



# APUNTES DE TERMODINÁMICA

Clave (0068)

ING. JOSÉ ENRIQUE LARIOS CANALE  
PROFESOR DE CARRERA  
TITULAR “A”, TIEMPO COMPLETO  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y QUÍMICA

# TEMA 2

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

# TEMA 2

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

**Objetivo del programa:** El alumno reconocerá el concepto de energía y explicará al calor y al trabajo como formas del tránsito de energía. Aplicará los balances de masa y de energía a sistemas de interés en ingeniería.

## OBJETIVO DEL CURSO

El alumno analizará los modelos matemáticos básicos de la Primera y la Segunda leyes de la Termodinámica para efectuar balances de energía y de entropía en sistemas termodinámicos para plantear la solución de problemas de ingeniería.

# CONTENIDO

**2.1** Concepto de calor como energía en tránsito. Capacidad térmica específica. Convención de signos.

**2.2** Concepto de trabajo como mecanismo de transmisión de energía. La definición mecánica. Trabajo de eje, trabajo de flujo y trabajo casiestático de una sustancia simple compresible. Convención de signos.

**2.3** El experimento de Joule, relación entre calor y trabajo.

**2.4 Primera Ley de la Termodinámica. El principio de conservación de la energía. Balances de masa y energía en sistemas cerrados y abiertos (Principalmente en equipos industriales de interés en la Termodinámica).**

**2.5 Ecuaciones de balance de energía en sistemas cerrados. Ecuaciones de balance de masa y energía en sistemas abiertos bajo régimen estable, permanente o estacionario, régimen uniforme y en fluidos incompresibles. Balances en sistemas que realizan ciclos. Eficiencia térmica.**

**2.6** La energía interna y el calor a volumen constante: la capacidad térmica específica a volumen constante (cv). La entalpia y el calor a presión constante: la capacidad térmica específica a presión constante (cp).

2.1 Concepto de calor como energía en tránsito. Capacidad térmica específica. Convención de signos.

2.2 Concepto de trabajo como mecanismo de transmisión de energía. La definición mecánica. Trabajo de eje, trabajo de flujo y trabajo casies-tático de una sustancia simple compresible. Convención de signos.

- Concepto de energía y su clasificación. Unidad de medición de la energía en el SI.  
Energías en transición: calor y trabajo.  
La energía como propiedad del sistema.  
Energías cinética, potencial gravitatoria e interna.

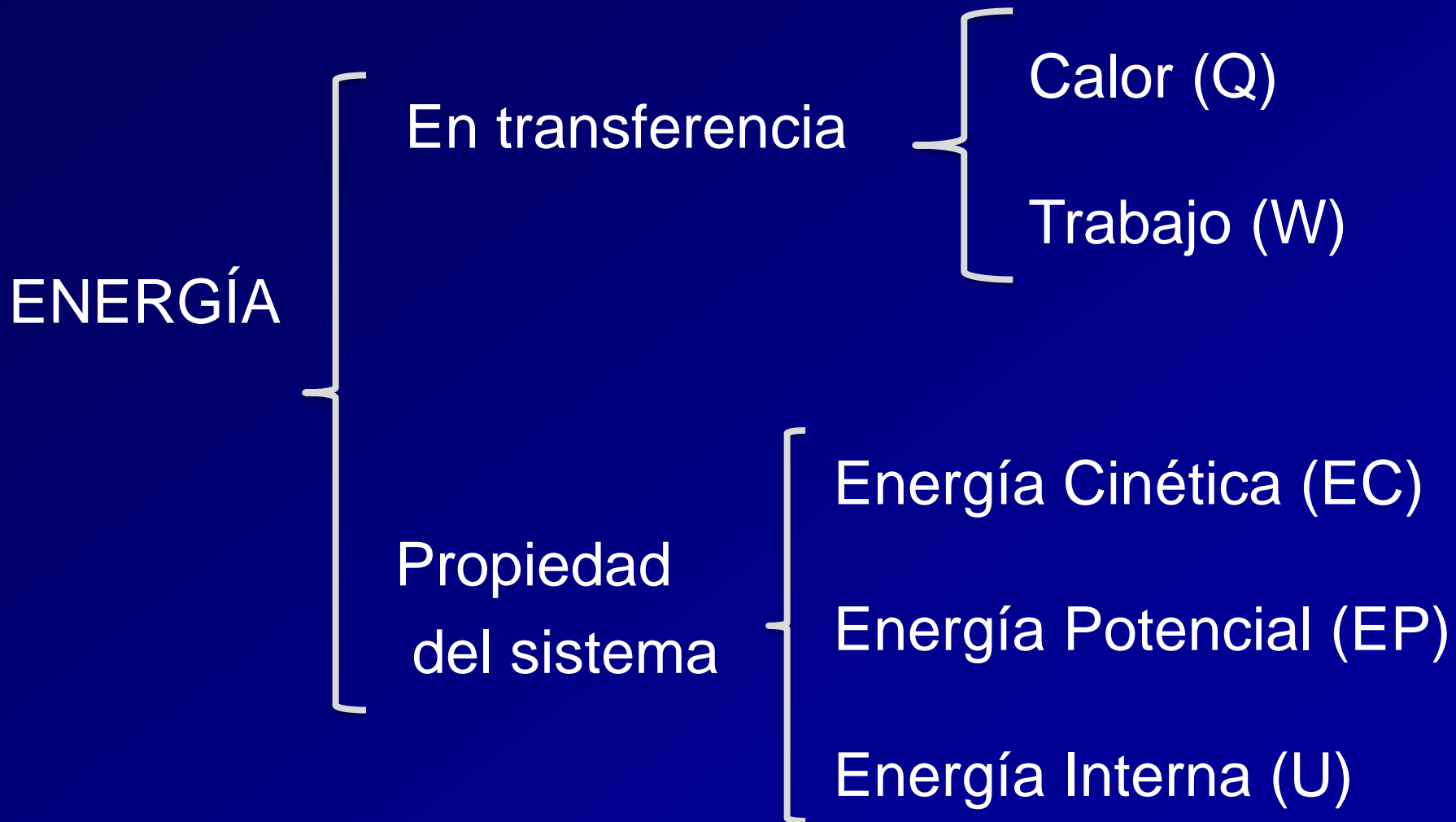


# CONCEPTO DE ENERGÍA Y SU CLASIFICACIÓN.

**ENERGÍA.** Desde el punto de vista de la mecánica, es la capacidad de un cuerpo o sistema para producir un trabajo mecánico de desplazamiento sobre otro cuerpo o sistema.

En general, se puede decir que la energía es la capacidad latente o aparente que tiene un cuerpo o un sistema para producir cambios en sí mismo o en su medio ambiente.

# CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA



UNIDAD DE MEDICIÓN DE LA ENERGÍA EN EL SI. La cantidad física energía se obtiene a partir del concepto de trabajo realizado al aplicar una fuerza ( $F$ ) a un cuerpo o sistema para producirle un desplazamiento ( $L$ ), por lo que en el Sistema Internacional de Unidades la energía es una unidad derivada que se cuantifica en Joules (J). La cantidad física de fuerza ( $F$ ) se obtiene a partir de la Segunda Ley de Newton:  $F = ma$

La cantidad física desplazamiento ( $L$ ), es una dimensión fundamental del Sistema Internacional de Unidades, cuya unidad básica se cuantifica en metros (m) y que al

multiplicarse por la unidad derivada Newton (N) define la unidad de energía (E) en Joule (J), estableciendo que un Joule es igual al trabajo requerido para desplazar un metro a un sistema al aplicársele una fuerza (F) de una magnitud de un Newton (N):

$$1 \text{ Joule (J)} = [1 \text{ Newton (N)}][1 \text{ metro (m)}]$$

En el Sistema Internacional la expresión dimensional para la cantidad física energía (E) es:

$$\left\{ E = M^1 L^2 T^{-2} \right\} \quad (\text{expresión breve})$$

donde  $n = 3$  y  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 2$  y  $a_3 = -2$

La expresión dimensional completa de la energía es:

$$\left\{ E = M^1 L^2 T^{-2} I^0 \Theta^0 I_L^0 N^0 \right\}$$

Donde:

M = masa

L = longitud

T = tiempo

I = corriente eléctrica

$\Theta$  = temperatura termodinámica

$I_L$  = intensidad luminosa

N = cantidad de sustancia

# ENERGÍA EN TRANSICIÓN: CALOR ( ${}_1Q_2$ ):

Es energía microscópica que se transfiere de un sistema a otro debido a un potencial energético que a nivel molecular hay entre ellos, la energía transferida es electromagnética y que a nivel macroscópico se detecta como un potencial tér-mico, transfiriéndose el calor del sistema que está a mayor temperatura al que está a menor temperatura.

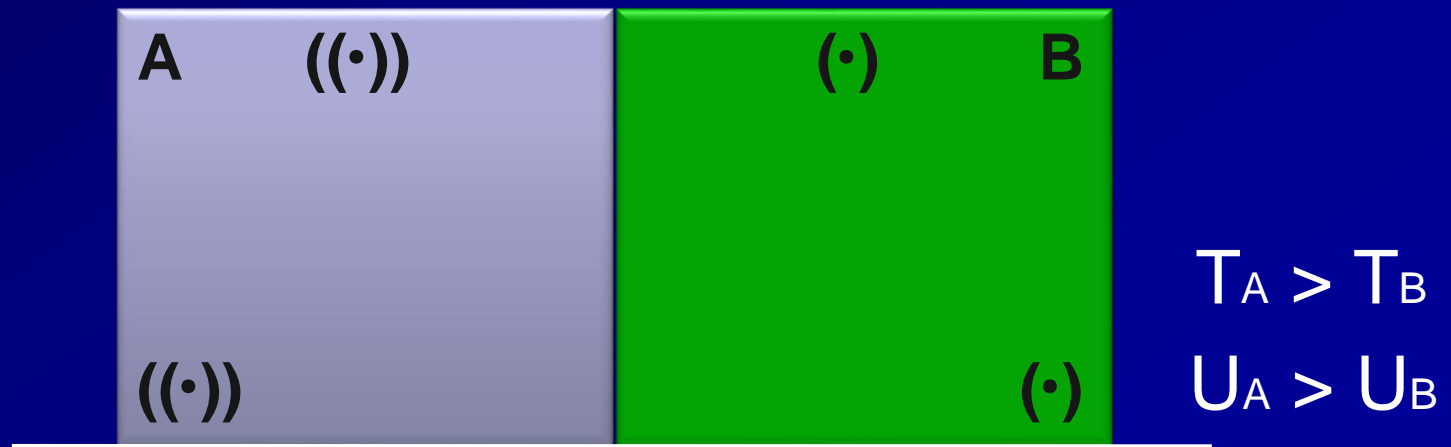
El calor es energía electromagnética en transferencia del sistema de mayor temperatura al de menor temperatura.

# MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En general, la energía en forma de calor se transfiere de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura. A) Cuando están en contacto estos dos cuerpos, a la transferencia de calor se le denomina por Conducción. B) Si entre los dos cuerpos se tiene la presencia de un fluido que funciona como intermediario para la transferencia de calor a este se le denomina por Convección. C) Cuando hay una cierta distancia entre estos cuerpos, se dice que la transferencia de calor es por Radiación.

# CONDUCCIÓN: En desequilibrio térmico.

Si se tienen los cuerpos «A» y «B» del mismo material y con la misma masa y están en contacto, pero con diferente nivel energético molecular, éste se detecta como una temperatura diferente en cada uno de ellos.





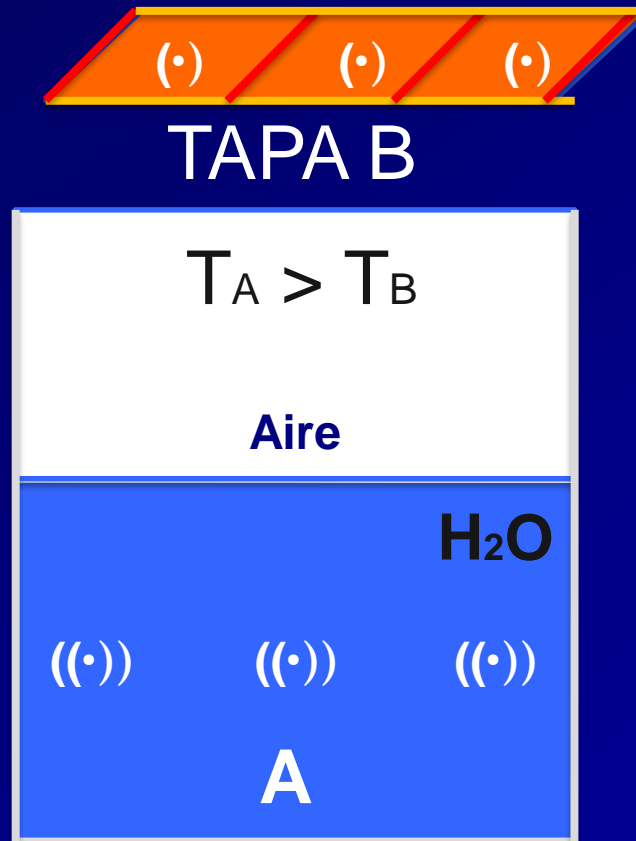
# CONDUCCIÓN: En equilibrio térmico.

Después de un cierto tiempo, hay una interacción energética a nivel molecular de tipo electromagnético en donde el cuerpo «A» le cede energía al cuerpo «B» hasta alcanzar el mismo nivel de energía molecular, es decir, la misma temperatura.



# CONVECCIÓN: En desequilibrio térmico

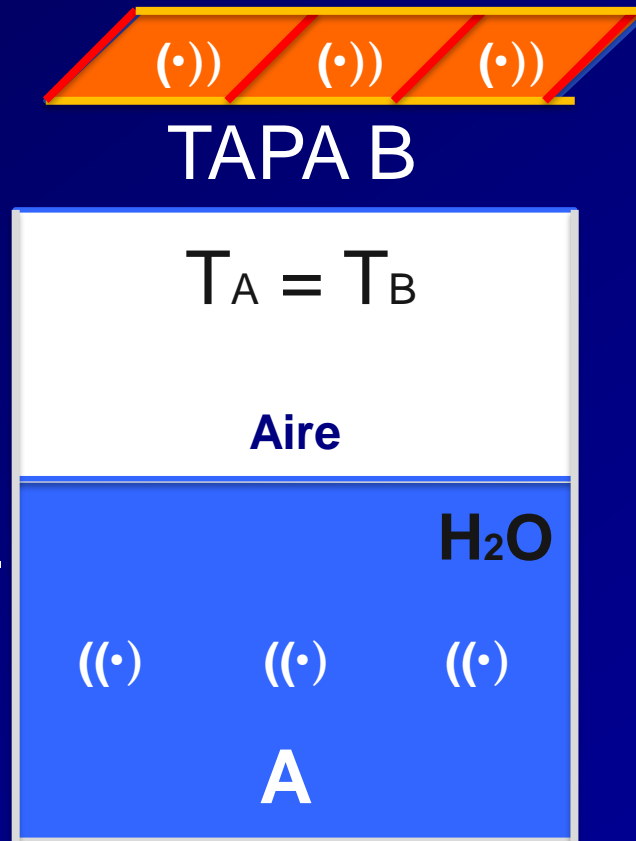
Las moléculas del agua en ebullición reciben la energía de la fuente de calor «Q», que está a mayor temperatura, que la TAPA (B), que se encuentra



a menor temperatura. La energía interna del cuerpo (A) es mayor que la energía interna del cuerpo (B), como se observa por su nivel de energía molecular.

# CONVECCIÓN: En equilibrio térmico

Las moléculas de vapor de agua ceden energía a las moléculas de la TAPA (B), y adquieren el mismo nivel energético que las moléculas del agua en ebullición, cesan-



do la transferencia de energía en forma de calor. La energía molecular del cuerpo (A) se equilibra con el cuerpo (B), como se observa por su nivel de energía molecular.

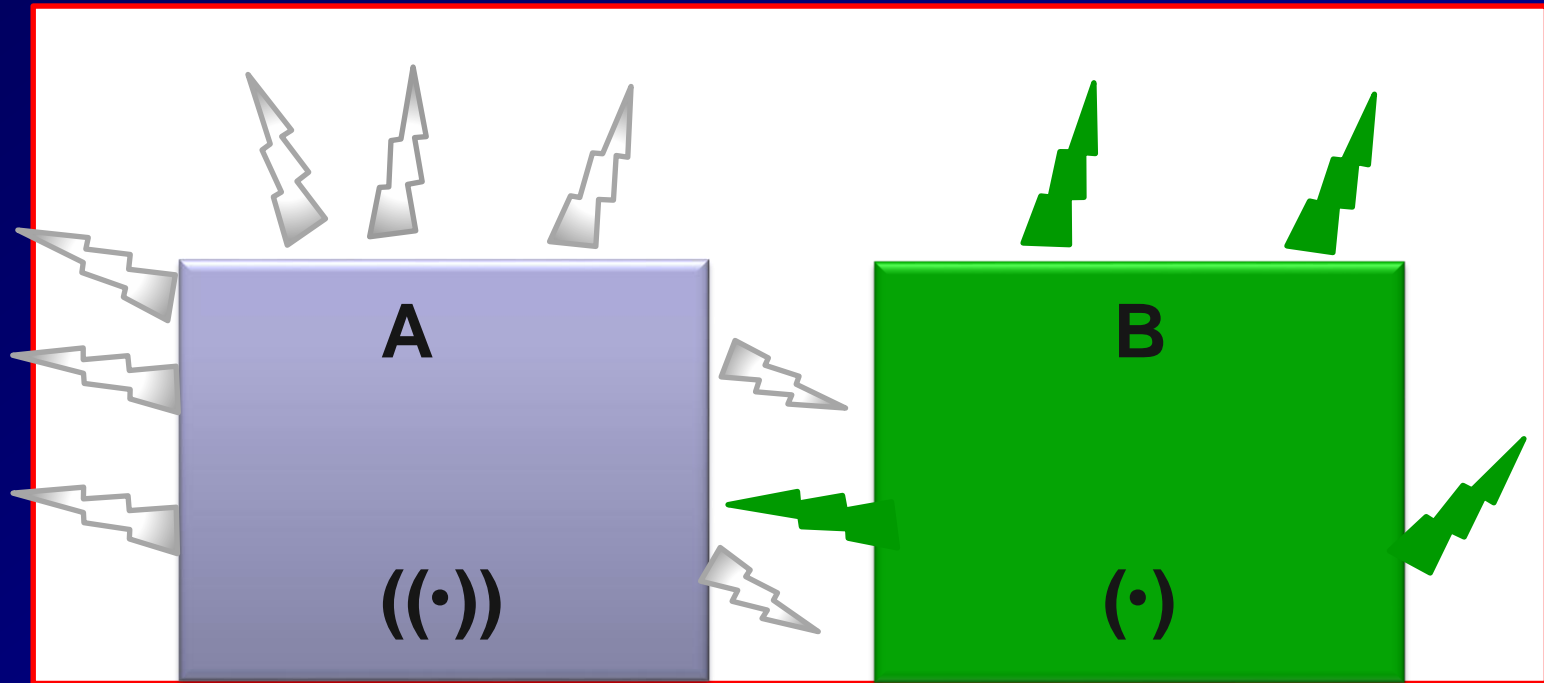
# RADIACIÓN

En la diapositiva siguiente, se tienen los cuerpos «A» y «B» del mismo material y con la misma masa y no están en contacto, se encuentran a cierta distancia a un diferente nivel energético molecular, éste se detecta como una temperatura diferente en cada uno de ellos. El cuerpo «A» radia ondas electromagnéticas en mayor cantidad que las que emite el cuerpo «B». Se asume que las paredes interiores del cuarto hermético son adiabatas y están recubiertas con espejos perfectos que reflejan las ondas electromagnéticas emitidas por los cuerpos «A» y «B».

# RADIACIÓN: En desequilibrio térmico

$$T_A > T_B$$

$$U_A > U_B$$



Cuarto hermético de paredes adiabáticas

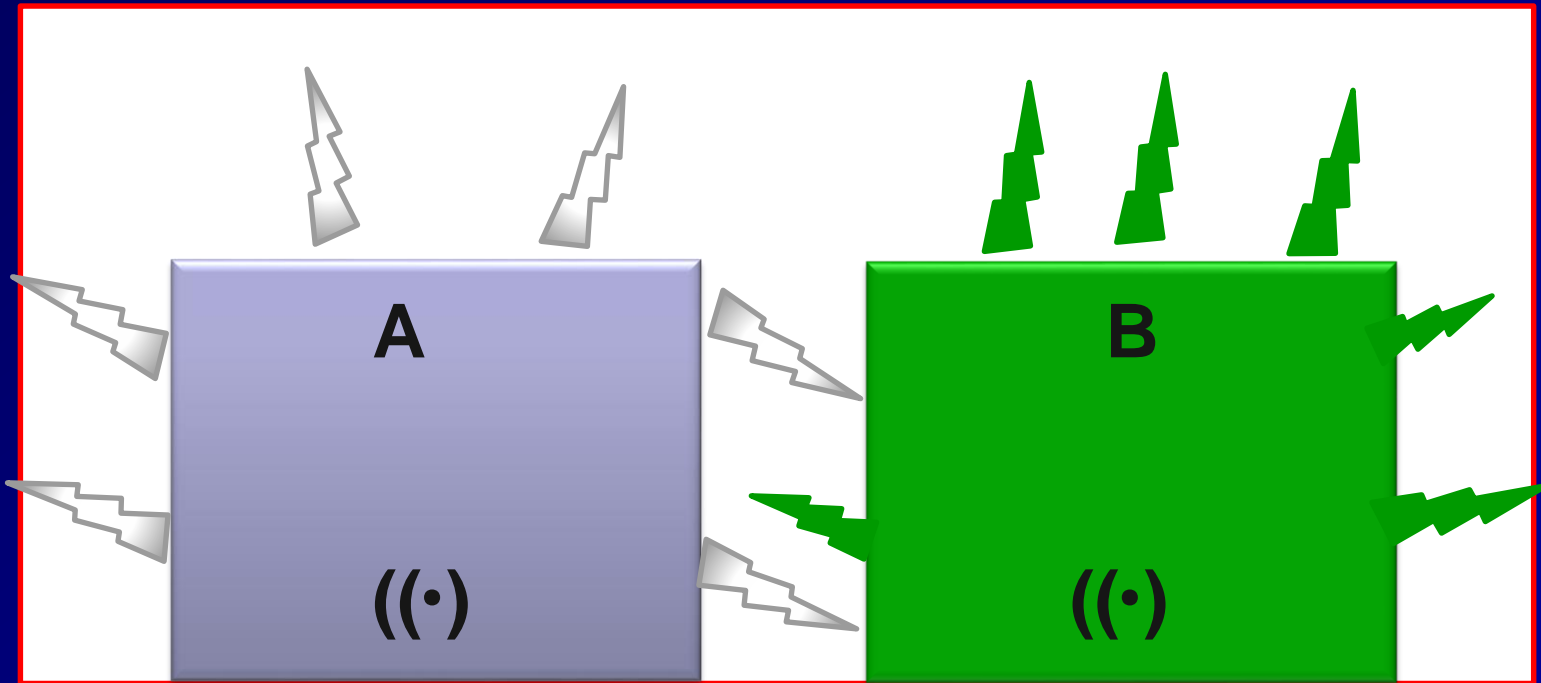
El cuerpo «A» emite más energía (ondas electro-magnéticas) de las que recibe, por su parte, el cuerpo «B» recibe más energía (ondas electromagnéticas) que las que emite.

Después de un cierto tiempo la cantidad de energía que emiten y reciben los cuerpos «A» y «B» es la misma, es decir, han llegado al equilibrio térmico y su nivel energético molecular es el mismo y se detecta macroscópicamente porque su temperatura es igual, por lo tanto, su energía interna es la misma. Lo anterior se muestra en la siguiente diapositiva.

# RADIACIÓN: En equilibrio térmico

$$T_A = T_B$$

$$U_A = U_B$$



Cuarto hermético de paredes adiabáticas

# ENERGÍA EN TRANSICIÓN: TRABAJO ( ${}_1W_2$ ):

Es la energía macroscópica que se transfiere por un agente externo o un sistema que tiene un potencial mecánico mayor que otro sistema o cuerpo quien recibe la acción de este agente externo causándole un desplazamiento.

El trabajo se denota con la letra «W» del inglés *WORK*, y su análisis dimensional corresponde al que se efectuó para la energía en un subtema anterior, a partir del concepto de trabajo. El trabajo es un mecanismo de transferencia de energía mecánica macroscópicamente observable.



Cuando un sistema de cuerpos que interactúan entre sí, o específicamente la acción de un agente externo sobre un sistema tiene como resultado un desequilibrio de fuerzas, decimos que hay un potencial de energía mecánica. El potencial mecánico se manifiesta como una fuerza que produce un desplazamiento en un sistema. El trabajo se evalúa con la integral curvilínea del producto interno de los vectores fuerza y diferencial de desplazamiento.

$${}_1W_2 = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

$$(N - m) = (\text{Joule})$$

NOTACIÓN: Dado que el calor y el trabajo son energías en transferencia de un sistema a otro o de un agente externo a un sistema específico, la cantidad de energía transferida depende de la trayectoria y por ello la notación que se emplea para especificar esta característica es colocando el estado inicial al principio de la letra y el estado final al término de la letra como a continuación se observa:

Calor  $\rightarrow {}_1Q_2$

Trabajo  $\rightarrow {}_1W$

# ENERGÍA CINÉTICA (EC):

Es la energía que tiene un sistema debido a su masa y a su movimiento de translación con respecto a un sistema de referencia y se evalúa por el producto de la masa por la velocidad al cuadrado sobre dos.

$$\Delta EC_{12} = (1/2)(m) (V_2^2 - V_1^2)$$

$$\left( \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) = \left( \text{kg} - \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - \text{m} \right) = (\text{N} - \text{m}) = (\text{J})$$

# ENERGÍA POTENCIAL (EP):

Es la energía que posee un sistema debido a su masa y a su posición dentro del campo gravitatorio, con respecto a un sistema de referencia que está dentro del campo gravitatorio y se evalúa por el producto de la masa, la gravedad y la altura con respecto a un sistema de referencia.

$$\Delta EP_{12} = (m)(g)(z_2 - z_1)$$

$$\left( \text{kg} - \underline{\text{m}} - \text{m} \right) = (\text{N} - \text{m}) = (\text{J})$$

# ENERGÍA INTERNA (U):

La energía interna de un sistema equivale a la suma de las diferentes formas de energía que tienen las moléculas que lo conforman (rotación, translación, vibración, spin del electrón, de enlace, etc.)

$$\Delta U_{12} = \int_1^2 dU = \int_1^2 mc_v dT + \int_1^2 \left. \frac{md\bar{u}}{dv} \right] dv \text{ (J)}$$

De la 1ª Relación Generalizada  
(Que se demostró en el tema anterior)

**NOTACIÓN:** Dado que las energías cinética, potencial e interna, son energías propiedad de un sistema, éstas dependen únicamente del estado inicial y del estado final, por lo cual la notación que se emplea para caracterizar que no dependen de la trayectoria, sino del estado inicial y final se indica con subíndices al término del símbolo de la energía que varía como a continuación se señala:

Energía Cinética  $\rightarrow \Delta EC_{12}$

Energía Potencial  $\rightarrow \Delta EP_{12}$

Energía Interna  $\rightarrow \Delta U_{12}$

## EJERCICIO: 2.1

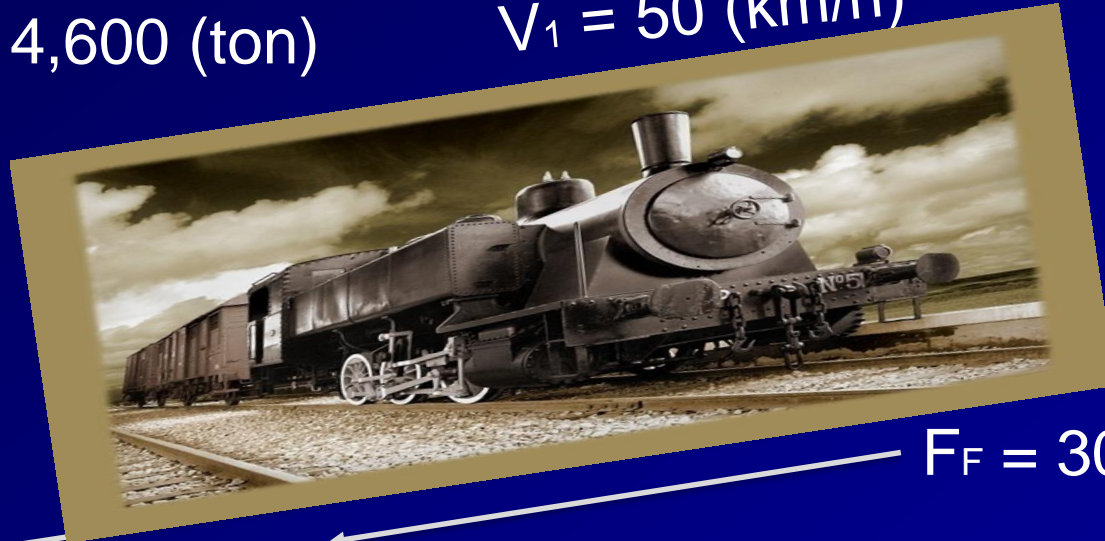
¿Cuál es la potencia que desarrolla una locomotora que sube un tren a 50 (km/h) por una pendiente que se eleva 30 (cm) verticalmente por cada 30 (m) medidos horizontalmente?

La masa total de la locomotora y de los vagones es de 4,600 toneladas y la resistencia por fricción es de 30 (N/tonelada). Considere que la aceleración de la gravedad es  $g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ .

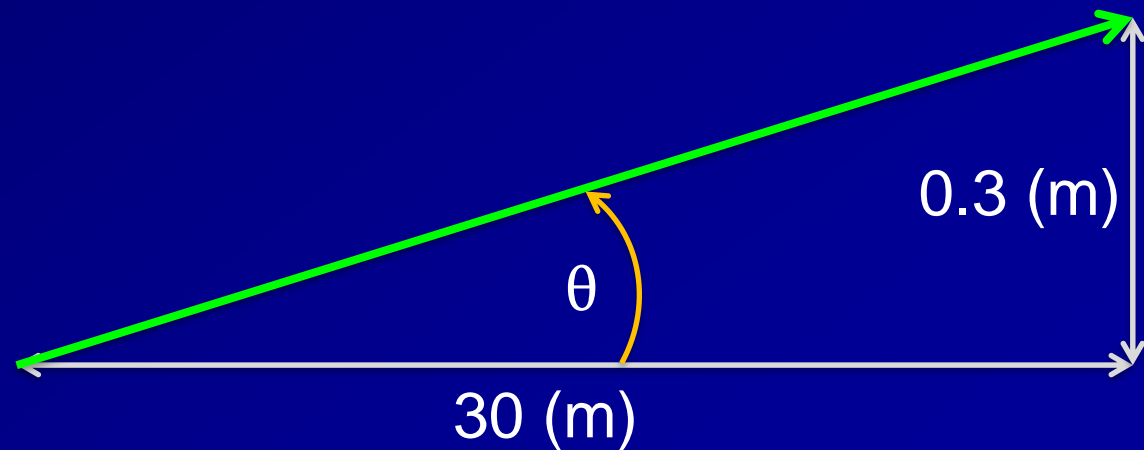
$$\dot{W}_L = ? \text{ (kW)}$$

$$m_L = 4,600 \text{ (ton)}$$

$$\overline{V}_1 = 50 \text{ (km/h)}$$



$$F_F = 30 \text{ (N/ton)}$$





# RESOLUCIÓN:

a)

$$\dot{W}_L = \dot{W}_{\text{Desp}} + \dot{W}_{\text{EP}} \dots (1)$$

$$F_L = F_{F)T}$$

$$F_{F)T} = (F_F)(\text{masa})_L = (30 \text{ N/ton})(4,600 \text{ ton})$$

$$F_L = F_{F)T} = 138 \text{ (kN)}$$

$$W_{\text{Desp}} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_1^2 |\vec{F}_L| |d\vec{s}| \cos\theta; \theta = 0^\circ$$

Dividiendo el trabajo en la unidad de tiempo «t»

$$\dot{W}_{\text{Desp}} = \frac{W_{\text{Desp}}}{t} = \frac{F_L}{t} \int_1^2 ds = \frac{F_L(s_2 - s_1)}{t} = F_L |\bar{V}_L|$$

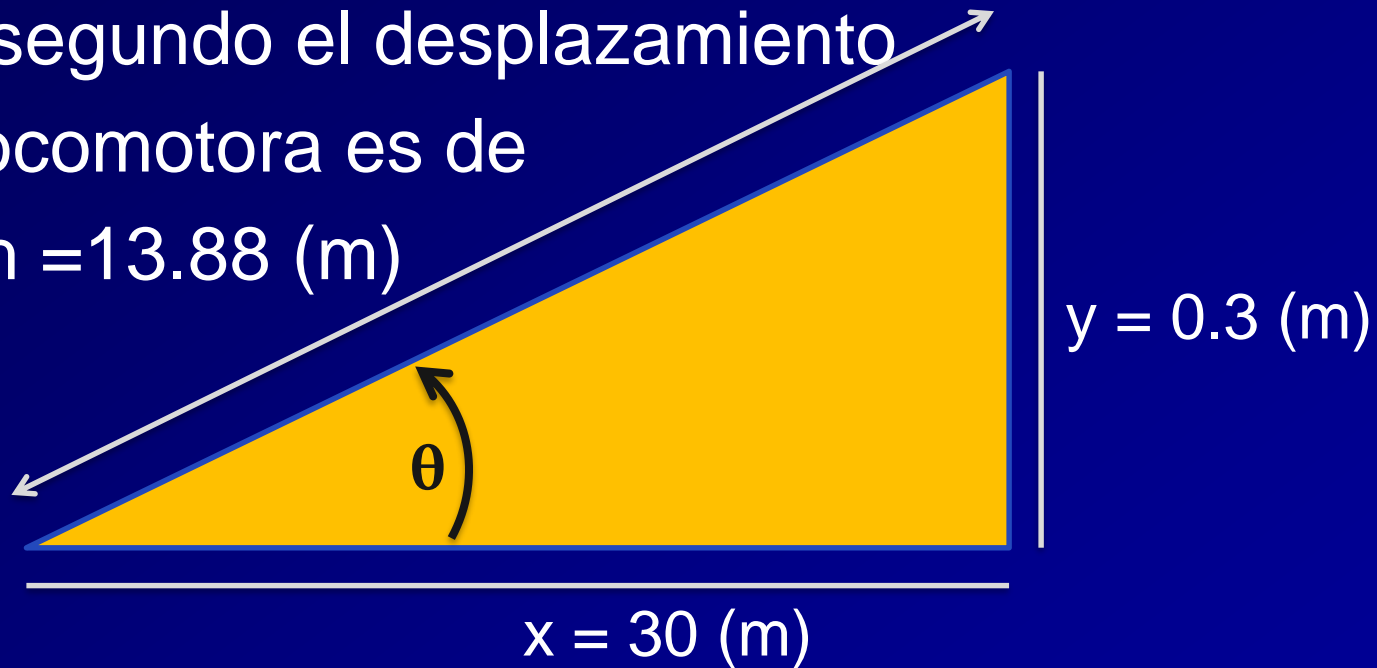
Sustituyendo datos:

$$\dot{W}_{\text{Desp}} = (138 \text{ kN}) \left( \frac{50 \times 10^3 \text{ m}}{3,600 \text{ s}} \right) = 1,915.44 \text{ (kW)}$$

$$|\bar{V}_L| = \frac{(s_2 - s_1)}{t} = 13.88 \text{ (m/s)}$$

En un segundo el desplazamiento de la locomotora es de

$$h = 13.88 \text{ (m)}$$



$$\theta = \text{ángtang}(y/x) = \text{ángtang}(0.3/30) = 0.573^\circ$$

$$\text{sen}\theta = y/h; y = h\text{sen}\theta$$

Autor: José Enrique Larios Canale

Sustituyendo datos:

$$y = (13.88)(\text{sen } 0.573) = 0.138 \text{ (m)}$$

$$y = 0.138 \text{ (m)}$$

$$\dot{W}_{EP} = \frac{\Delta EP_L}{t} = \frac{mgy}{t}$$

Sustituyendo valores:

$$\dot{W}_{EP} = \frac{(4,600)(9.81)(0.138)}{1 \text{ seg}}$$

$$\dot{W}_{EP} = 6,227.388 \text{ (kW)}$$

Sustituyendo datos en la ecuación (1)

$$\dot{W}_L = 1,915.44 + 6,227.388$$

$$\dot{W}_L = 8,142.828 \text{ (kW)}$$

## 2.3 El experimento de Joule, relación entre calor y trabajo.

El experimento de Joule tuvo la finalidad de encontrar el factor de conversión de unidades en el sistema MKS, ya que, el calor en este sistema de unidades se cuantifica en kilocalorías y el trabajo en Joule. Este factor de conversión establece que una kilocaloría de energía en forma de calor equivale a un Joule de energía en forma de trabajo.

2.4 Primera Ley de la Termodinámica. El principio de conservación de la energía. Balances de masa y energía en sistemas cerrados y abiertos (Principalmente en equipos industriales de interés en la Termodinámica).

2.5 Ecuaciones de balance de energía en sistemas cerrados. Ecuaciones de balance de masa y energía en sistemas abiertos bajo régimen estable, permanente o estacionario, régimen uniforme y en fluidos incompresibles. Balances en sistemas que realizan ciclos. Eficiencia térmica.

# PRINCIPIOS DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA Y LA ENERGÍA

En la Termodinámica Clásica los intercambios de energía se llevan a cabo a velocidades muy inferiores a la velocidad de la luz, es por ello que en los procesos termodinámicos la transformación de masa en energía es despreciable, aún cuando se presenten flujos de masa entrando o saliendo de un sistema abierto, la variación de masa es despreciable.

Si se analiza un proceso de transformación de energía, como por ejemplo el proceso exotérmico de la combustión, se obtiene lo siguiente.



De la Teoría de la Relatividad la masa y la energía están relacionadas por la ecuación:

$$E = mc^2$$

que determina la variación de la masa de un sistema cuando cambia su energía. Calculamos la magnitud de este cambio de masa para un problema típico, y determinamos cuando tiene significación este cambio de masa.

Consideremos como sistema un recipiente rígido que contenga 1.0 (kg) de una mezcla estequiométrica de gasolina y aire, que después de que se efectúa la combustión transmite 2,904.38 (kJ)

de energía en forma de calor.

$$E = mc^2$$

$$2,904.38 \text{ (kJ)} = m(2.998 \times 10^8)^2$$

$$m = \frac{2,904.38 \times 10^3}{(2.998 \times 10^8)^2}$$

$$m = 3.2314 \times 10^{-11} \text{ (kg)} = 3.2314 \times 10^{-8} \text{ (g)}$$

Un cambio de masa de esta magnitud no se detecta ni con la balanza electrónica más precisa,

por lo tanto en la Termodinámica Clásica establecemos los principios de la conservación de la masa y de la energía como leyes independientes.

Como una consecuencia de lo anteriormente expuesto, se enuncia el:

## PRINCIPIO DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA:

**“LA MASA EN UN SISTEMA TERMODINÁMICO SE MANTIENE CONSTANTE”**

La otra consecuencia de lo anteriormente expuesto, permite enunciar el:

## PRINCIPIO DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA:

“LA ENERGÍA NO SE CREA NI SE DESTRUYE, SÓLO SE TRANSFORMA.”

Con base en los conceptos de sistema termodinámico y de energía, respectivamente, y aplicando el Principio de la Conservación de la Energía se puede enunciar la:

# PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

LA ENERGÍA TOTAL TRANSFERIDA EN FORMA DE CALOR Y DE TRABAJO A UN SISTEMA TERMODINÁMICO (suma algebraica del calor y del trabajo que entra [+] y sale [-]) ES IGUAL A LA VARIACIÓN DE LA ENERGÍA COMO PROPIEDAD DEL SISTEMA (suma algebraica de las variaciones de energía cinética, energía potencial y energía interna).

El operador matemático que se emplea para evaluar la variación infinitesimal del calor y del trabajo es la diferencial inexacta, que se denota con el símbolo “ $\delta$ ”, ya que, tanto el calor como el trabajo dependen de la trayectoria y su evaluación en un proceso finito se tiene que realizar con una integral curvilínea.

Es por ello que las diferenciales inexactas del calor y del trabajo se expresan con los siguientes términos:  $\delta Q$  y  $\delta W$ . Si se evalúan estas transferencias de energía en un proceso finito, como se vio anteriormente, para expresar que dependen de la trayectoria, se emplea la siguiente notación:  ${}_1Q_2$  y  ${}_1W_2$

Las energías como propiedad del sistema: cinética, potencial e interna, que son propiedades de punto, es decir, que dependen únicamente de su estado inicial y final, la variación infinitesimal de estas energías como propiedad del sistema se evalúa con la diferencial exacta (ordinaria), que se denota con el símbolo “d”.

Es por ello que las diferenciales exactas de las energías: cinética, potencia e interna, se expresan con los siguientes términos:  $dEC$ ,  $dEP$  y  $dU$ . Si se evalúan estas energía en un proceso finito, como ya se vio anteriormente, ya que dependen del estado inicial y final, se emplea la siguiente notación:  $\Delta EC_{12}$ ,  $\Delta EP_{12}$  y  $\Delta U_{12}$ .

La aplicación de los principios de la conservación de la energía y de la masa a un sistema termodinámico, es decir, a una porción del universo en el cual se desarrolla un fenómeno termodinámico, y en el que se lleva a cabo un balance de energía, y con este fin se le delimita con una envolvente imaginaria llamada frontera, a través de la cual puede cruzar masa y también energías en forma de calor y de trabajo, para producir cambios en la energía como propiedad del sistema: energía cinética, energía potencia y energía interna, se representa gráficamente como se indica en la siguiente diapositiva. Las expresiones matemáticas de la 1ª Ley de la Termodinámica corresponde al enunciado anterior.



# SISTEMA TERMODINÁMICO

MEDIO  
AMBIENTE

$$\bar{d}Q + \bar{d}W = dEC + dEP + dU$$

$$\Delta E)_{\text{SIST}} = \Delta EC_{12} + \Delta EP_{12} + \Delta U_{12}$$

$$dE)_{\text{SIST}} = dEC + dEP + dU$$

$${}_1Q_2^{(+)}, {}_1W_2^{(+)}$$

$$\bar{d}Q^{(+)}, \bar{d}W^{(+)}$$

$${}_1Q_2^{(-)}, {}_1W_2^{(-)}$$

$$\bar{d}Q^{(-)}, \bar{d}W^{(-)}$$

$$\int_1^2 \bar{d}Q + \int_1^2 \bar{d}W = \int_1^2 dEC + \int_1^2 dEP + \int_1^2 dU$$

FRONTERA

$${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E_{12})_{\text{SIST}} = \Delta EC_{12} + \Delta EP_{12} + \Delta U_{12}$$

# MODELOS MATEMÁTICOS

Cuando se llevan a cabo transferencias de energía en forma de calor y de trabajo a un sistema, éste, en general, presenta cambios en sus energías cinética, potencial o interna, es decir, se lleva a cabo un proceso que se define como:

**PROCESO:** Es la sucesión de cambios de estado de la sustancia de trabajo de un sistema termodinámico, cuando se le transfiere energía en forma de calor y/o de trabajo. La trayectoria del proceso se rige bajo una regla matemática que caracteriza el comportamiento de la sustancia de trabajo dado por las propiedades termodinámicas independientes que observan un comportamiento de un estado termodinámico inicial a uno final.

**EJERCICIO 2.3.1** Para cada uno de los siguientes casos correspondientes a procesos de sistemas cerrados, complétense los datos que faltan:

Proc.	${}_1Q_2$	${}_1W_2$	$E_2$	$E_1$	$\Delta E_{12}$
(a)	24	-15	-8		
(b)	-8		62		-18
(c)		17		-14	20
(d)	16			27	12
(e)	-9	15		29	
(f)		-10	6		-10

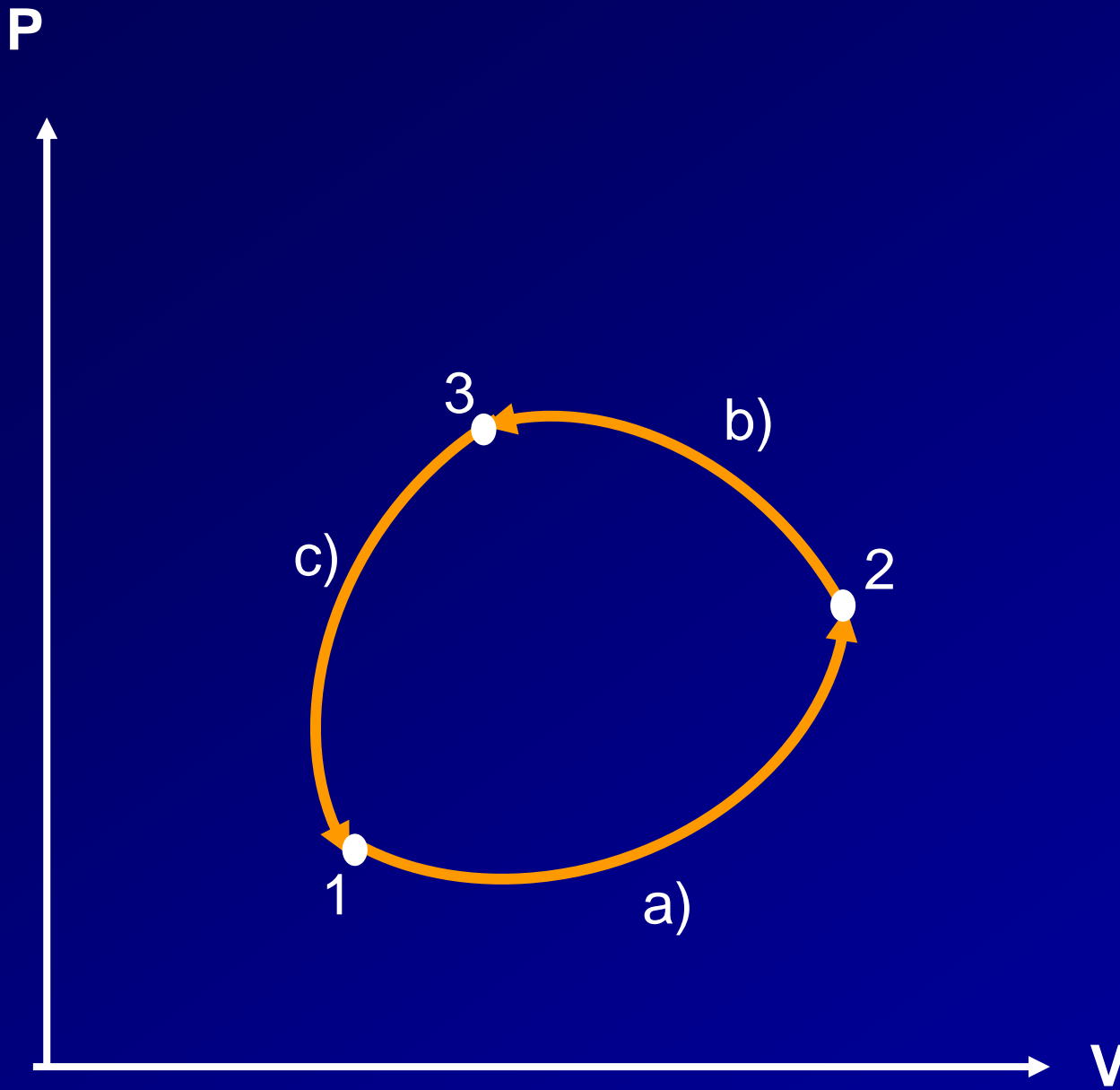
**RESOLUCIÓN:** Aplicando la 1ª Ley de la Termodinámica para un Sistema termodinámico cerrado, se tiene

<b>Proc.</b>	${}_1Q_2$	${}_1W_2$	$E_2$	$E_1$	$\Delta E_{12}$
(a)	24	-15	-8	-17	9
(b)	-8	-10	62	80	-18
(c)	3	17	6	-14	20
(d)	16	-4	39	27	12
(e)	-9	15	35	29	6
(f)	0	-10	6	16	-10

**2.5** Un sistema cerrado experimenta un ciclo compuesto por los procesos a, b y c. Los datos del ciclo se muestran a continuación, calcule los datos que faltan para los tres procesos:

Proc.	${}_1Q_2$	${}_1W_2$	$E_2$	$E_1$	$\Delta E_{12}$
(a)	-3			4	-2
(b)	4		5		
(c)		6			
$\Sigma$					
	$\oint dQ$	$\oint dW$			

(KENNETH WARK-DONALD E. RICHARDS TERMODINÁMICA, 6ª Edición, Mac Graw Hill, España, 2001)



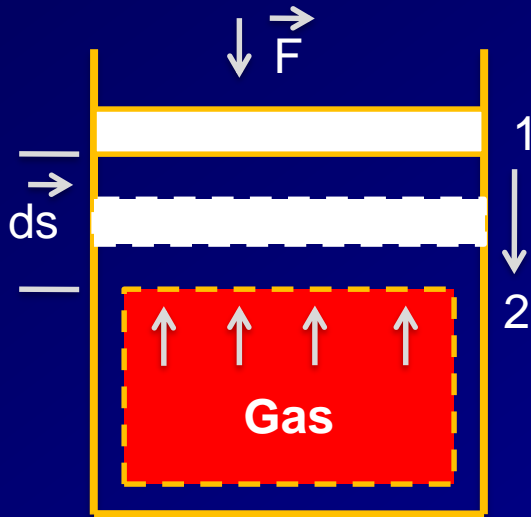
2.5 (Resolución) Un sistema cerrado experimenta un ciclo compuesto por los procesos a, b y c. Los datos del ciclo se muestran a continuación, calcule los datos que faltan para los tres

Proc.	${}_1Q_2$	${}_1W_2$	$E_2$	$E_1$	$\Delta E_{12}$
1-2 (a)	-3	1	2	4	-2
2-3 (b)	4	-1	5	2	3
3-1 (c)	-7	6	4	5	-1
$\Sigma$	-6	6	11	11	0
	$\oint dQ$	$\oint dW$			0

(KENNETH WARK-DONALD E. RICHARDS TERMODINÁMICA, 6ª Edición, Mac Graw Hill, España, 2001)

**SUSTANCIA SIMPLE COMPRESIBLE:** Es aquella sustancia de trabajo, gas o vapor sobrecalentado, cuya forma relevante de efectuar trabajo potencialmente reversible es debido a su capacidad de variar su volumen.

$${}_1W_2 = \int_1^2 \vec{F}_g \cdot d\vec{s}$$



Proceso  
Cuasiestático

La evaluación del trabajo de una Sustancia Simple Compresible se calcula con la ecuación general del trabajo mecánico.

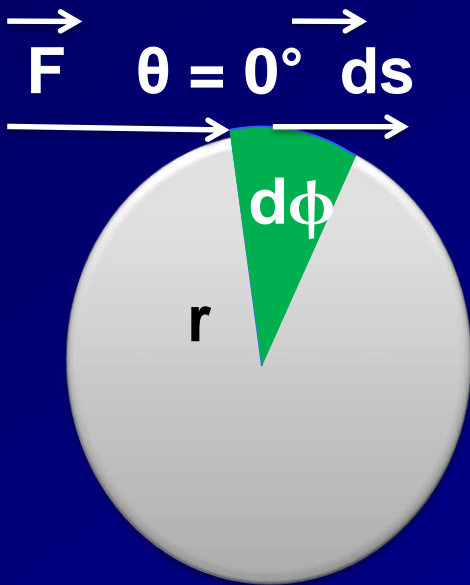


# TRABAJO DE FLECHA O EJE ( $W_{\text{eje}}$ )

$$|ds| = |rd\phi|$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_1^2 |\vec{F}| |rd\phi| \cos\theta$$

$$\cos 0^\circ = 1$$



$$\int_{\phi_1 = 0}^{\phi_2 = 2\pi} Frd\phi = Fr2\pi$$

$${}_1W_2 = W_{\text{eje}} = 2\pi Fr = 2\pi T \text{ (Joule/1 rev)}$$

En donde:  $T = Fr$  (par mecánico)

$$T(\text{Tau}) = F \cdot r \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$\dot{W}_{\text{eje}} = W_{\text{eje}} N = 2\pi NT \text{ (Watts)}$$

N: número de revoluciones por segundo

$$\left( \frac{\text{Joule}}{\text{rev}} \right) \left( \frac{\text{rev}}{\text{seg.}} \right) = \text{(Watts)}$$

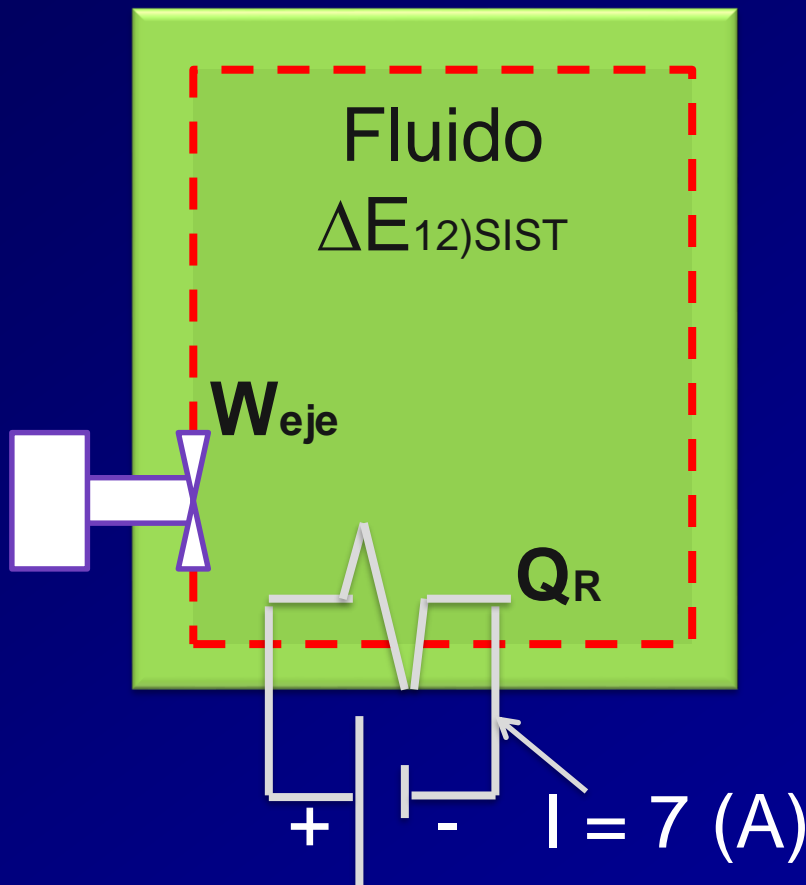
## EJERCICIO: 2.3.4

2.18 WARK

Una sustancia recibe energía en forma de trabajo de una rueda de paletas cuyo eje aplica un par de 4 (N·m) durante 300 revoluciones.

Simultáneamente, se le suministra calor con una resistencia eléctrica por la cual circula una corriente eléctrica de 7 (A) desde una fuente de fuerza electromotriz de 120 (V). Si la energía total suministrada es de 22 (kJ), calcule el tiempo que debe de estar funcionando esta resistencia.

# RESOLUCIÓN:



$$\tau = 4 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$$t = ? \text{ (s)}$$

$$N = 300 \text{ (rev)}$$

$${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E_{12)SIST} \dots (1)$$

$$\Delta E_{12)SIST} = 22 \text{ (kJ)}$$

$$W_{\text{eje}} = 2\pi N\tau \left[ \frac{\cancel{\text{rev}}}{\cancel{\text{rev}}} (\text{N}\cdot\text{m}/\cancel{\text{rev}}) \right] = (\text{Joule})$$

$$W_{\text{eje}} = (2\pi)(300)(4) = 7,539.8 \text{ (J)}$$

$$Q_R = \varepsilon I t \left[ (\text{V})(\text{A})(\text{s}) \right] = \left[ \frac{\cancel{\text{J}}}{\cancel{\text{C}}} \left( \frac{\cancel{\text{C}}}{\cancel{\text{s}}} \right) (\cancel{\text{s}}) \right] = (\text{Joule})$$

$$Q_R = (120)(7)(t) = 840(t)$$

Sustituyendo en la Ec. (1) los resultados anteriores

$$840t + 7,539.8 = 22,000$$

Despejando t:

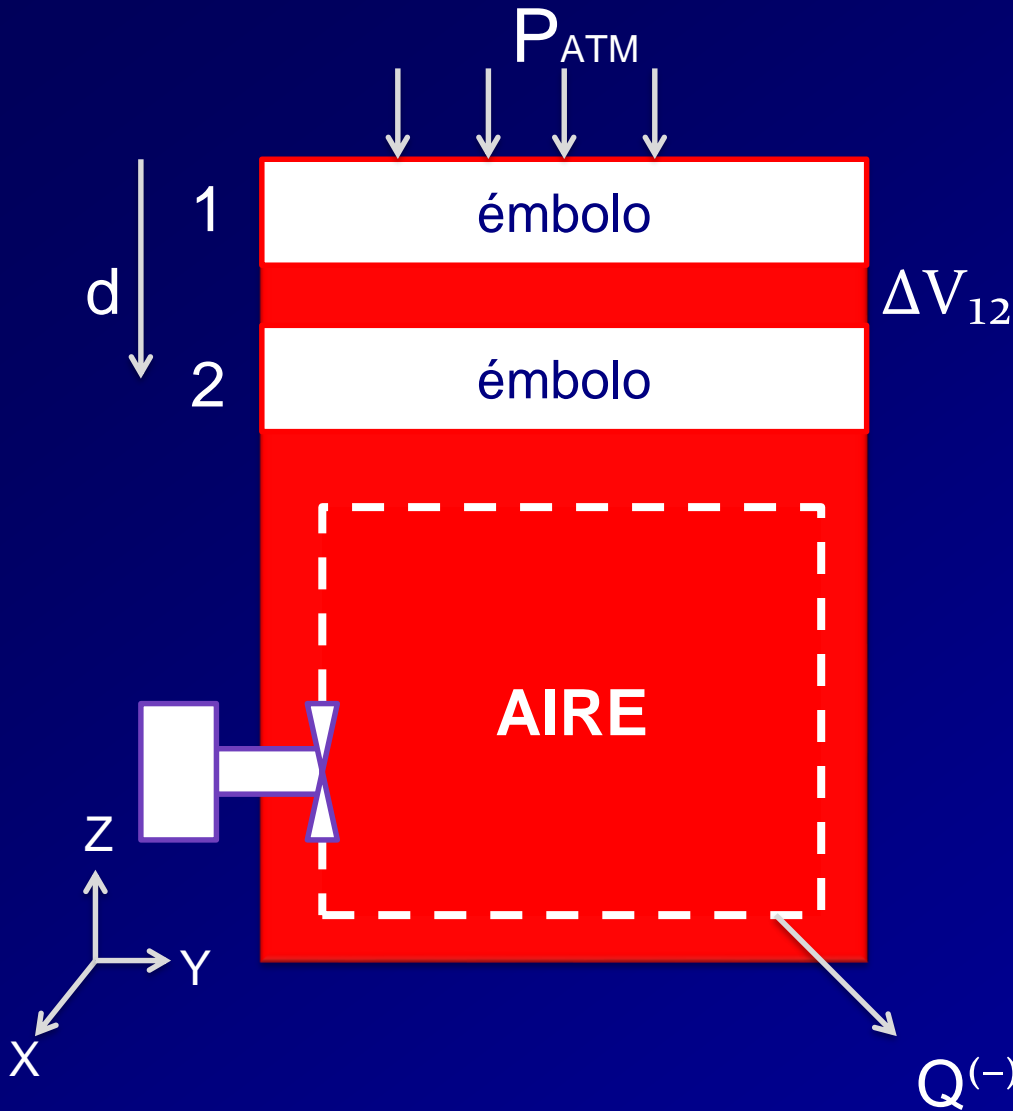
$$t = \frac{22,000 - 7,539.8}{840} = 17.2145 \text{ (s)}$$

## EJERCICIO: 2.3.5

### 2.63 WARK

Un dispositivo cilindro-émbolo vertical contiene aire que está comprimido por un émbolo sin fricción de 3,000 (N) de peso. Durante un intervalo de tiempo, una rueda de paletas situada dentro del cilindro realiza un trabajo sobre el gas de 6,800 (N·m). Si el calor cedido por el gas es de 8.7 (kJ) y la variación de energía interna del gas es -1.0 (kJ), determine la distancia recorrida por el émbolo en metros. El área del émbolo es 50 (cm<sup>2</sup>) y la presión atmosférica que actúa en el exterior del émbolo es 0.95 (bar).

# RESOLUCIÓN:



$$\text{Peso}_{\text{émb}} = 3,000 \text{ (N)}$$

$$W_{\text{eje}} = 6,800 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$$Q^{(-)} = -8.7 \text{ (kJ)}$$

$$\Delta U_{12} = -1 \text{ (kJ)}$$

$$A_{\text{émb}} = 50 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$P_{ATM} = 0.95 \text{ (bar)}$$



$$d = ? \text{ (m);}$$

De la Ec. del  ${}_1W_2$ ; con  $P = \text{ctte}$

$$\begin{aligned} {}_1W_2 &= - \int_1^2 PdV = -P(V_2 - V_1) \\ &= - \left[ P_{\text{ATM}} + \frac{\text{Peso}_{\text{émb}}}{A_{\text{émb}}} \right] (d)(A_{\text{émb}}) \end{aligned}$$

Despejando «d»:

$$d = \frac{{}_1W_2}{- \left[ P_{\text{ATM}} + \frac{\text{Peso}_{\text{émb}}}{A_{\text{émb}}} \right] A_{\text{émb}}}$$

$$d = \frac{{}_1W_{2 \frac{c}{e}}}{- (P_{ATM}A_{\acute{e}mb} + \text{Peso})_{\acute{e}mb}} \dots (1)$$

Aplicando la 1ª Ley de la Termodinámica al sistema cerrado:

$${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E_{12)_{\text{sist}}} = \cancel{\Delta EC_{12}^0} + \cancel{\Delta EP_{12}^0} + \Delta U_{12}$$

Analizando las transferencias de energía:

$${}_1Q_2^{(-)}_{\text{amb}} + W_{\text{eje}} + {}_1W_{2 \frac{c}{e}} = \Delta U_{12}$$

Despejando  ${}_1W_{2,c/e}$ :

$${}_1W_{2,c/e} = \Delta U_{12} - {}_1Q_{2,amb}^{(-)} - W_{eje}$$

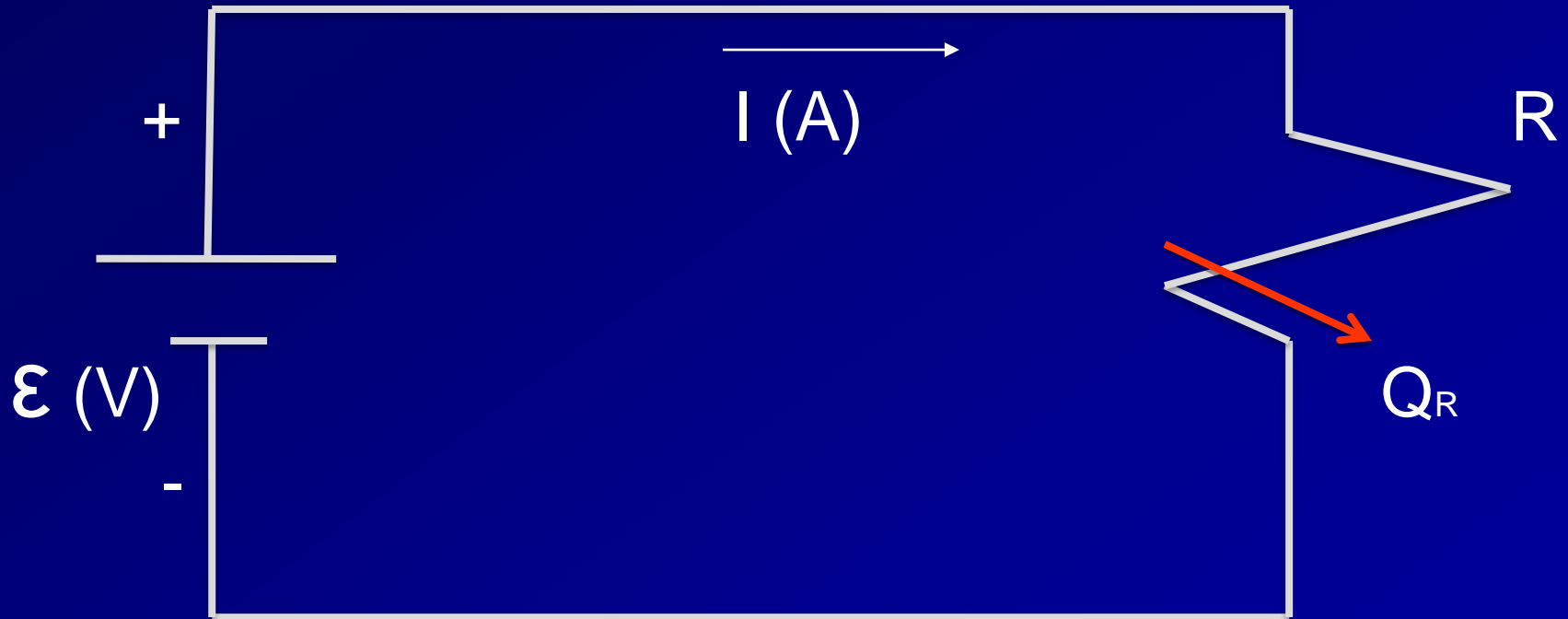
Sustituyendo datos:

$${}_1W_{2,c/e} = -1 - (-8.7) - 6.8 = 0.9 \text{ (kJ)}$$

Sustituyendo este resultado en la Ec. (1)

$$d = \frac{-900}{(95,000)(0.005) + 3,000} = -0.2589 \text{ (m)}$$

# CALOR TRANSFERIDO POR UNA RESISTENCIA ELÉCTRICA ( $Q_R$ )



$$\dot{Q}_R = \mathcal{E}I \left( \frac{\text{Joule}}{\cancel{\text{Coulomb}}} \right) \left( \frac{\cancel{\text{Coulomb}}}{\text{s}} \right) = \left( \frac{\text{Joule}}{\text{seg}} \right) = 1 \text{ watts}$$

$$1 \text{ Volt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Coulomb}} ; 1 \text{ A} = \frac{\text{Coulomb}}{1 \text{ seg}}$$

LEY DE OHM

$$\mathcal{E} = RI$$

LEY DE JOULE

$$\dot{Q}_R = RI^2 = \mathcal{E}I$$

$$\dot{Q}_R t = \frac{\text{Joule}}{\text{seg}} (\text{seg}) = (\text{Joule})$$

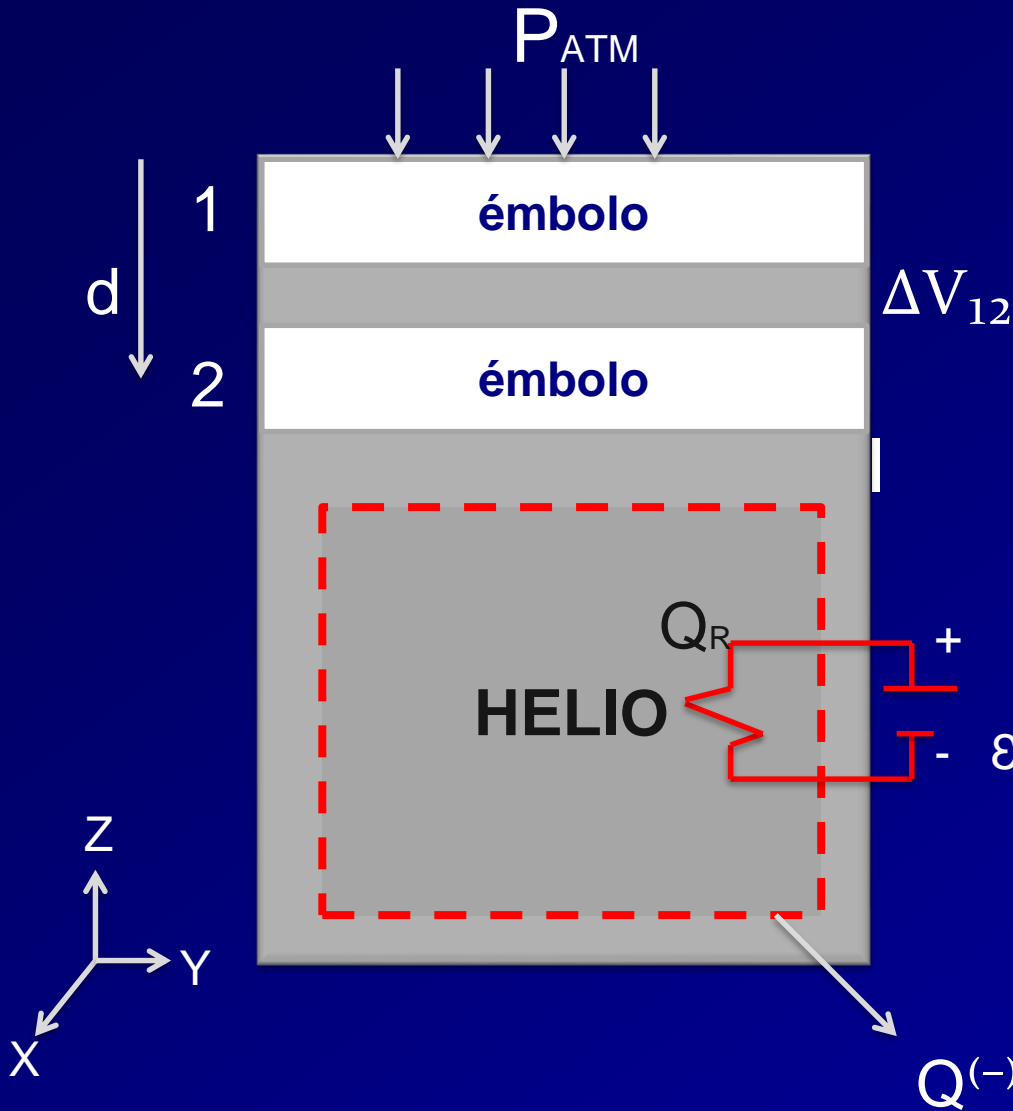
$$Q_R = \dot{Q}_R t = \mathcal{E} I t (\text{Joule})$$

## EJERCICIO: 2.3.6

### 2.64 WARK

Un dispositivo cilindro-émbolo vertical contiene helio confinado por un émbolo sin fricción de 150 (kg) de masa. Durante un intervalo de 3 minutos, una resistencia situada dentro del cilindro recibe una corriente de 8 (A) de una batería ex-terna de 6 (V). Si el calor cedido por el gas es de 5.8 (kJ) y la variación de energía interna del gas es 2.4 (kJ), determine la distancia recorrida por el émbolo en centímetros. El área del émbolo es 30 (cm<sup>2</sup>), la presión atmosférica que actúa en el exterior del émbolo es 960 (mbar), y la gravedad local es 9.6 (m/s<sup>2</sup>).

# RESOLUCIÓN:



$$t = 3 \text{ (min)}$$

$$Q^{(-)} = - 5.8 \text{ (k-J)}$$

$$\Delta U_{12} = 2.4 \text{ (k-J)}$$

$$A_{\acute{e}mb} = 30 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$P_{ATM} = 960 \text{ (mbar)}$$

$$g = 9.6 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$m_{\acute{e}mb} = 150 \text{ (kg)}$$

$$I = 8 \text{ (A)}; \varepsilon = 6 \text{ (V)}$$



$$d = ? \text{ (m);}$$

De la Ec. del  ${}_1W_2$ ; con  $P = \text{ctte}$

$$\begin{aligned} {}_1W_2 &= - \int_1^2 P dV = -P(V_2 - V_1) \\ &= - \left( P_{\text{ATM}} + \frac{\text{Peso}_{\text{émb}}}{A_{\text{émb}}} \right) (d)(A_{\text{émb}}) \end{aligned}$$

Despejando «d»:

$$d = \frac{{}_1W_2}{- \left( P_{\text{ATM}} + \frac{\text{Peso}_{\text{émb}}}{A_{\text{émb}}} \right) A_{\text{émb}}},$$

$$d = \frac{{}_1W_{2 \frac{c}{e}}}{- (P_{ATM}A_{\acute{e}mb} + \text{Peso})_{\acute{e}mb}} \dots (1)$$

Aplicando la 1ª Ley de la Termodinámica al sistema cerrado:

$${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E_{12)_{\text{sist}}} = \cancel{\Delta EC_{12}^0} + \cancel{\Delta EP_{12}^0} + \Delta U_{12}$$

Analizando las transferencias de energía:

$${}_1Q_2^{(-)}_{\text{amb}} + Q_R + {}_1W_{2 \frac{c}{e}} = \Delta U_{12}$$

Despejando  ${}_1W_{2/c/e}$ :

$${}_1W_{2/c/e} = \Delta U_{12} - {}_1Q_{2^{(-)}_{amb}} - {}_1Q_{2R} = \Delta U_{12} - {}_1Q_{2^{(-)}_{amb}} - \epsilon t$$

Sustituyendo datos:

$${}_1W_{2/c/e} = 2.4 - (-5.8) - (6)(8)(3)(60)(10^{-3}) = -0.44 \text{ (k-J)}$$

Sustituyendo este resultado en la Ec. (1)

$$d = \frac{-(-440)}{(96,000)(0.003) + (150)(9.6)}$$

$$d = 0.2546 \text{ (m)} = 25.46 \text{ (cm)}$$

## EJERCICIO: 2.3.8

### Wark 2.68

Un gas a 100 (KPa) y 0.8 (m<sup>3</sup>) (estado 1) se comprime hasta un quinto de su volumen inicial (estado 2) a lo largo de un camino dado por  $PV = \text{constante}$ . Después se añade calor a presión constante hasta que se alcanza el volumen inicial (estado 3). Finalmente, el gas se enfría a volumen constante hasta el estado 1.

- Represente los procesos en un diagrama P-V.
- Calcule el trabajo neto del ciclo en (kJ).
- Calcule el calor neto transferido en el ciclo (kJ).

# RESOLUCIÓN:

$$P_1 = 100 \text{ (kPa)}; V_1 = 0.8 \text{ (m}^3\text{)}$$

1-2

Compresión  $PV = \text{ctte}$   $V_2 = 1/5V_1$

2-3

${}_2Q_3^{(+)}$ ,  $P = \text{ctte}$ ;  $V_3 = V_1 = 0.8 \text{ (m}^3\text{)}$

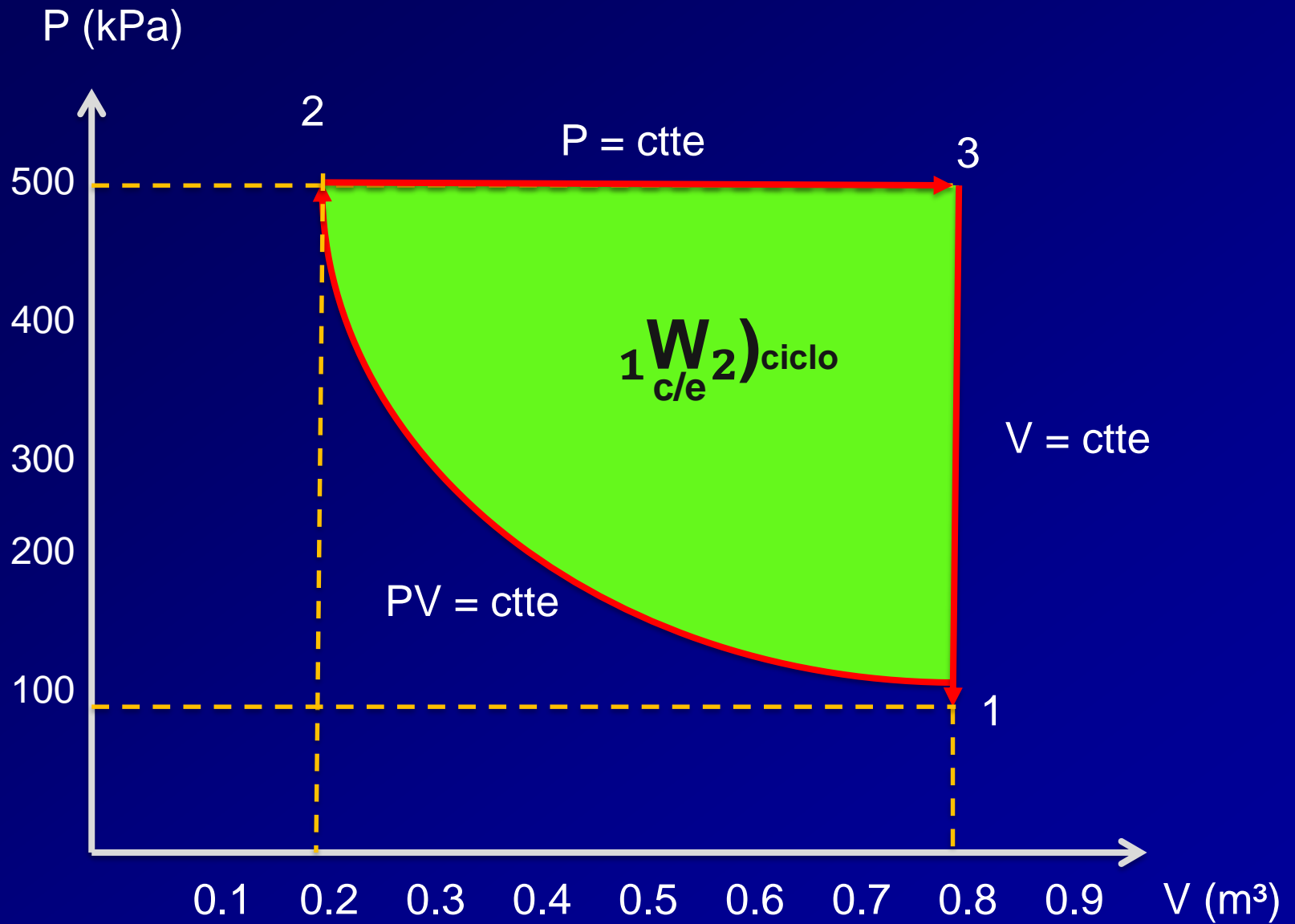
3-1

${}_3Q_1^{(-)}$ ;  $V_1 = V_3 = V = \text{ctte}$

Edo.	1	2	3
P (kPa)	100	500	500
V (m <sup>3</sup> )	0.8	0.16	0.8

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$P_2 = (100)(5) = 500 \text{ (kPa)}$$





$${}_1W_{2/c/e})_{\text{ciclo}} = \sum_{i=1}^3 W_i = {}_1W_{2/c/e} + {}_2W_{3/c/e} + {}_3W_{1/c/e} \dots (1)$$

$${}_1W_{2/c/e} = -P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$${}_1W_{2/c/e} = -(100)(0.8) \ln (1/5) = 128.76 \text{ (kJ)}$$

$${}_2W_{3/c/e} = -P_2 (V_3 - V_2)$$

$${}_2W_{3/c/e} = -(500)(0.8 - 0.16) = -320.0 \text{ (kJ)}$$

$${}_3W_{c/e}^1 = \int_3^1 P dV = 0$$

Sustituyendo en la Ec. (1)

$$\text{b) } {}_1W_{c/e}^2)_{\text{ciclo}} = 128.76 - 320.0 + 0 = -191.24 \text{ (kJ)}$$

c)

$$\oint dQ = - \oint dW = 191.24 \text{ (kJ)}$$

Condiciones de flujo estable:

$$\left. \frac{dm}{dt} \right]_{v.c.} = 0$$

Condiciones de estado estable:

$$\left. \frac{dE}{dt} \right]_{v.c.} = 0$$

# Ecuación de la Continuidad:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2;$$

$$\dot{M} \left[ \begin{array}{c} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (\text{m}^2) \\ \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \end{array} \right] = \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

# ECUACIÓN GENERAL DE LA 1ª LEY DE LA TERMODINÁMICA PARA SISTEMAS ABIERTOS

$$\dot{Q} + \dot{W}_{\text{eje}} = \frac{dE}{dt} \Big|_{\text{v.c.}} + \sum_{s=1}^m \dot{M}_s \left[ \frac{1}{2} \bar{V}^2 + gZ + u + Pv \right]_s -$$

$$\sum_{e=1}^n \dot{M}_e \left[ \frac{1}{2} \bar{V}^2 + gZ + u + Pv \right]_e$$

Si se tiene una entrada y una salida:

$$\dot{Q} + \dot{W}_{\text{eje}} = \dot{M} \left[ \frac{1}{2}(\overline{V^2}_2 - \overline{V^2}_1) + g(Z_2 - Z_1) + (u_2 + P_2v_2) - (u_1 + P_1v_1) \right];$$

$$h = u + Pv \left[ \frac{\underline{J}}{\underline{kg}} \right]; \left[ \frac{\underline{N}}{\underline{m^2}} \right] \left[ \frac{\underline{m^3}}{\underline{kg}} \right] = \left[ \frac{\underline{J}}{\underline{kg}} \right]$$

1ª Ley de la Termodinámica

• Una entrada y una salida

$$\dot{Q} + \dot{W}_{\text{eje}} = \dot{M} \left[ \frac{1}{2}(\overline{V^2}_2 - \overline{V^2}_1) + g(Z_2 - Z_1) + (h_2 - h_1) \right] \text{ (W)}$$

$$\left( \frac{\underline{kg}}{\underline{s}} \frac{\underline{m}}{\underline{s^2}} - \underline{m} \right) = \frac{\underline{N} - \underline{m}}{\underline{s}} = \frac{\underline{J}}{\underline{s}} = \text{(W)}$$

2.6 La energía interna y el calor a volumen constante: la capacidad térmica específica a volumen constante ( $c_v$ ). La entalpía y el calor a presión constante: la capacidad térmica específica a presión constante ( $c_p$ ).

En Ingeniería se diseñan Máquinas Térmicas para transformar energía en forma de calor a trabajo mecánico. De igual manera se diseñan Refrigeradores o Bombas de Calor para transferir calor de una zona de baja temperatura a una zona de alta temperatura. Cualquiera de estos dispositivos emplean como sustancia de trabajo a una sustancia simple compresible, por ello, la re-

levancia del estudio de sus propiedades termodinámicas y la obtención de los correspondientes modelos matemáticos.

La aplicación del Postulado de Estado a una sustancia simple compresible implica que el estado termodinámico del sistema está definido por dos propiedades intensivas independientes, cuando éste se encuentra en equilibrio termodinámico.



A continuación se desarrollan los modelos matemáticos para evaluar la variación de la energía interna y de la entalpía, aplicando el Postulado de Estado a un sistema termodinámico en equilibrio termodinámico, para lo cual, la energía interna se pone en función de dos propiedades intensivas independientes: temperatura y volumen específico; y la entalpía en función de la temperatura y la presión.

La energía interna  $U$  (Joule), como una función de la temperatura y el volumen se expresa con:  $U = U(T, V)$ , para tenerla como una propiedad intensiva, se divide entre la masa:

$$u = \frac{U}{m} = u \left( T, \frac{V}{m} \right) \left( \frac{\text{Joule}}{\text{kg}} \right)$$

$u = u(T, v) \rightarrow$  Energía interna específica:

$$du = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right]_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right]_T dv$$

# CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA A VOLUMAN CONSTANTE

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right]_v$$

$$c_v \left( \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$du = c_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right]_T dv \left. \vphantom{\frac{\partial u}{\partial v}} \right\} \begin{array}{l} 1^a \text{ Relación General} \\ \text{para cambio de ener-} \\ \text{gía interna.} \end{array}$$

Para evaluar la variación de la entalpía se parte de su definición, que a continuación se detalla:

La entalpía  $H$  se define como:

$$H = U + PV \text{ (Joule)}$$

La entalpía específica  $h$  es:

$$h = \frac{H}{m} = \frac{U}{m} + \frac{PV}{m} \text{ (J/kg)}$$

$$h = u + Pv \text{ (Joule/kg).}$$

De acuerdo al Postulado de Estado:

$$h = h(T, P);$$

diferenciando:

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right]_P dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right]_T dP$$

# CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA A PRESIÓN CONSTANTE

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right]_p$$

$$c_p \left( \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$\left. dh = c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right]_T dP \right\} \begin{array}{l} 2^{\text{a}} \text{ Relación General} \\ \text{para cambio de entalpía.} \end{array}$$

La capacidad térmica específica a volumen constante de un gas permite evaluar la variación de la energía interna en un sistema sujeto a un proceso termodinámico, independientemente del proceso que se trate.

La capacidad térmica específica a presión constante de un gas permite evaluar la variación de entalpía en un sistema sujeto a un proceso termodinámico, independientemente del proceso que se trate.

# APLICACIÓN DE LAS 1ª Y 2ª RELACIONES GENERALIZADAS PARA CAMBIOS DE ENERGÍA INTERNA Y ENTALPÍA A SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Para sólidos y líquidos:

$$\rho = \text{ctte}, v = 1/\rho = \text{ctte}$$

por tanto,  
sustituyendo en las 1ª y 2ª relaciones  
generalizadas:



$$\left. \begin{aligned}
 du &= c_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T dv = c_v dT \\
 dh &= c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right|_T dP = c_p dT
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 h &= u + Pv; \\
 \text{diferenciando:} \\
 dh &= du + Pdv + vdP \\
 \text{el proceso es a} \\
 &\text{presión constante}
 \end{aligned}$$

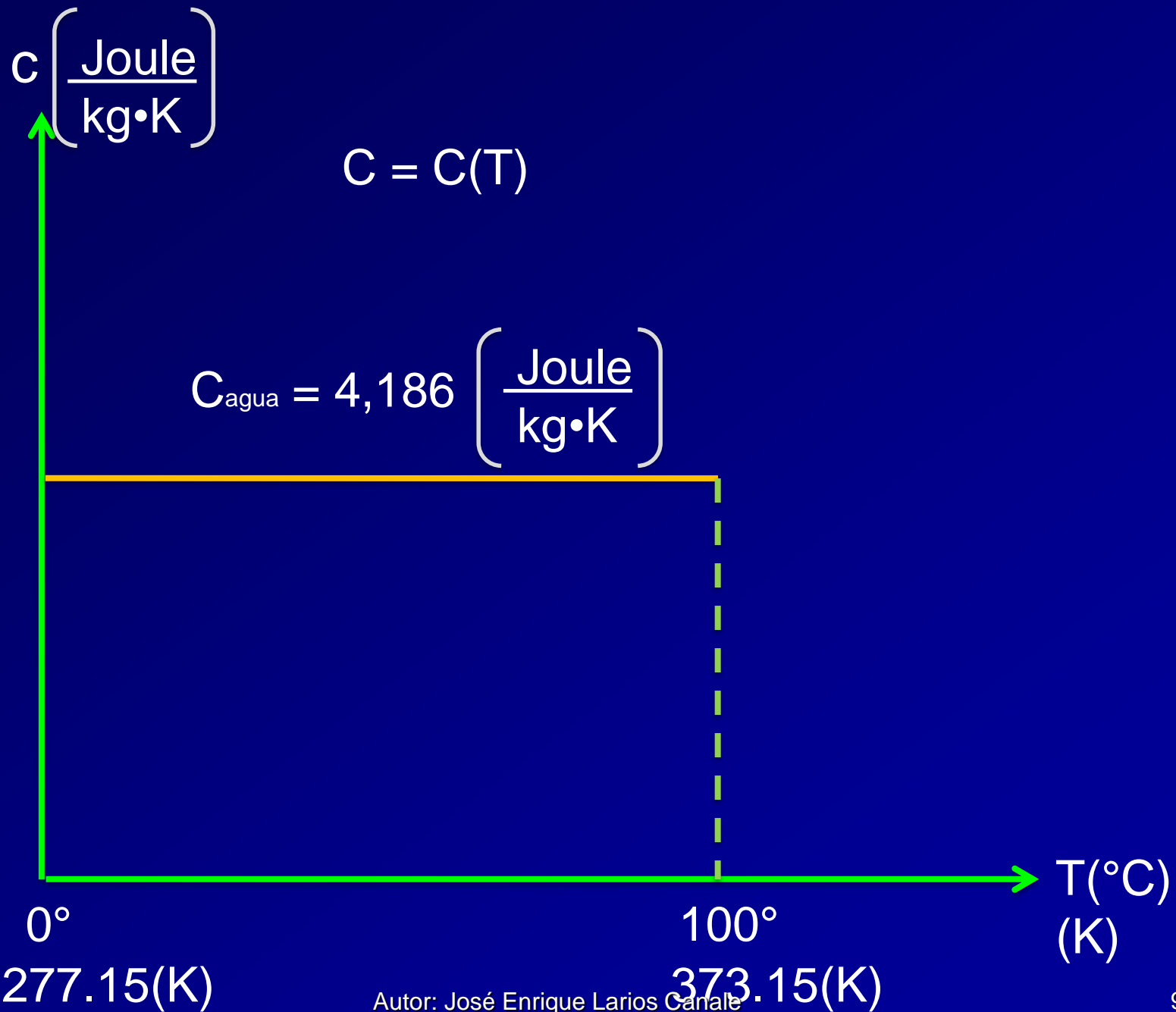
Por lo tanto,

$$du = c_v dT = dh = c_p dT \rightarrow c_v = c_p = c$$

$c$  (capacidad térmica específica), es una función de la temperatura.

# LA CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA

La capacidad térmica específica de un sólido o de un líquido es una propiedad termodinámica que evalúa la cantidad de energía que en forma de calor o de trabajo se requiere transferir a un sólido o a un líquido para que su temperatura varíe en un grado Kelvin por cada unidad de masa en kilogramos.



Sí “c” es constante:

$$du = cdT;$$

integrando:

$$\int_1^2 du = \int_1^2 cdT \quad (\text{J/kg})$$

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$

Sólido y líquido

Si se quiere evaluar la variación de energía interna total “U”, integrando:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 mcdT \dots(1)$$

Para la mayoría de los sólidos y de los líquidos, en rangos de temperatura que se emplean en la industria se puede considerar que la capacidad térmica específica es constante

$$U_2 - U_1 = mc(T_2 - T_1) \text{ (Joule)}$$

# EQUIVALENCIA DE LA ESCALA CELSIUS Y KELVIN EN LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS

$$T_2 = 21 (\text{°C}) = 294 (\text{K})$$

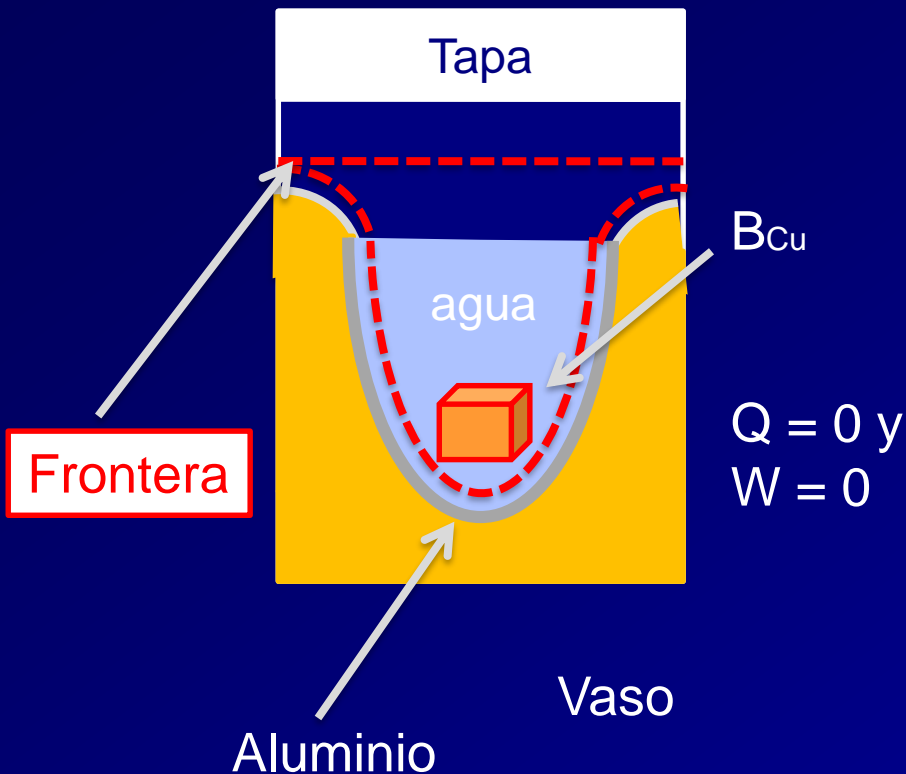
$$-T = -20 (\text{°C}) = -293 (\text{k})$$

---

$$T_2 - T_1 = 1 (\text{°C}) = 1 (\text{K})$$

## EJERCICIO: 2.3.2

¿Cuál es la temperatura de equilibrio cuando un bloque de cobre de 231 (g) a 232 ( $^{\circ}\text{C}$ ) se coloca en un calorímetro de aluminio de 201 (g) que contiene 758 (g) de agua a 15 ( $^{\circ}\text{C}$ )? Considere constantes las capacidades térmicas específicas de los tres materiales, cuyos valores se indican a continuación:



$$C_{Cu} = 389 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$$

$$C_{H_2O} = 4,186 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$$

$$C_{Al} = 897 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$$

$$T_{eq} = ? = T_2$$

$$m_{Cu} = 231 \text{ (g);}$$

$$T_{1)Cu} = 232.0 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$m_{Al} = 201 \text{ (g)}$$

$$m_{H_2O} = 758 \text{ (g);}$$

$$T_{1)H_2O} = T_{1)Al} = 15 \text{ (}^\circ\text{C)}$$



# Sistema Termodinámico Aislado

$${}_1Q_2 = 0; \quad {}_1W_2 = 0; \quad \Delta E_{\text{SIST})12} = 0$$

$$\Delta E_{\text{SIST})12} = \cancel{\Delta E C_{12}^0} + \cancel{\Delta E P_{12}^0} + \Delta U_{12)\text{SIST}}$$

$$\Delta U_{12)\text{SIST}} = 0 = \Delta U_{12)\text{H}_2\text{O}} + \Delta U_{12)\text{Cu}} + \Delta U_{12)\text{Al}}$$

$$mc(T_2 - T_1)_{\text{H}_2\text{O}} + mc(T_2 - T_1)_{\text{Cu}} + mc(T_2 - T_1)_{\text{Al}} = 0$$

Despejando la  $T_2$  de la ecuación anterior:

$$T_2 = \frac{mcT_1)_{H_2O} + mcT_1)_{Cu} + mcT_1)_{Al}}{mc)_{H_2O} + mc)_{Cu} + mc)_{Al}}$$

Sustituyendo datos:

$$T_2 = \frac{(0.758)(4,186)(15) + (0.231)(389)(232) + (0.201)(897)(15)}{(0.758)(4,186) + (0.231)(389) + (0.201)(897)}$$

$$T_2 = 20.66 \text{ (}^\circ\text{C)}$$