

Resumen de Termodinámica

1. – Introducción

2. – Calorimetría

3. – Trabajo

4. – Principio cero

5. – Primer principio

6. – Segundo principio

7. – Transmisión de calor

8. – Ejercicios

1.- Introducción

Definiciones:

Sistema: Es toda parte del mundo físico que podemos aislar y focalizar para analizar como interactúa con el medio exterior.

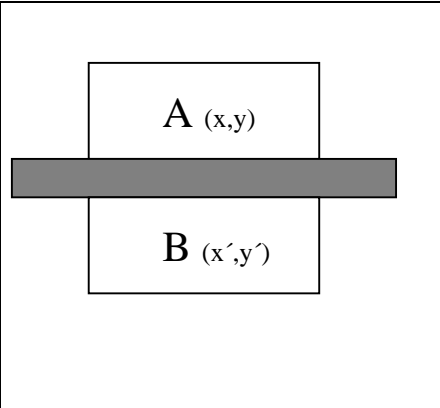
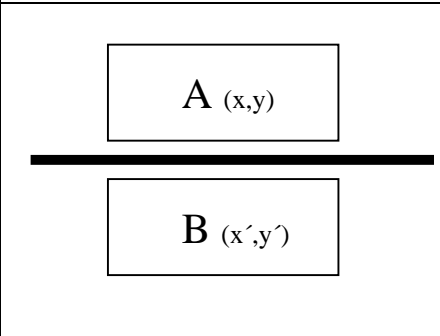
Medio exterior: Parte externa del sistema.

Universo: Porción finita del mundo, formada por el sistema y el medio exterior que puede actuar sobre él.

(el sistema interactúa con el medio exterior intercambiando energía en forma de trabajo o de calor)

Descripción macroscópica: Se requieren de pocas variables para describir el sistema, las cuales son fácilmente medibles. No se hace consideración de la materia.

Descripción microscópica: Se asume que existen moléculas, se requiere de gran cantidad de variables.

	<p><u>Pared Adiabática:</u></p> <p>Cuando dos sistemas definidos en coordenadas (x,y) son puestos en contacto y sus coordenadas no se modifican.</p> <p>Ej.: Lámina gruesa de amianto.</p>
	<p><u>Pared Diatérmica:</u></p> <p>Cuando dos sistemas son puestos en contacto y sus coordenadas (x,y) se modifican hasta llegar a un estado de equilibrio (Equilibrio Térmico).</p> <p>Ej.: Lámina de Cobre.</p>

Variables Termodinámicas: Magnitudes macroscópicas que caracterizan al sistema a analizar.

Fuente térmica: Cuerpo de masa muy grande capaz de absorber o ceder una cantidad ilimitada de energía en forma de calor sin experimentar cambios apreciables en sus variables termodinámicas.

Evolución (o transformación): Cambio de estado. Es cuando en un sistema cambia alguna de sus coordenadas.

Intercambio Mecánico: Introducción o extracción de energía mediante elementos mecánicos.

Intercambio térmico: Cambio de energía mediante calor.

Estado de equilibrio: Ocurre cuando las coordenadas de un sistema tienen valores definidos que permanecen constantes, mientras no se modifiquen las condiciones externas.

Equilibrio Mecánico: Hay compensación de fuerzas.

Equilibrio Químico: No hay reacciones químicas.

Equilibrio Térmico: No hay cambios de temperatura.

Si se cumplen las condiciones necesarias para los tres tipos de equilibrio se dice que el sistema se encuentra en Equilibrio Termodinámico.

Proceso Reversible: Transformación ideal por el cual se modifica el sistema en muchas pequeñas etapas, produciendo pequeñas variaciones.

En una transformación reversible, se conoce el estado inicial y los estados intermedios hasta llegar al estado final. Cada uno de éstos se encuentra en equilibrio, es decir, se conoce como evoluciona el sistema momento a momento.

En un proceso irreversible, no se conocen los estados intermedios.

Todos los procesos naturales son irreversibles.

2.- Calorimetría

Calor intercambiado:

$$Q = c G \Delta t \quad \text{donde } c: \text{ calor específico}$$

G: masa

$$\Delta t = t_f - t_i : \text{ salto de temperaturas}$$

Calores de transformación (calores sensibles): Calor que se le entrega a una sustancia y ésta, al llegar a una cierta temperatura, cambia de estado de agregación y mantiene esta temperatura, a pesar de que se le sigue entregando calor.

$$Q = f \cdot Gt \quad f: \text{ calor de fusión } (+) \text{ de sólido a líquido}$$

$$Q = r \cdot Gt \quad r: \text{ calor latente } (+) \text{ de líquido a gas}$$

$$Q = s \cdot Gt \quad s: \text{ calor de transformación } (+) \text{ de gas a sólido}$$

Gt: Masa que se transforma.

Sistema aislado: Formado sólo por los cuerpos o sustancias que se ponen en contacto. No hay intercambio de energía con el medio exterior.

En todo sistema aislado, la suma algebraica de los calores intercambiados debe ser igual a cero.

$$\sum_i Q_i = 0$$

$$\sum Q_{ab} = \sum Q_c \quad \text{donde } Q_{ab}: \text{ calor absorbido}(+)$$

Q_c : calor cedido(-)

Principio de las transformaciones inversas

La cantidad de calor entregada a un cuerpo para que pase de un estado 1 a un estado 2 es la misma que el cuerpo cede para pasar del estado 2 al estado 1 (pasando por los estados intermedios).

3. Trabajo

3.1 Introducción

Desde el punto de vista de la termodinámica consideraremos los sistemas desde el exterior.

El trabajo por lo tanto está asociado a las fuerzas exteriores.

3.2 Signo del trabajo

	Premisas	Trabajo
Expansión	<p><i>Producto escalar</i>: Negativo porque el sentido de la fuerza y el desplazamiento son distintos.</p> <p><i>Diferencial de volumen</i>: Positivo porque en una expansión aumenta el volumen.</p> <p>$A d\mathbf{l} = dV > 0$</p>	$\delta W = \mathbf{F}_{ext} d\mathbf{l} =$ $= - \mathbf{F}_{ext} d\mathbf{l} = - F_{ext} dl =$ $= - P_{ext} A dl = - P_{ext} dV$ $\delta W = - P_{ext} dV$

<p>Compresión</p>	<p><i>Producto escalar:</i> Positivo porque el sentido de la fuerza y el desplazamiento son iguales.</p> <p><i>Diferencial de volumen:</i> Negativo porque en una compresión disminuye el volumen.</p> <p>- A dI = dV<0</p>	<p>$\delta W = \mathbf{F}_{\text{ext}} \mathbf{dI} =$</p> <p>$= \mathbf{F}_{\text{ext}} \mathbf{dI} = F_{\text{ext}} dI =$</p> <p>$= P_{\text{ext}} A dI = - P_{\text{ext}} dV$</p> <p>$\delta W = - P_{\text{ext}} dV$</p>
--------------------------	---	---

3.3 Trabajos de variación de volumen

	Premisas	Trabajo
<p>Expansión cuasiestática</p>	<p><i>General</i></p> <p>Existe equilibrio de fuerzas y la presión interior (P) será igual a la exterior (P_{ext}), donde P_{ext} es la suma de presiones de fuera del sistema.</p> <p>$PA - P_{\text{ext}}A = 0$</p> <p>$PA - (P_{\text{atm}} + F_{\text{ext}}/A)A = 0$</p>	<p><i>General</i></p> <p>$\delta W = - P_{\text{ext}} dV =$</p> <p>$= - P dV$</p>
	<p><i>Gas ideal</i></p> <p>Depende de cada proceso:</p> <p><u>Isóbaro</u> : $dV = 0$</p> <p><u>Isócoro</u> : $P_{\text{ext}} = P = \text{cte}$</p> <p><u>Isotermo</u> : $T = \text{cte}$</p>	<p><i>Gas ideal</i></p> <p><u>Isóbaro</u></p> <p>$\delta W = - P_{\text{ext}} dV = 0$</p> <p>$W = 0$</p> <p><u>Isócoro</u></p> <p>$\delta W = - P_{\text{ext}} dV =$</p> <p>$= - P dV$</p> <p>$W = - P (V_2 - V_1)$</p> <p><u>Isotermo</u></p> <p>$\delta W = - P_{\text{ext}} dV =$</p> <p>$= - P dV = - (nRT/V) dV$</p> <p>$W = - nRT \ln (V_2/V_1)$</p>

Expansión no estática	<i>General</i> No existe equilibrio de fuerzas y la presión interior (P) no estará definida por lo que no será igual a la exterior (P_{ext}), donde P_{ext} es la suma de presiones de fuera del sistema.	<i>General</i> $\delta W = - P_{ext} dV$ Sólo se podrá calcular cuando la P_{ext} sea constante
	<i>Gas ideal</i> No depende del proceso, depende sólo de la presión exterior.	<i>Gas ideal</i> $\delta W = - P_{ext} dV$ $W = - P_{ext} (V_2 - V_1)$

4. Principio cero

La energía fluye de los cuerpos más calientes a los más fríos.

4.1 Enunciado del principio cero

Se formula mediante dos enunciados:

- I) Dos sistemas aislados A y B, que son puestos en contacto térmico acaban estando en equilibrio térmico.
- II) Si A está en equilibrio térmico con B y B está en equilibrio térmico con C, A y C están en equilibrio térmico.

4.2 Isotermas y temperatura

(a) Isotermas

Definición: Lugar de todos los puntos que representan estados en los cuales un sistema está en equilibrio térmico con un estado de otro sistema.

Supongamos tres sistemas A, B y C cerrados cuyas variables termodinámicas son P y V.

Para un determinado estado de A fijo con P_{A0} y V_{A0} existirán infinitos estados de B en equilibrio térmico con A ya que para cada valor de V en B existirá el correspondiente valor de P que hará que esté en equilibrio térmico con A

Volumen en A Presión en A Volumen en B Presión en B

V_{A0}	P_{A0}	V_{A0}	P_{A0}
V_{A0}	P_{A0}	V_{A1}	P_{A1}
V_{A0}	P_{A0}	V_{A2}	P_{A2}
V_{A0}	P_{A0}	V_{A3}	P_{A3}
V_{A0}	P_{A0}	V_{Ai}	P_{Ai}
V_{A0}	P_{A0}	V_{An}	P_{An}

Al construir en un diagrama de ejes de P y V de B, se genera una curva dada por los puntos anteriores que es la isoterma correspondiente.

(b) Propiedades de las isotermas

Las isotermas se caracterizan por:

- Nunca se cruzan porque si fuera así existirían puntos en los que existen dos temperaturas y eso no es posible.
- La temperatura correspondiente a la isoterma aumenta cuando:
 - P aumenta y $V = \text{cte}$
 - V aumenta y $P = \text{cte}$
 - P y V aumentan

(c) Temperatura

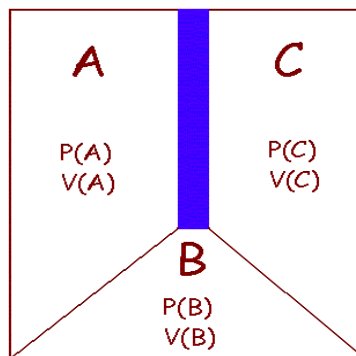
Definición: Magnitud física (característica del sistema) que mide la agitación térmica de un material o de una sustancia y permite determinar si un sistema se encuentra o no en equilibrio térmico con otros sistemas.

La existencia de las anteriores isotermas nos permiten establecer las siguientes relaciones entre las presiones y volúmenes de los distintos estados:

$$F_{AB}(P^A, V^A, P^B, V^B) = 0$$

$$F_{BC}(P^B, V^B, P^C, V^C) = 0$$

$$F_{AC}(P^A, V^A, P^C, V^C) = 0$$



De las dos primeras relaciones podríamos despejar P^B

$$P^B = G_{AB}(P^A, V^A, V^B)$$

$$P^B = G_{BC}(V^B, P^C, V^C)$$

$$F_{AC}(P^A, V^A, P^C, V^C) = 0$$

Igualando las dos primeras expresiones tenemos entonces las relaciones siguientes:

$$G_{AB}(P^A, V^A, V^B) - G_{BC}(V^B, P^C, V^C) = 0$$

$$F_{AC}(P^A, V^A, P^C, V^C) = 0$$

Debido al equilibrio térmico como en $F_{AC}(P^A, V^A, P^C, V^C) = 0$ no aparece V^B debe poderse eliminar de la primera ecuación con lo que quedaría $\theta_A(P^A, V^A) = \theta_B(P^B, V^B) = \theta_C(P^C, V^C)$ donde θ es la función que nos da la temperatura en ese sistema.

Para el caso del gas ideal esta función es $\theta = \text{cte } PV = R^{-1}PV$ que son hipérbolas en un gráfico P-V con la constante de proporcionalidad el inverso de $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

4.3 Termometría

Las funciones θ_A , θ_B y θ_C no serán conocidas generalmente por lo que se fija una de las variables $P = \text{cte}$ y queda entonces $\theta = \theta(V)$ y queda

entonces $\theta = \theta(V) = aV + b$ y se hallan las constantes usando dos puntos fijos e interpolando el resto de puntos.

4.4 Ecuación de Estado (Ecuación de los Gases Perfectos)

La Ecuación de Estado de un sistema viene dada por una relación entre las variables P, V y T, es decir, $f(P, V, T) = 0$.

$$P \cdot V = n \cdot R_M \cdot T$$

$$R_M = 848 \text{ kgf.m/Kmol.}^\circ\text{K}$$

R_M : Constante Universal.

$$P \cdot V = R_1 \cdot G \cdot T$$

$$R_1 = 29,27 \text{ kgf/kg}^\circ\text{K}$$

$$G = n \cdot M$$

n: n° moles.

M: Peso molecular

G: Masa.

5. Primer principio

Conservación de la energía: la energía se conserva salvo cuando hay disipación.

5.1 Enunciado del primer principio

(a) Energía Interna - Definición General: Energía que se intercambia entre el sistema y el medio.

(b) Definición de ΔU . Trabajo adiabático

En un proceso adiabático el trabajo intercambiado para ir de un estado 1 a un estado 2 es independiente del camino elegido para llegar de 1 a 2.

Se puede definir una función de estado llamada energía interna U que en un proceso adiabático coincide con el trabajo intercambiado

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W^{\text{Ad}}$$

En un ciclo cerrado, $\Delta U = 0$ (la energía interna es una variable de estado).

(c) Definición de Q

Calor: Flujo de energía que pasa de un sistema a otro, debido a una diferencia de temperaturas entre los sistemas.

$$\left. \begin{aligned} C_v \text{ a } V \text{ cte} &\Rightarrow Q_v = c_v G (T_f - T_i) \\ C_p \text{ a } p \text{ cte} &\Rightarrow Q_p = c_p G (T_f - T_i) \end{aligned} \right\} \text{ (el calor depende de la trayectoria)}$$

En el proceso no adiabático la diferencia $\Delta U - W$ es no nula por lo que llamamos calor Q a esta diferencia $\Delta U - W = Q$

(d) Primer principio para sistemas cerrados

Todo sistema cerrado tiene una variable de estado llamada energía interna cuya variación entre el estado inicial y final coincide con la suma del calor y trabajo intercambiado en el proceso.

$$\Delta U = W + Q$$

$$dU = \delta Q + \delta W$$

5.2 Calores específicos

Relación de MEYER: Vincula los calores específicos a volumen constante y a presión constante.

$$c_p - c_v = A \cdot R_1 \quad \text{donde} \quad A = 1/427 \text{ Kcal/kgf.m}$$

$$R_1 = 29,27 \text{ kgf/kg}^\circ\text{K}$$

$$\kappa = c_p/c_v \quad \text{gas monoatómico} \Rightarrow \kappa = 1,6$$

$$\text{gas diatómico} \Rightarrow \kappa = 1,4$$

$$\text{gas poliatómico} \Rightarrow \kappa = 1,3$$

5.3 Politrópicas

Evolución politrópica: Se realiza a calor específico constante.

Politrópica	Ecuación	N	c	Q	ΔU	W
Isocora	$V = \text{cte}$	∞	c_v	$c_v G \Delta T$	$c_v G \Delta T$	0
Isobara	$p = \text{cte}$	0	c_p	$c_p G \Delta T$	$c_v G \Delta T$	$P(V_2 - V_1)$

Isoterma	$p \cdot V = \text{cte}$	1	∞	$R_1 G T \ln(V_2/V_1)$	0	$R_1 G T \ln(V_2/V_1)$
Adiabática	$p \cdot V^\kappa = \text{cte}$	κ	0	0	$c_v G \Delta T$	$- c_v G \Delta T$
Politrópica General	$p \cdot V^n = \text{cte}$	$\frac{C_p - C}{C_v - C}$	c	$c G \Delta T$	$c_v G \Delta T$	$(c - c_v) G \Delta T$

Transformación Isobárica: $V_1/V_2 = T_1/T_2$

Transformación Isotermica: $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

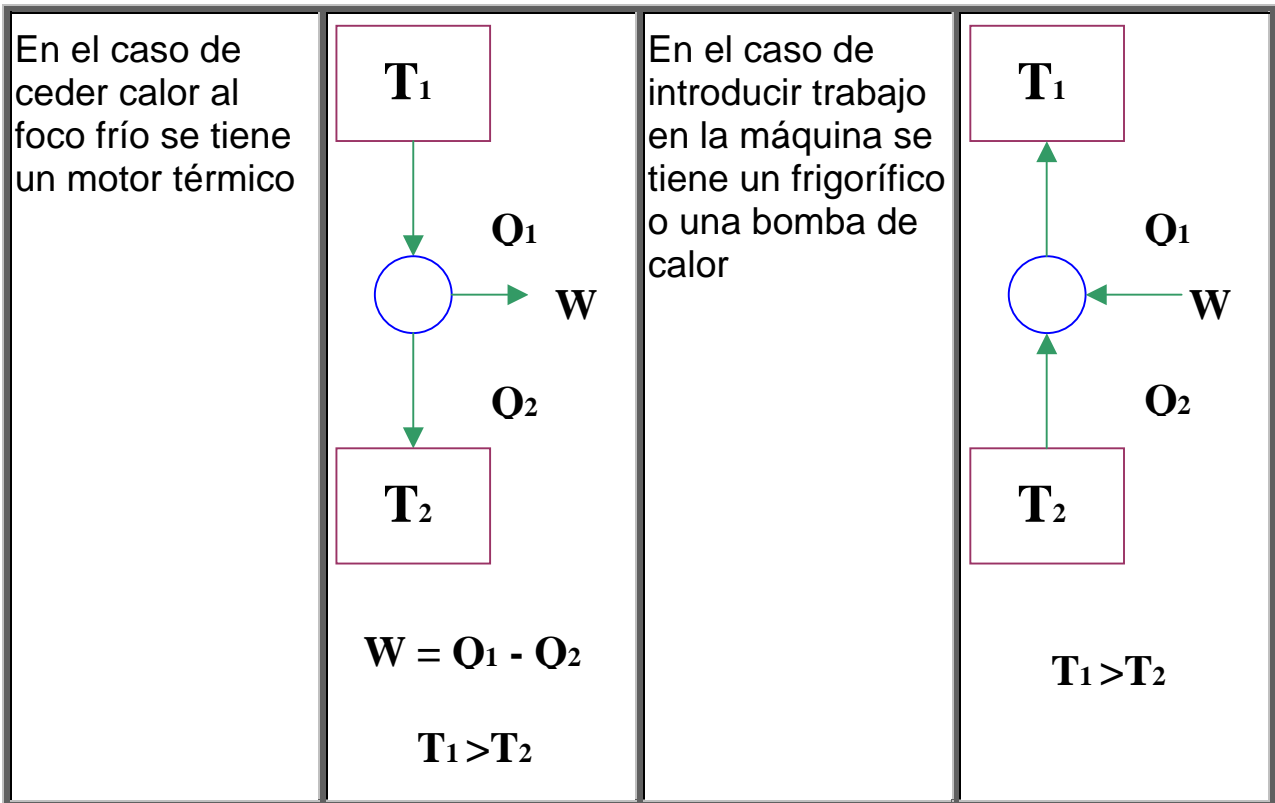
Transformación Isocora: $p_1/T_1 = p_2/T_2$

Transformación Adiabática: $p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa \Rightarrow T_1 \cdot V_1^{\kappa-1} = T_2 \cdot V_2^{\kappa-1}$

6. Segundo principio

6.1 Enunciados del 2º principio

Enunciado de Kelvin-Planck		Enunciado de Clausius	
<p>No existe ningún sistema termodinámico cuyo único efecto al evolucionar sea extraer calor de un sistema y realizar trabajo sobre otro.</p>	<p>T_1</p> <p>Q_1</p> <p>W</p> <p>T_2</p> <p>$T_1 > T_2$</p>	<p>No existe ningún sistema termodinámico cuyo único efecto al evolucionar sea extraer calor de un sistema y cederlo a otro que está a mayor temp.</p>	<p>T_1</p> <p>Q_1</p> <p>$W = 0$</p> <p>Q_2</p> <p>T_2</p> <p>$T_1 > T_2$</p>



Los rendimientos de las anteriores máquinas térmicas son:

Motor térmico	Frigorífico
$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$	$\eta = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$

Si las máquinas son reversibles y el gas es ideal, los rendimientos se pueden expresar como :

Motor térmico	Frigorífico
$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$	$\eta = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

El rendimiento de máquina térmica no puede ser igual a uno, ya que el calor cedido por la máquina es distinto de cero(de lo contrario, contradice el enunciado de Kelvin - Planck).

El rendimiento de una máquina frigorífica(también llamada *eficiencia*) no puede ser infinito, ya que el trabajo es distinto de cero(de lo contrario, contradice el enunciado de Clausius).

6.2 Teorema de Carnot

(a) Ciclo de Carnot

Es un ciclo formado por dos isotermas y dos adiabáticas intercaladas entre sí.

El ciclo de Carnot (para un gas ideal) es un sistema reversible (conozco la evolución punto a punto).

(b) Teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que intercambie calor únicamente con dos fuentes tiene un rendimiento mayor que la máquina de Carnot trabajando a esas dos fuentes.

Como consecuencia se tiene que todos los motores de Carnot que funcionen entre dos mismas fuentes de calor tienen igual rendimiento y que sólo depende de las temperaturas de los focos.

Nota : Se demuestra aplicando el enunciado de Kelvin del segundo principio.

6.3 Teorema de Kelvin y teorema de Clausius

Es importante tener claro cuáles son los signos del calor y el trabajo para poder entender lo que viene después. De manera que el convenio de signos está referido a la máquina M, serán positivos tanto el calor como el trabajo si entran en la máquina y negativos si salen de la máquina.

Teorema de Kelvin

En este caso hablamos de un motor de carnot reversible.

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Teorema de Clausius

En el caso de clausius hablamos de un sistema cerrado que experimenta un proceso cíclico y que interacciona con un conjunto de fuentes de calor.

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

En el caso de ser reversible la relación se convierte en una igualdad

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

Y para un proceso continuo sería

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Nota : Se demuestra aplicando el enunciado de Kelvin del segundo principio.

6.4 Definición de entropía

(a) Entropía en procesos reversibles

Según la relación de Clausius para un ciclo reversible en el que haya dos formas de llegar a dos estados distintos por vía reversible se tiene:

$$\oint \frac{\delta Q^R}{T} = 0 = \int_1^2 \frac{\delta Q^A}{T} + \int_2^1 \frac{\delta Q^B}{T} = 0$$

Es decir se tiene que la siguiente integral es una función de estado

$$\int_1^2 \frac{\delta Q^A}{T} = \int_1^2 \frac{\delta Q^B}{T}$$

Entonces se define entropía como la anterior integral, es decir

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = dJ \text{ , donde } dJ \text{ es el flujo entrópico.}$$

(b) Entropía en procesos irreversibles

Según la relación de Clausius para un ciclo irreversible en el que haya dos formas de llegar a dos estados distintos, uno por vía reversible y otro por

vía irreversible se tiene:

$$\int_1^2 \frac{\delta Q^R}{T} + \int_2^1 \frac{\delta Q^I}{T} < 0, \text{ es decir, que despejando y poniéndolo en forma}$$

diferencial se tiene $dS - \frac{\delta Q^I}{T} = d\sigma > 0$, donde $d\sigma$ es la generación entrópica (que siempre es mayor que cero) y se define como la diferencia entre la entropía y el flujo entrópico.

Se puede escribir el segundo principio como:

$$dS = \frac{\delta Q^I}{T} + d\sigma = dJ + d\sigma$$

6.5 Ecuaciones de la entropía

Transformación isocora ($V = \text{cte}$)

$$dQ = c_v G dT$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} c_v G \frac{dT}{T} = c_v G \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Transformación isobárica ($P = \text{cte}$)

$$dQ = dU + dW \Rightarrow dQ = c_v G dT + p dV$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = c_v G \ln \frac{T_2}{T_1} + nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

con $R = 848 \text{ kgf.m/Kmol.}^\circ\text{K}$

$n = n^0$ de moles

Transformación isotérmica ($T = \text{cte}$)

$$dQ = dW = p dV$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{nRT dV}{VT} = nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Transformación adiabática ($Q = \text{cte}$)

$$dQ = 0 \Rightarrow \Delta S = 0$$

En un ciclo cerrado, $\Delta S = 0$ (la entropía es una variable de estado).

Ejemplo de entropía: conducción de Q unidades de calor a través de un sistema (que permanece invariable) desde una fuente de temperatura T1 a una fuente T2 (T1>T2)

$$\Delta S_{(\text{sistema})} = S_f - S_i (\text{sistema}) = 0$$

$$\Delta S_{(\text{fuente caliente})} = S_f - S_i(\text{fuente caliente}) = - Q/T_1$$

$$\Delta S_{(\text{fuente fría})} = S_f - S_i(\text{fuente fría}) = + Q/T_2$$

$$\Delta S_{(\text{universo})} = S_f - S_i(\text{universo}) = Q/T_2 - Q/T_1$$

Comportamiento de la entropía del universo:

$$\Delta S_{(\text{universo})} \geq 0 \quad \Rightarrow =0 \text{ para procesos reversibles}$$

$$\Rightarrow >0 \text{ para procesos irreversibles}$$

6.6 Diagrama T-S

Cada cantidad infinitesimal de calor transferido a un sistema durante una porción infinitesimal de un proceso reversible, se puede representar

mediante la ecuación $\delta Q^R = TdS$ y para la cantidad total de calor, la

ecuación es: $Q^R = \int_i^f TdS$, que representa gráficamente, el área bajo la

curva en un diagrama T-S (con T sobre el eje Y y S sobre el eje X).

La gráfica de la curva depende del proceso reversible que experimenta el sistema .

Un proceso isotérmico se representa mediante una recta horizontal(T es constante).

Un proceso adiabático reversible se representa mediante una recta

vertical. En este caso $dS = \frac{\delta Q^R}{T}$ con $\delta Q^R = 0$, y si T no es nula, entonces $dS=0$ y S es constante. Por lo tanto durante un proceso adiabático reversible, la entropía de un sistema permanece constante (el sistema experimenta un proceso *isentrópico*). Un ciclo de Carnot forma un rectángulo en un diagrama T-S.

Sobre un diagrama T-S solo pueden representarse procesos reversibles, ya que la entropía únicamente se ha definido para estados de equilibrio.

6.7 Ciclos ideales

Un ciclo es una serie de procesos, mediante la cual el sistema es llevado de nuevo a su estado inicial.

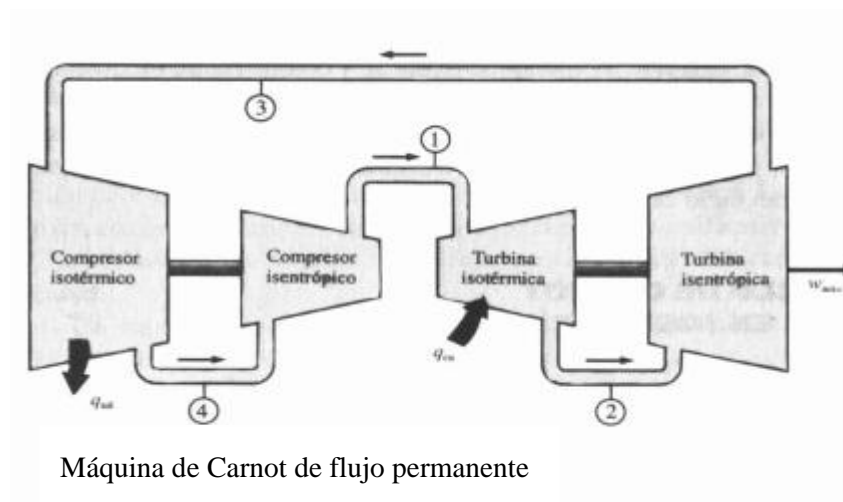
Los ciclos que efectúan los dispositivos reales (como motores, compresores, turbinas, etc.) son difíciles de analizar por la presencia de efectos complicados, como la fricción y la ausencia de tiempo suficiente para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo.

Cuando al ciclo real se le eliminan todas las irreversibilidades y complejidades internas, queda conformado sólo por procesos internamente reversibles, el cual recibe el nombre de *ciclo ideal*.

a) Ciclo de Carnot

Se compone de cuatro procesos totalmente reversibles:

Adición de calor isotérmica, expansión isentrópica, rechazo de calor isotérmico y compresión isentrópica.



El ciclo de Carnot se ejecuta en un sistema cerrado(un dispositivo de cilindro – émbolo) ó en un sistema de flujo permanente(con dos turbinas y dos compresores), y puede emplearse gas o vapor como fluido de trabajo.

El ciclo de Carnot es el más eficiente que puede ejecutarse entre una fuente de energía térmica a temperatura T_H y un sumidero a temperatura T_L .

El rendimiento de dicho ciclo se expresa como $\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ donde la temperatura más alta en el ciclo (T_H) está limitada por la temperatura máxima que pueden soportar los componentes de la máquina térmica (como el émbolo o los álabes de la turbina), y la temperatura más baja (T_L) está limitada por la temperatura del medio de enfriamiento utilizado en el ciclo (como un río o aire atmosférico).

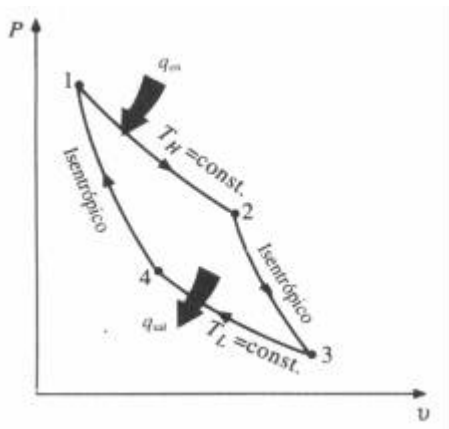


Diagrama P-V de un ciclo de Carnot

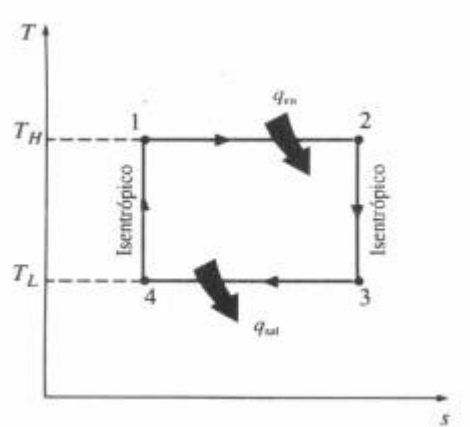
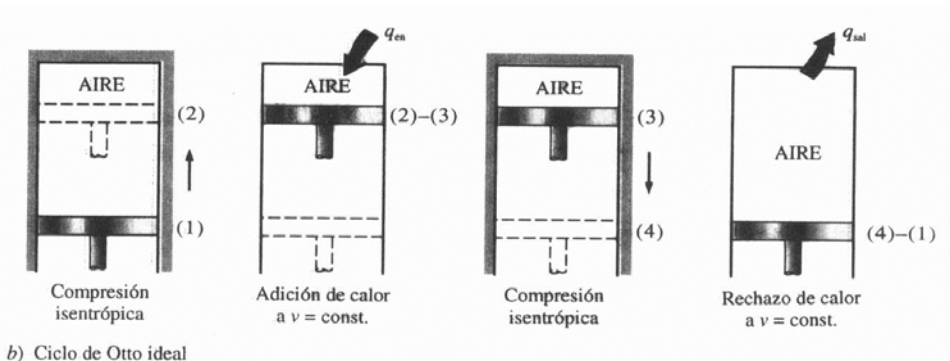


Diagrama T-S de un ciclo de Carnot

b) Ciclo de Otto

Es el ciclo ideal para las máquinas de encendido de chispa y se compone de cuatro procesos reversibles internamente:

Compresión isentrópica, adición de calor a volumen constante, expansión isentrópica y rechazo de calor a volumen constante.

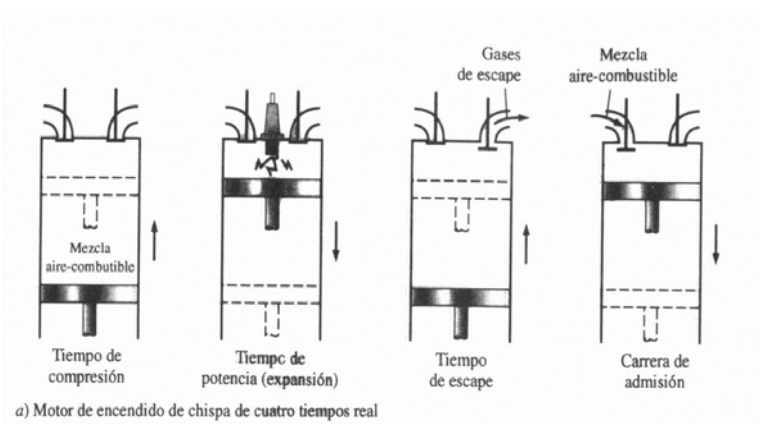


En la mayoría de las máquinas de encendido de chispa, el émbolo ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones para cada ciclo termodinámico. Estas máquinas reciben el nombre de *máquinas de combustión interna de cuatro tiempos*.

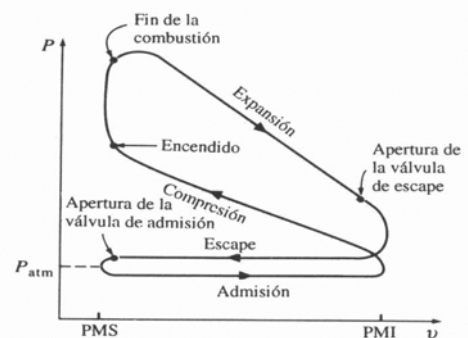
Funcionamiento de un motor de encendido de cuatro tiempos real:

Al principio, tanto la válvula de admisión como de escape están cerradas y el pistón se encuentra en su posición más baja (PMI).

Durante el tiempo de compresión, el émbolo se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire – combustible. Un poco antes de que el émbolo alcance su posición más alta (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, con lo cual aumenta la presión y temperatura del sistema. Los gases de alta presión impulsan el émbolo hacia abajo el cual obliga a rotar al cigüeñal, produciendo una salida de trabajo útil durante el tiempo de expansión. Al final de este tiempo, el émbolo se encuentra en su posición más baja y el cilindro se llena con producto de combustión. Después el émbolo se mueve otra vez hacia arriba evacuando los gases por la válvula de escape y luego desciende extrayendo una mezcla de aire – combustible a través de la válvula de admisión.



El rendimiento de una máquina de encendido de chispa real será menor que la de un ciclo de Otto debido a irreversibilidades como la fricción y otros factores como la combustión incompleta.



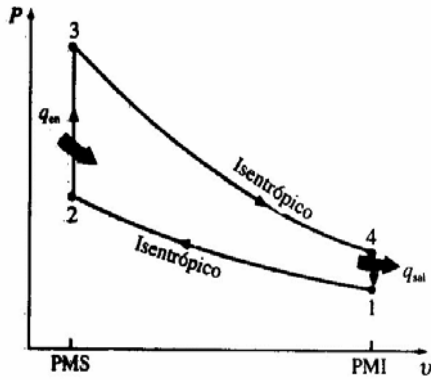


Diagrama P-V de un ciclo de Otto

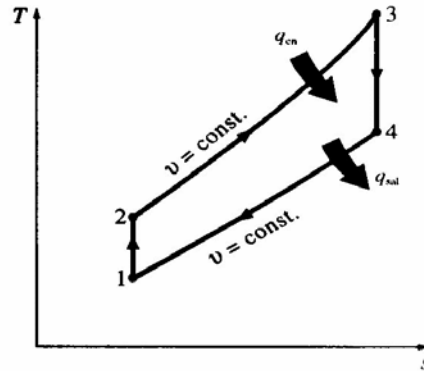
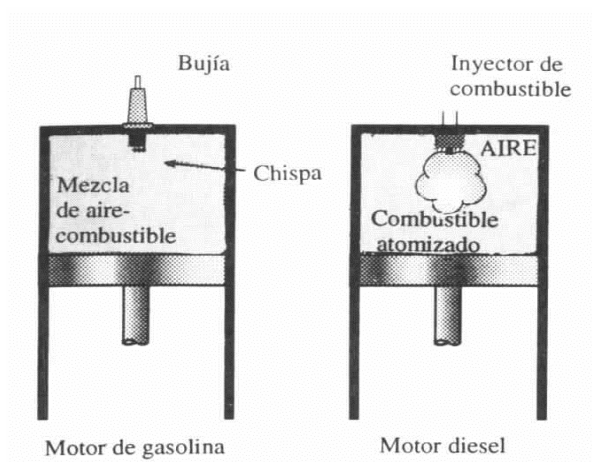


Diagrama T-S de un ciclo de Otto

c) Ciclo Diesel

Es el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión.

En los motores diesel, el aire se comprime hasta una temperatura superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire caliente. Por lo tanto, la bujía se reemplaza por un inyector de combustible.



En los motores Diesel, la bujía es reemplazada por un inyector de combustible, y sólo se comprime el aire durante el proceso de compresión.

El proceso de inyección de combustible empieza cuando el émbolo se aproxima al PMS (punto muerto superior) y continúa durante la primera parte del tiempo de expansión (en estos motores, el proceso de combustión sucede durante un período más largo). Debido a esta mayor duración, el proceso de combustión en el ciclo Diesel ideal se obtiene como un proceso de adición de calor a presión constante (es el único proceso donde los ciclos Otto y Diesel difieren).

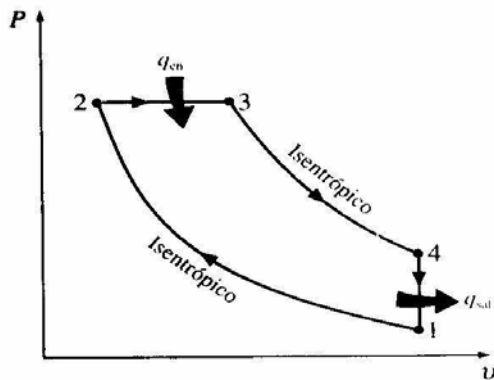


Diagrama P-V del ciclo Diesel

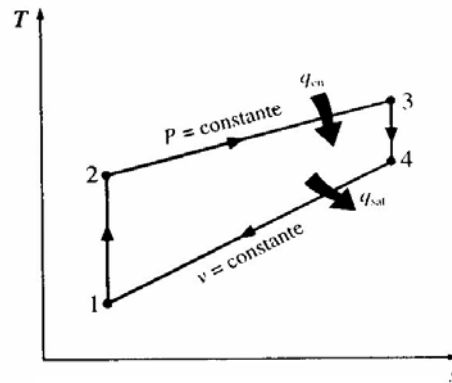


Diagrama T-S del ciclo Diesel

7. Transmisión de calor

Se produce en virtud de una diferencia de calor entre cuerpos o entre partes de un mismo cuerpo. La transmisión de calor es perpendicular a la superficie del cuerpo.

7.1 Conductividad térmica

Se da en sólidos o en líquidos altamente viscosos. Se produce sin desplazamiento.

Diagrama P-V del ciclo Diesel

Diagrama T-S del ciclo Diesel

Ecuación de conductividad térmica (para paredes planas infinitas):

Forma integrada (aprox.)	Forma diferencial
$J = \frac{Q}{At} = -K \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$	$J = \frac{1}{A} \frac{\delta Q}{dt} = -K \frac{dT}{dx}$

donde A = área del cuerpo

K = coeficiente de conductividad térmica

J = cantidad de calor por unidad de área y unidad de tiempo

Δx = espesor de la pared

T_1 = temperatura de la cara interna de la pared

T_2 = temperatura de la cara externa de la pared

El signo menos de la ecuación de conducción indica que el calor se transmite en el sentido de las temperaturas decrecientes.

Ley de Fourier: $\frac{\delta Q}{dt} = -KA\bar{\nabla}T$ (dQ/dt=flujo de calor)

$\bar{\nabla}T = \frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperaturas para una placa plana infinita.
$\bar{\nabla}T = \frac{dT}{dr}$	Gradiente de temperaturas para una geometría esférica o cilíndrica.

7.2 Convección

Se dá en fluídos (gas o líquido). Se produce por una diferencia de densidad con desplazamiento de materia.

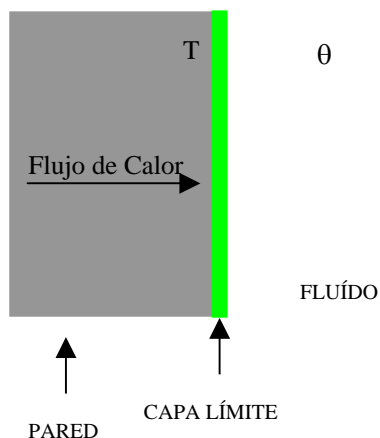
Modelo de capa límite: este modelo sólo explica la transferencia de calor y no la dinámica de la materia.

Se define como $J = h (T - \theta)$ donde θ : temp. del fluído

(para $T > \theta$)

T: temp de la pared

h: coeficiente de convección



$T > \theta$

Flujo de Calor: dQ/dt

En la capa límite ubicada entre el sólido y el fluído ocurre un salto en la temperatura.

7.3 Radiación

Transmisión de energía por ondas electromagnéticas. Se dá en el vacío

(no necesita materia) y a altas temperaturas (superior a 500°C), o debido a una gran diferencia de temperatura entre el cuerpo y el ambiente.

Calor absorbido por un cuerpo negro:

$$dQ/dt = A\alpha \sigma T^4 \quad \text{donde } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Watt/m}^2\text{K}^4$$

(constante de Stefan-Boltzmann)

α = coeficiente de emisividad ($0 < \alpha < 1$)

$$dQ/dt = A\alpha \sigma (T^4 - T_\theta^4) \quad \text{calor transmitido del cuerpo al ambiente por radiación}$$

Si $T > T_\theta \Rightarrow$ el cuerpo emite calor

Si $T < T_\theta \Rightarrow$ el cuerpo absorbe calor

Veamos algunas definiciones:

$$R = (\text{energía emitida})/(At)$$

$$H = (\text{energía incidente})/(At)$$

$$\alpha = \text{poder absorbente} = (\text{potencia absorbida})/(\text{potencia incidente})$$

$\alpha = 1$ en el cuerpo negro

$$\text{Ley de Stefan-Boltzmann : } R_N = \sigma T^4$$

Coeficiente de convección aparente (h_{ap})

$$dQ/dt = h_{ap} A(T - \theta) \quad (\text{para } T > \theta) \quad \text{calor transmitido por convección y radiación}$$

8. Ejercicios

8.1 Calorimetría

- 1) Calcular la cantidad de calor que se debe entregar a 3 kg de agua que se encuentra en estado sólido (a -20°C) para transformarlo íntegramente en vapor.
- 2) ¿Qué cantidad de calor es necesario entregar a 1 kg de cobre para aumentar su temperatura en 100°C ? ¿Y a 1 kg de carbón?
- 3) Por qué una quemadura producida por un gramo de vapor a 100°C produce más daño que una quemadura causada por un gramo de agua a la misma temperatura?

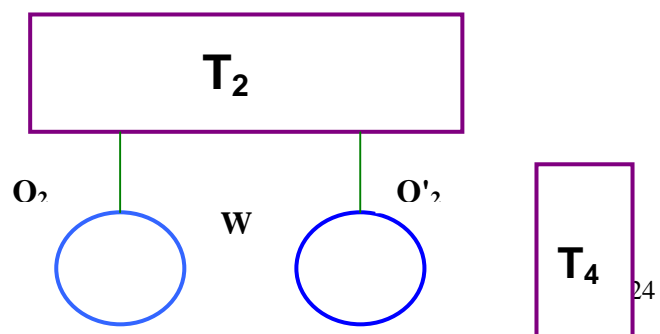
8.2 Primer y segundo principio

- 1) Un motor térmico reversible funciona entre una fuente caliente (a 320°C) y el medio ambiente (a 25°C). Halle el calor tomado de la fuente caliente, el entregado al ambiente, el trabajo realizado y el rendimiento. Si se trata de una máquina real que entrega el 72% del trabajo ideal, calcule su rendimiento.
- 2) 2 kg de aire a presión $p = 1\text{atm}$ y temperatura $T = 300\text{K}$ evolucionan:
 - a) a $p = \text{cte}$ hasta duplicar su volumen
 - b) a $T = \text{cte}$ hasta duplicar su volumenCalcular en ambos casos el trabajo.
Dato: $R_{\text{aire}} = 29,27 \text{ kgf.m/kg}^{\circ}\text{K}$
- 3) Se tienen dos máquinas funcionando en conjunto: M_1 es reversible y su eficiencia es $3/4$.
 - a) calcular T_2 , Q_2 y W . Indicar si M_1 es frigorífica o térmica.
 - b) Hallar T_4 para que la máquina 2 sea reversible.
 - c) Calcular ΔS de cada máquina, de todas las fuentes y del universo para el caso reversible.

Datos: $Q_1 = 100\text{J}$

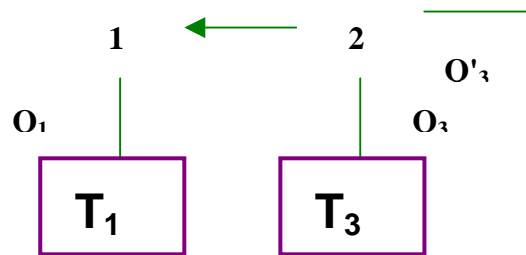
$Q'_2 = 200\text{J}$

$Q_3 = 50\text{J}$

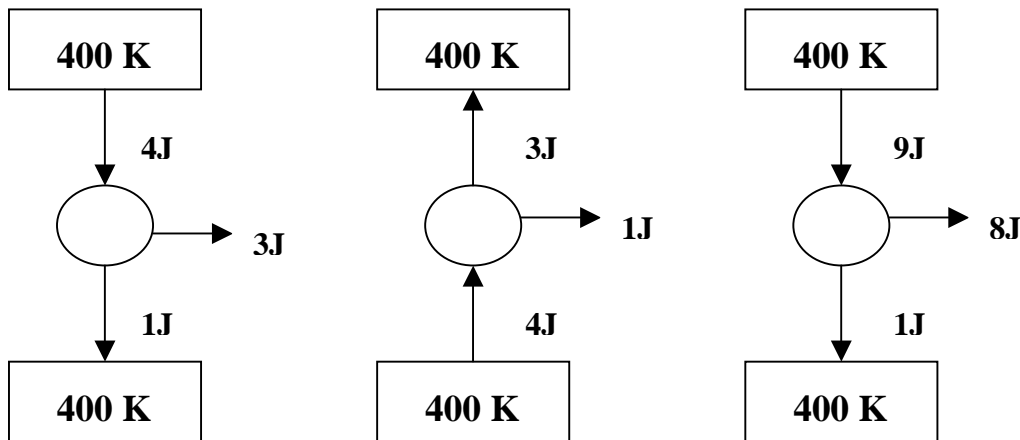


$$T_1 = 200\text{K}$$

$$T_2 = 150\text{K}$$



4) En cada figura, el sistema intercambia calor en un ciclo reversible con dos fuentes caloríficas y entrega trabajo. Para cada figura, definir si el proceso es posible y calcular en tal caso su rendimiento. Determine en cada caso si se trata de un ciclo de Carnot.



5) Un sistema evoluciona de un estado 1 hasta un estado 2 recibiendo 10 Kcal y entrega un trabajo de 5000 kgf.m, del estado 2 pasa al 3 entregando 15 Kcal y recibiendo 10000 kgf.m y del estado 3 pasa al 1 (estado inicial) realizando un trabajo de 10000 kgf.m.

Calcular $U_2 - U_1$, $U_3 - U_2$ y el calor intercambiado en la evolución 3-1.

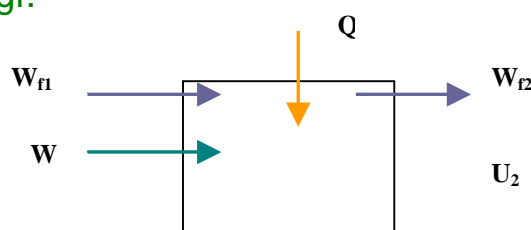
6) Calcular c_p y c_v sabiendo que el aire es un gas diatómico.

Dato: $R_{\text{aire}} = 29,27 \text{ kgf.m/kg}^0\text{K}$

7) demostrar en un diagrama P-V que dos adiabáticas no pueden cortarse.

8) Un compresor de aire toma éste a una presión de $1,05 \text{ kgf/cm}^2$ y lo expulsa a 7 kgf/cm^2 , $V_1 = 0,12 \text{ m}^3/\text{kgf}$ y $V_2 = 0,031 \text{ m}^3/\text{kgf}$. El aumento de energía interna es de 22 cal/kgf y el trabajo que se efectúa sobre el aire para comprimirlo es 39 cal/kgf .

a) Calcular la variación del trabajo de flujo del aire.



b) Que cantidad de calor se transmite? $U_1=0$ → →

9) A partir del diagrama P-V del ciclo de Otto y los datos indicados, calcular:

- a) las coordenadas en cada estado
- b) el calor cedido al gas en un ciclo
- c) el rendimiento del ciclo
- d) Graficar el ciclo en un diagrama P-V y T-S

Datos: $V_1= 200 \text{ cm}^3$ (tramo 1-4) $V_2= 25 \text{ cm}^3$ (tramo 2-3)
 $P_1= 1 \text{ atm}$ $T_1= 27^\circ\text{C}$
 $\kappa= 1,4$ $P_3= 35 \text{ atm}$
 $R_{\text{aire}}= 29,27 \text{ kgf.m/kg}^\circ\text{K}$ $c_v= 0,17 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

10) Explique el experimento de Joule por el cual se demuestra que la energía interna de un gas ideal es función sólo de la temperatura.

11) Un mol de gas ideal diatómico recorre el siguiente ciclo:

Tramo A-B: isocórico

Tramo B-C: isocórico

Tramo C-A: adiabático

Se conocen todas las variables termodinámicas del punto A.

$V_B=2V_A$. Calcular:

- a) Las variables termodinámicas de los puntos B y C.
- b) El trabajo realizado, la variación de energía interna, la cantidad de calor y la variación de entropía para cada tramo y los totales para todo el ciclo.
- c) Si el tramo A-B fuera una evolución irreversible a presión constante, ¿qué condición deben cumplir los estados A y B para aproximar dicha evolución a una reversible?

12) Un motor de Carnot absorbe 1000J de una fuente a la temperatura de ebullición del agua, cede calor a una fuente a la temperatura de fusión del hielo. Calcule el calor cedido, el trabajo realizado y el rendimiento.

13) ¿Cuál es el medio más eficaz para aumentar el rendimiento de un motor de Carnot: aumentar T_C (fuente caliente) manteniendo T_F (fuente

fría) constante o disminuir T_F manteniendo T_C constante?. Sugerencia: utilice el diagrama T-S del ciclo de Carnot.

14) Un mol de gas diatómico evoluciona siguiendo un ciclo de Carnot correspondiente a una máquina térmica. Suponiendo que el ciclo se cumple entre dos fuentes térmicas de 27°C y 87°C y que inicialmente el gas se encuentra en contacto con la temperatura más alta y a una presión máxima de 3 atm y el máximo volumen que alcanza es tres veces el inicial.

- Grafique el ciclo en un diagrama P-V y T-S.
- Calcule W , Q , ΔU , ΔS de cada transformación y el rendimiento del ciclo.
- Otra máquina que trabaja entre las mismas fuentes y es reversible entrega 40J de trabajo ¿Cuánto vale el calor entregado y cedido por dicha máquina?.
- Si la temperatura de una fuente fría aumenta a 40°C ¿en cuanto modificaría la temperatura de la otra fuente para que la máquina funcione con el mismo rendimiento?. Dato: $R=0,082 \text{ atm.l/mol}^\circ\text{K}$

8.3 Transmisión de calor

1) Una pared compuesta de revoque (2 cm) y ladrillo hueco (10 cm) aísla una región con una temperatura $\theta_1=25^\circ\text{C}$ de una región con una temperatura $\theta_2=5^\circ\text{C}$.

a) Calcular el ancho de una pared de hormigón que con el mismo flujo de calor por unidad de área suministrado desde el interior mantiene las mismas temperaturas estacionarias en el ambiente interior y exterior.

b) Dibujar el perfil aproximado para ambas paredes.

Datos: $h= 5,5 \text{ u.p.}$ $k(\text{revoque})=0,65 \text{ u.p.}$

$k(\text{ladrillo})=0,28 \text{ u.p.}$ $k(\text{hormigón})=0,65 \text{ u.p.}$

2) Una cañería transporta un fluido a una temperatura de 150°C siendo la ambiente de 20°C . Para régimen estacionario de transmisión de calor, calcular:

- cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo y longitud.
- temperatura de la cara interna del caño.
- gradiente de temperaturas en la pared del caño para $R_x=2 \text{ cm}$.
- exprese y grafique T en función del radio.

3) Calcular la temperatura final de un componente electrónico en régimen estacionario, cuya potencia de alimentación es de 150 Watts, suponiendo disipación al medio ambiente que está a una temperatura $\theta=30^\circ\text{C}$, a través de un disipador de aluminio cuya superficie es de

100 cm² (anodizado negro mate con $\alpha=1$).

4) Una habitación tiene paredes, piso y techo que bien pueden considerarse aislantes térmicos, con excepción de una de sus paredes que dan al exterior. Dicha pared tiene una ventana de vidrio. El exterior está a $\theta=0^{\circ}\text{C}$. Se desea mantener la habitación a una temperatura constante de 20°C mediante una estufa eléctrica.

a) ¿Cuál será la potencia que deberá entregar dicha estufa?

b) Si el calefactor es un cilindro de cuarzo de emisividad 1, calcule la temperatura superficial en función del área del cilindro.

Datos: $K(\text{vidrio})=0,06$ u.p. $\text{área}(\text{vidrio})=1\text{m}^2$

$K(\text{pared})=0,65$ u.p. $\text{área}(\text{pared})=5\text{m}^2$

$h=5,5$ u.p.

5) Analice todos los mecanismos de transmisión de calor que ocurren si se introduce un cuerpo de masa m a una temperatura T en un fluido a temperatura ambiente. ¿Qué sucede si T es del orden de los 500°C ?

6) Escriba la ecuación diferencial de enfriamiento de un cuerpo de pequeñas dimensiones y muy alta conductividad térmica en un recinto muy grande.

Datos: S : superficie del cuerpo

m : masa

h : coeficiente de convección

e : coeficiente de emisividad

T_0 : temperatura ambiente (en $^{\circ}\text{K}$)

σ : constante de Stefan-Boltzmann

c : calor específico del cuerpo

Ayuda: Si T es la temperatura del cuerpo, suponga $T > T_0$ (el cuerpo entrega calor al ambiente).

Si el cuerpo se encuentra dentro de un recinto, se trata de un sistema aislado.

7) ¿Por qué muchas personas riegan los pisos y las paredes en verano?

8) ¿Por qué durante una compresión adiabática debe aumentar la temperatura del gas?

- 9) ¿Cómo se transmite la energía que el Sol entrega a la Tierra?
- 10) ¿Por qué al tocar un trozo de aluminio a 20°C se siente más frío que al tocar un trozo de madera a la misma temperatura?
- 11) Una esfera de metal a 200°C se sumerge en agua a 20°C , el enfriamiento de la esfera se producirá por conducción, convección o radiación?
- 12) ¿Por qué razón los transformadores se pintan generalmente de negro?
- 13) ¿Por qué se usan ventanas dobles en regiones donde los inviernos son rigurosos?
- 14) Un recipiente adiabático se encuentra totalmente lleno de agua. Si se agita el agua, ¿se produce una disminución de temperatura por convección forzada?
- 15) Dos placas de espesor e , una de cobre y otra de hierro, se ponen en contacto por su superficie inferior con una placa conductora de temperatura constante de 300°C . Después de un tiempo suficientemente largo, las dos placas tienen la misma o diferente temperatura en la superficie superior? ¿Por qué? ($K_{\text{Cu}} > K_{\text{Fe}}$).
- 16) Se tiene un tubo cilíndrico de radio exterior R_1 por el que circula un fluido a alta temperatura. Rodeando el tubo y en contacto con él se encuentra un aislador cilíndrico de radio externo R_2 y coeficiente de conducción K . La pared interior del aislador se encuentra a T_1 y la exterior a T_2 .
- a) Determine el perfil de temperaturas dentro del aislador.
- b) Explique como sería la transmisión de calor al medio exterior si T_2 vale:
- b₁) aproximadamente 50°C .
- b₂) aproximadamente 700°C .

8.2 Verdadero – Falso

- a) El enunciado de Kelvin de la segunda ley dice que es imposible transformar todo el trabajo en calor .
- b) La primera ley dice que el trabajo que realiza un sistema es a expensas del calor que absorbe.
- c) La entropía de un sistema aislado siempre crece.
- d) El rendimiento de una máquina térmica depende sólo del par de temperaturas entre las que opera.

- e) A temperaturas muy altas el mecanismo principal de transferencia de calor es la radiación.
- f) En un gas ideal no se observa disminución de la temperatura en una expansión.
- g) Si hay descenso de la temperatura de un sistema, la energía interna disminuye.
- h) Cuanto más oscura es la superficie de un cuerpo, absorbe mayor radiación.
- i) Al disminuir la temperatura, aumenta la conductividad térmica.
- j) Se obtiene más trabajo por un camino irreversible que por uno reversible.