía interna:

$$dU = \delta Q_p - \delta W_p = \delta Q_p - Pd\mathcal{V} = \delta Q_p - d(P\mathcal{V}) \quad (17.10)$$

$$\delta Q_p = dU + d(Pd\mathcal{V}) = d(U + P\mathcal{V}) = dH \quad (17.11)$$

donde H es la entalpía

$$H = U + P\mathcal{V} \quad (17.12)$$

El calor absorbido en una transformación isobara reversible de un gas ideal es igual a la variación de su entalpía.

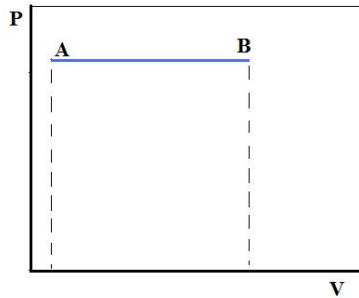


Figura 17.5: Diagrama P - V de un proceso isobaro

$$\delta Q_p = dH = n c_p \Delta T = n c_p (T_2 - T_1) \quad (17.13)$$

17.7.3. Procesos isotermos ($T = \text{cte}$)

La variación de energía interna de un sistema es:

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad (17.14)$$

Que en el caso de un proceso isoterma nos conduce a:

$$\Delta Q_{T-} = \Delta W \quad (17.15)$$

$$W = \int_{\mathcal{V}_1}^{\mathcal{V}_2} P d\mathcal{V} = \int_{\mathcal{V}_1}^{\mathcal{V}_2} \frac{nRT}{\mathcal{V}} d\mathcal{V} = nRT \ln \frac{\mathcal{V}_2}{\mathcal{V}_1} = P_1 \mathcal{V}_1 \ln \frac{\mathcal{V}_2}{\mathcal{V}_1} = P_1 \mathcal{V}_1 \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (17.16)$$

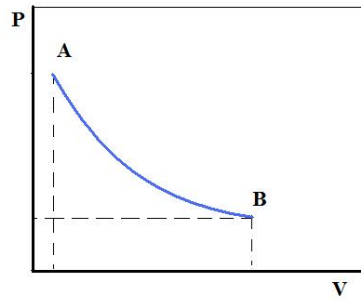


Figura 17.6: Diagrama P - V de un proceso isoterma

17.7.4. Procesos adiabáticos ($dQ=0$)

La ecuación de una transformación adiabática viene expresada por la ecuación de Laplace:

$$P\mathcal{V}^\gamma = cte \quad (17.17)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (17.18)$$

$$\Delta Q = 0 \Rightarrow \Delta U = n c_v \Delta T = n c_v (T_2 - T_1) \quad (17.19)$$

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W = -\Delta W = -n c_v \Delta T = -n c_v (T_2 - T_1) \quad (17.20)$$

$$W_{12} = \frac{P_2 \mathcal{V}_2 - P_1 \mathcal{V}_1}{1 - \gamma} \quad (17.21)$$

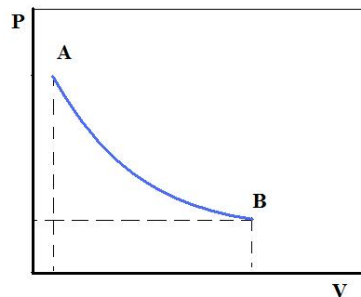


Figura 17.7: Diagrama P - V de un proceso adiabático

17.8. Segundo Principio de la termodinámica

Los primeros conceptos en relación al segundo principio aparecieron en 1824, en una monografía del físico francés Sadi Carnot, titulada “La potencia motriz del fuego”. A partir de los estudios sobre las máquinas de vapor surgieron avances importantes en el desarrollo de la Termodinámica.

Los enunciados del segundo principio son:

1. **Enunciado de Kelvin-Planck (1851):** “No es posible ninguna transformación termodinámica cuyo único resultado sea la absorción de calor de un solo foco y la producción de una cantidad equivalente de trabajo”
2. **Enunciado de Clausius (1850):** “No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor de un recinto a otro de mayor temperatura”.

En 1865 Clausius introdujo el concepto de entropía, S

- a) La energía del Universo es constante.
- b) La entropía del Universo tiende a un máximo.

A partir de la desigualdad de Clausius se puede expresar el segundo principio:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (17.22)$$

17.9. Ciclo de Carnot

Existen muchos procesos cíclicos para la transformación del calor en trabajo pero el más simple e históricamente el primero es el ciclo de Carnot. En este ciclo la sustancia de trabajo realiza intercambios de calor con dos focos a temperaturas T_1 (temperatura del foco caliente) y T_2 (temperatura del foco frío), siendo el proceso reversible. El ciclo de Carnot está formado por 4 procesos, dos isotermos y dos adiabáticos:

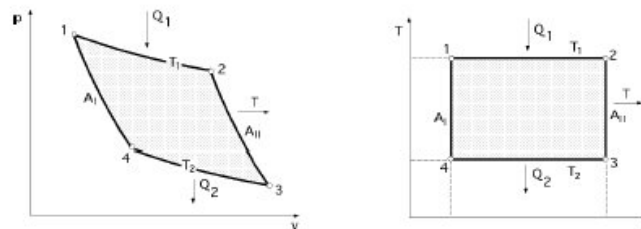


Figura 17.8: Diagrama P - V y T - S del ciclo de Carnot

17.9.1. Expansión isoterma

$$T_1 = cte \Rightarrow W_{12} = Q_{12} \quad \Delta U_{12} = 0 \quad (17.23)$$

$$W_{12} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{nRT_1}{V} dV = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_{12} = Q_1 \quad (17.24)$$

17.9.2. Expansión adiabática

$$Q_{23} = cte \Rightarrow \Delta Q_{23} = 0 \quad (17.25)$$

17.9.3. Compresión isotérmica

$$T_2 = cte \Rightarrow W_{34} = Q_{34} \quad \Delta U_{34} = 0 \quad (17.26)$$

$$W_{34} = \int_3^4 P dV = \int_3^4 \frac{nRT_2}{V} dV = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_4} = Q_{34} = Q_2 \quad (17.27)$$

17.9.4. Compresión adiabática

$$Q_{41} = cte \Rightarrow \Delta Q_{41} = 0 \quad (17.28)$$

17.9.5. Rendimiento de un ciclo de Carnot

El rendimiento de un ciclo de Carnot es el cociente entre el trabajo realizado y el calor absorbido:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (17.29)$$

Teorema de Carnot: "Ninguna máquina operando entre dos temperaturas determinadas posee un rendimiento superior al de una máquina de Carnot que funcionase entre las mismas temperaturas".

Ejercicio: Hallar el rendimiento máximo de una máquina térmica que funciona entre los focos a temperaturas de 500 °C y 100 °C.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{773 \text{ K} - 373 \text{ K}}{373 \text{ K}} = 0,52 \rightarrow \eta = 52\%$$