



## CAPITULO II

### ESTUDIO Y APLICACIONES DE LA TERMODINÁMICA

#### 1. El 1º P.T. Aplicado a los sistemas cerrados

- 1) Enunciado: El calor puede ser transformado en trabajo y el trabajo en calor, existiendo una relación constante entre la energía consumida y la que es obtenida.

$$\frac{Q}{L} = \frac{L}{Q}$$

- 2) El 1º P.T. Aplicados a sistemas cerrados que recorren un ciclo (realiza una transformación cerrada)

$$Q \propto L$$

$$Q = AL \quad \therefore A = \frac{1}{427} \cong 0.00236 \left( \frac{\text{Kcal.}}{\text{Kgfm.}} \right)$$

$$Q - AL = 0$$

Explicitando el signo de L podemos también tener la expresión

$$Q + AL = 0$$

Conversión de Senales:

Q(+) → Calor recibido por el Sistema.

Q(-) → Calor cedido por el Sistema.

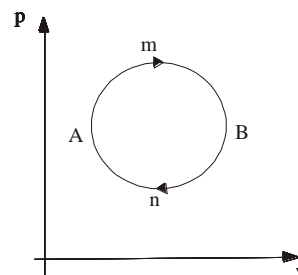
L(+) → Trabajo ejecutado por el Sistema.

L(-) → Trabajo ejecutado sobre el Sistema.

- 3) El 1º P.T. Aplicado a sistemas cerrados que realizan una transformación abierta

Consideremos un ciclo AmBnA compuesta de las transformaciones abiertas AmB y BnA.

Para el ciclo:  $Q - AL = 0$



$$\oint d(Q - AL) = 0$$

$$\oint du = 0$$

$$\oint du = \int_{mA}^A du + \int_{nB}^B du = 0$$

$$\int_{mA}^B du = - \int_{nB}^A du = \int_{nA}^B du$$

$$Q - AL = 0$$

Matemáticamente nos referimos a una diferencial exacta, siendo la función denominada función de estado o función de puntos. Caracterizado por no depender del camino recorrido.

A esta función  $dU = d(Q - AL)$  se la denomina “energía interna”.



## TERMODINÁMICA

### CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

La unidad de la energía interna son las mismas unidades de la energía en forma de calor (Kcal) o (Kcal/Kg)

$$U = (\text{Kcal})$$

$$u = (\text{Kcal/Kg})$$

El 1° P.T. tendrá como expresión:

$$d(Q-AL) = dU$$

$$dQ = dU + AdL \text{ (Kcal)}$$

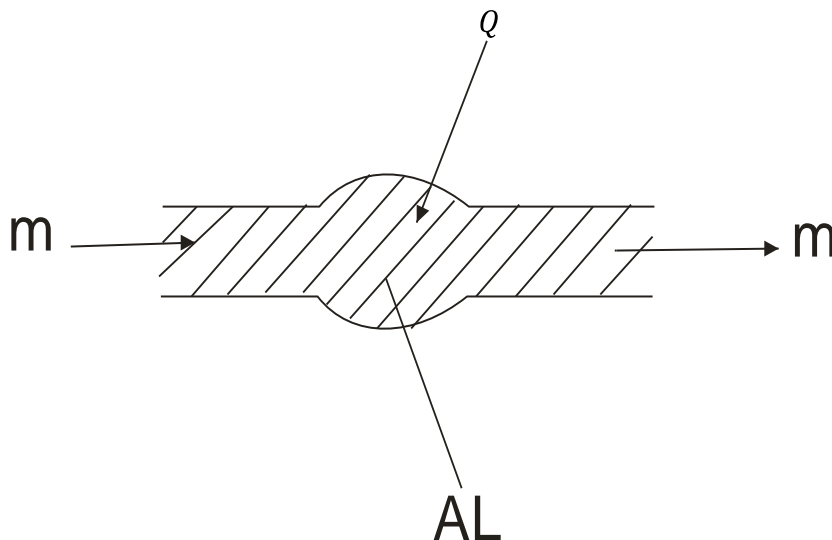
$$dq = du + Adl \text{ (Kcal/Kg)}$$

$$Q = U_2 - U_1 + AL \text{ (Kcal)}$$

Calor y trabajo son recibido y cedido respectivamente.

#### 2. El 2° P.T. aplicado a sistemas abiertos con movimiento permanente

La característica del sistema abierto es la renovación de masa



Gasto: es la masa que circula por el sistema en la unidad de tiempo.

El movimiento será permanente cuando el gasto sea constante, en este caso tenemos: Energía que llega al sistema = Energía que sale del sistema.

Energía que llega:

a) Q calor  $\rightarrow Q(\text{Kcal})$

b) Trabajo de flujo  $\rightarrow mp_1 v_1 \times A(\text{Kcal})$

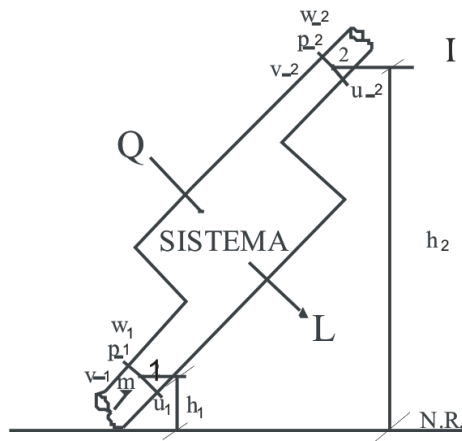
c) Energía cinética  $\rightarrow \frac{1}{2} \frac{m}{g_c} w_1^2 \times A \text{ (Kcal)}$

d) Energía Potencial  $\rightarrow \frac{mgh_1}{g_c} \times A \text{ (Kcal)}$

e) Energía Interna  $\rightarrow mu_1 \text{ (Kcal)}$

Sumando:

$$\text{Energía que llega: } Q + Amp_1 v_1 + \frac{A}{2g_c} mw^2 + \frac{A}{g_c} mgh_1 + mu_1 \text{ (Kcal)}$$



Energía que sale:

- a) Trabajo  $\rightarrow AL$  (Kcal)
- b) Trabajo de flujo  $\rightarrow Amp_2v_2$  (Kcal)
- c) Energía cinética  $\rightarrow \frac{A}{2g_c}mw_2^2$  (Kcal)
- d) Energía Potencial  $\rightarrow A\frac{mgh_2}{g_c}$  (Kcal)
- e) Energía Interna  $\rightarrow mu_2$  (Kcal)

Sumando:

$$\text{Energía que sale: } AL + Amp_2v_2 + \frac{A}{2g_c}mw_2^2 + A\frac{mgh_2}{g_c} + mu_2 \quad (\text{Kcal})$$

Energía que llega = Energía que sale

$$Q + Amp_1v_1 + \frac{A}{2g_c}mw_1^2 + \frac{A}{g_c}mgh_1 + mu_1 = AL + Amp_2v_2 + \frac{A}{2g_c}mw_2^2 + A\frac{mgh_2}{g_c} + mu_2$$

Que viene a ser la fórmula general del 1° P.T. aplicado a un sistema abierto con movimiento permanente.

También puede ser escrita en forma “específica”:

$$q + Ap_1v_1 + \frac{A}{2g_c}w_1^2 + \frac{A}{g_c}gh_1 + u_1 = Al + Ap_2v_2 + \frac{A}{2g_c}w_2^2 + A\frac{mgh_2}{g_c} + u_2$$

### 3. Entalpía

Para un caso particular:

$w_1 \cong w_2$	$\therefore \Delta E_c \cong 0$	–	Variación de la Energía Cinética
$h_1 \cong h_2$	$\therefore \Delta E_p \cong 0$	–	Variación de la Energía Potencial



## TERMODINÁMICA

### CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

La expresión general del 1° P.T. aplicado a un sistema cerrado con movimiento permanente queda de la siguiente manera:

$$q + u_1 + Ap_1v_1 = Al + u_2 + Ap_2v_2$$

Si denominamos de:  $i = u + Apv$ .

Tenemos la entalpía  $i$  (Kcal/Kg)

donde:  $U \rightarrow$  energía interna

$Apv \rightarrow$  trabajo de flujo

$$I = U + A_p V \quad (Kcal)$$

$$i = u + Apv \left( \frac{Kcal.}{Kg.} \right)$$

$$q + i_1 = Al + i_2$$

o

$$dq = di + Adl \left( \frac{Kcal.}{Kg.} \right)$$

$$dQ = dI + AdL \quad (Kcal)$$

Concluimos que la entalpía ( $i$ ) es una función de estado, independiente por tanto de cualquier otra condición, es decir, se define para un sistema abierto o cerrado.

#### 4. Aplicaciones

Circulación de fluidos incompresibles

La expresión del 1° P.T. Aplicado a un sistema con movimiento permanente queda de la siguiente manera.

$$Ap_1v_1 + \frac{A}{2g_c} w_1^2 + \frac{A}{g_c} gh_1 = Ap_2v_2 + \frac{A}{2g_c} w_2^2 + A \frac{mgh_2}{g_c}$$

Genéricamente

$$p_1v_1 + \frac{w^2}{2g_c} + \frac{gh}{g_c} = 0 \left( \frac{Kgfm}{Kg.} \right)$$

Usando un sistema coherente de unidades podemos escribir:

$$pv + \frac{w^2}{2g_c} + \frac{gh}{g_c} \left( \frac{J}{Kg.} \right) \text{ o } \left( \frac{Kgfm}{UTM} \right)$$

Tenemos que:  $v = \frac{1}{\rho} \quad \rho \cdot g = \gamma$

$$\frac{P}{\rho} + \frac{w^2}{2} + gh = cte$$



# TERMODINÁMICA

## CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} + h = cte$$

$$\left[ \frac{P}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} + h = cte \quad (m) \right] \text{Ecuación de Bernouille}$$

Propiedades de la función “i”

1. Para una transformación reversible, sistema cerrado con presión Cte.

$$1er \text{ P.T.} \rightarrow dq = du + Adl = du + Apdv$$

$$P = cte.$$

$$q = u_2 - u_1 + Apv_2 - Apv_1$$

$$q = (u_2 + Apv_2) - (u_1 + Apv_1)$$

$$\left[ q = i_2 - i_1 \right] \quad \left[ dq = di \right]$$

Es decir, cualquier transformación a presión constante de un sistema cerrado, el calor permutado es igual a la variación de la “entalpía”.

2. Transformación adiabática de un sistema abierto donde  $\Delta e_c \cong 0$  y  $\Delta e_p \cong 0$  (variación de energía cinética y potencial)

Para una transformación adiabática  $dq = 0$

$$dq = di + Adl \rightarrow \text{Sistema abierto con movimiento permanente} \quad \Delta e_c = 0 \text{ y } \Delta e_p = 0$$

$$dq = 0$$

$$Adl = -di$$

$$\left[ Al = i_1 - i_2 \quad \left( \frac{kcal.}{Kg.} \right) \right]$$

En una transformación adiabática, sistema abierto, el trabajo que el sistema ejecuta será a través de la “entalpía”.

5. Gases Perfectos

- a) La condición será para aquel gas que sigue rígidamente las leyes de:

1. Ley de “Charles Gay – Lussac”
2. Ley de “Boyle – Mariotte” (Ecuac. Estado)
3. Ley de “Joule” – energía f(°t)

Obs.: Un gas perfecto es un gas ideal.

- b) Gases Reales

El concepto viene de la observación directa de los gases en la realidad, y tienen un comportamiento adverso al de los gases perfectos.

Obs.: Los gases reales nos suministran aproximaciones razonables.

6. Leyes fundamentales

- a) Ley de “Boyle – Mariotte”

Para una transformación a  $t = Cte$ .

Enunciado: A temperatura constante la masa específica de un gas perfecto es proporcional a presión absoluta.

$$\rho \propto p \quad \rho = Kg / m^3 \quad (\text{masa esférica})$$

$$p = kgf / m^2$$

$$p = cte \times \rho$$

$$p = cte \times \frac{1}{v} \rightarrow \left[ pv = cte \right]$$



## TERMODINÁMICA

### CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

$$p_1 v_2 = p_2 v_1$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

#### b) 1° Ley de “Charles Gay - Lussac”

Para transformación a  $p = \text{Cte.}$

Se verifica que los aumentos de volúmenes son proporcionales a los aumentos de temperatura.

$$\text{Estado inicial} \left\{ \begin{array}{l} t_0 = 0^\circ\text{C} \\ v_0 \end{array} \right\} \quad p = \text{cte.} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 \\ t_2 \end{array} \right\} \text{Estado final}$$

$$\left[ \frac{v_1 - v_2}{v_0} \alpha (t_1 - t_0) \right]$$

$$\frac{v_1 - v_2}{v_0} = \alpha (t_1 - t_0) \quad \alpha = \text{coef. del gas a } p = \text{cte}$$

$$\frac{v_1 - v_2}{v_0} = \alpha t_1$$

$$\left[ \alpha = \frac{v_1 - v_2}{v_0 t_1} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{273.16^\circ \text{K}} = \frac{1}{T_0}$$

$$\left[ \alpha = 0.003661 \right] (^\circ\text{C}^{-1}) \text{ o } (^\circ\text{K}^{-1})$$

$$v_1 = \alpha v_0 t_1 + v_0 \quad (1 + \alpha t_1)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v_0 (1 + \alpha t_1)}{v_0 (1 + \alpha t_2)} \rightarrow \frac{\alpha \left( \frac{1}{\alpha} + t_1 \right)}{\alpha \left( \frac{1}{\alpha} + t_2 \right)} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\left[ \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2} \right]$$

A presión constante los volúmenes de las masas gaseosas están entre sí, así como sus temperaturas absolutas

#### c) 2° Ley de “Charles – Gay Lussac”

Se verifica que los aumentos de presiones absolutas son proporcionales a las variaciones de temperaturas.

$$\text{Estado inicial} \left\{ \begin{array}{l} p_0 = 0 \\ t_0 = 0^\circ\text{C} \end{array} \right\} \quad V = \text{cte.} \quad \left\{ \begin{array}{l} p_1 \\ p_2 \end{array} \right\} \text{Estado final}$$



# TERMODINÁMICA

## CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

$$\frac{P_1 - P_0}{P_0} \propto (t_1 - t_2) \quad \beta = \text{coef. De tensión del gas a } v=\text{cte}$$

$$\frac{P_1 - P_0}{P_0} = \beta(t_1 - t_2) \quad \beta = \alpha = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273.16 \text{ } ^\circ K}$$

$$\frac{P_1 - P_0}{P_0} = \beta t_1 \quad \beta = 0.03661 \text{ (} ^\circ C^{-1} \text{) o (} ^\circ K^{-1} \text{)}$$

$$\beta = \frac{P_1 - P_0}{P_0 t_1}$$

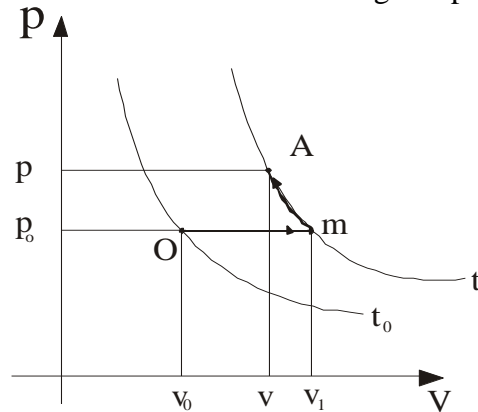
$$P_1 = \beta P_0 t_1 + P_0 \quad \therefore P_1 = P_0 (1 + \beta t_1)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_0(1 + \beta t_1)}{P_0(1 + \beta t_2)} = \frac{\beta(1 + t_1)}{\beta(1 + t_2)} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

En las transformaciones a volumen constantes, las presiones absolutas de una masa gaseosa están entre sí, así como sus temperaturas absolutas.

d) Ecuaciones de estado de los gases perfectos



La “ecuación de estado” es una expresión matemática universal que expreso la condición instantánea de relación entre los parámetros de un gas perfecto.

$$O \begin{cases} P_0 \\ V_0 \\ t_0 \end{cases} \quad m \begin{cases} P_0 \\ V_1 \\ t \end{cases} \quad A \begin{cases} P \\ V \\ t \end{cases} \quad \begin{aligned} p_0 = p_n = 1.033 \frac{Kgf}{cm^2} = 1 atm \\ t_0 = 273.16 \text{ } ^\circ K \end{aligned}$$

OA=> Podemos tener infinitas transformaciones virtuales entre los puntos O y A; escogemos para estudio las transformaciones Om + mA.

Om → Transformación a presión Cte.

mA → Transformación a temperatura Cte.

Om → con auxilio de la Ley de Charles Gay Lussac.

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{t}{t_0} \rightarrow v_1 = \frac{V_0 t}{t_0}$$



# TERMODINÁMICA

## CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

mA → Con auxilio de la Ley de Boyle – Mariotte

$$\frac{P}{P_0} = \frac{v_1}{v_0} \rightarrow P_0 v_1 = P v$$

$$\left[ \frac{P}{P_0} = \frac{v_0 t}{v t_0} \right]$$

$$\left[ \frac{P v}{t} = \frac{P_0 v_0}{t_0} \right]$$

$$\frac{P_0 v_0}{t_0} \times t = P v$$

A la constante valida para cada gas se la denomina “Constante Termodinámica de los gases perfectos” o “Constante individual del gas” y se representa por la letra.

$$\left[ R = \frac{P_0 v_0}{t_0} \left( \frac{Kgfm}{Kg.^{\circ}K} \right) \right]$$

Genericamente

$$p v = R t$$

$$P V = m R T$$

e) Ley de Joule

La energía interna “u” de un gas perfecto es función exclusiva de la temperatura.

Hipótesis

L → no hay resistencia al dislocamiento.

Q → Información del calorímetro.

$$Q = u_2 - u_1 + A L$$

v = varia (aumenta)

$$u_2 = u_1$$

p = varia (disminuye)

t = cte

La energía interna es función de estado y el estado es definido por tres parámetros p, v y t.

Si – “μ” indepe de v

– “μ” indepe de p

Concluimos que “U” es función exclusiva de la temperatura

$$\frac{\delta u}{\delta v} = 0 \quad \frac{\delta u}{\delta p} = 0$$

$$\left[ \frac{\delta u}{\delta t} = \frac{du}{dt} \right]$$

f) Calores específicos

Suponiendo: m=1Kg.

Sistema cerrado Q=0

existe permuta calor interna

$$1er P.T. \quad Q = U_2 - U_1 + A L \quad (Kcal)$$

$$q = u_2 - u_1 + A l \quad \left( \frac{Kcal.}{Kg.} \right)$$

1. Para v=cte

q<sub>v</sub>=calor a volumen cosntante





# TERMODINÁMICA

## CAPITULO II – Estudio y Aplicaciones de la Termodinámica

$$\Delta l = 0 \quad \therefore q_v = u_2 - u_1$$

Para calorimetría

$$q_v = C_{vm}(t_2 - t_1)$$

$$q_v = C_{vm}(T_2 - T_1)$$

$dq = C_v dt$  | Donde la expresión del calor específico verdadero de un gas a volumen constante

$$C_v = \left( \frac{\delta q}{\delta T} \right)_{v=cte}$$

En caso de que “v” varíe, como  $\frac{\delta v}{\delta t} = 0$  podemos escribir  $dv = C_v dt$  para cualquier transformación.

2. Para P=cte

Haciendo el mismo desenvolvimiento para una transformación a P=cte y por calorimetría, resulta:

$$dq_p = C_p dt$$

$$C_p = \left( \frac{\delta q}{\delta t} \right)_{p=cte}$$

g) Entalpía de un gas perfecto

P=cte

$$q_p = i_2 - i_1 = \Delta i$$

Por calorimetría:

$$q_p = C_{pm}(T_2 - T_1)$$

$$i_2 - i_1 = C_{pm}(T_2 - T_1)$$

$$di = C_p dt$$

$$i = u + Ap_v = u + ART \quad \therefore i=f(t)$$

Mismo que “p” varía:

$$di = C_p dt$$

Se verifica que:  $C_p > C_v$

$C_p \rightarrow$  Se usa para aumentar la energía interna y para suministrar trabajo mecánico.

$C_v \rightarrow$  Se usa para aumentar la energía interna.

## 7. Fórmula de MAYER

m=1Kg de gas perfecto  $\rightarrow$  Transformación reversible

$$dq = du + Apdv = C_v dT + Apdv$$

$$pv = RT$$

$$pdv = RdT$$

$$dq = C_v dT + ARdT$$

$$C_p dT = C_v dT + ARdT$$



$$C_p - C_v = AR \quad \text{Fórmula de Mayer}$$

### 8. Ejercicios

- a. Un sistema cerrado efectúa tres transformaciones, en la primera cede 10 Kcal y recibe un trabajo equivalente a 13 Kcal. En la segunda aumenta su energía interna de 7 Kcal y recibe una cantidad de calor de 17 Kcal del medio exterior. En la tercera disminuye su energía interna de 10 Kcal:
  - i. La variación de la energía interna en la primera transformación
  - ii. El trabajo en la segunda transformación
  - iii. El calor permutado en la tercera transformación
  - iv. La energía de estas tres transformaciones; es decir, el intercambio total de calor
  - v. Pudo haber sido recorrido un ciclo, por qué?
- b. Se calienta 2 Kg de aire que está con  $P_1=2 \text{ Kg/cm}^2$  y  $t_1=20^\circ\text{C}$  en un proceso a presión constante de tal modo que el gas recibe  $Q_p=120 \text{ Kcal}$ . Considerando  $C_p=0,241 \text{ Kcal/Kg.}^\circ\text{K}$  y  $C_v=0,172 \text{ Kcal/Kg.}^\circ\text{K}$ . Determinar:
  - i. El estado inicial y final de la transformación.
  - ii. El intercambio de energía.
- c. Un compresor aspira 160 Kg de aire por hora a presión de  $P_1=1 \text{ Kg/cm}^2$  y  $v_1=0,84 \text{ m}^3/\text{Kg}$  y lo entrega a una presión de  $P_2=9 \text{ Kg/cm}^2$  y  $v_2=0,14 \text{ m}^3/\text{Kg}$ . Las energías internas al inicio y al final de la compresión son respectivamente de  $u_1=2,6 \text{ Kcal/Kg}$  y  $u_2=27,5 \text{ Kcal/Kg}$ . El sistema cede  $q=16 \text{ Kcal/Kg}$  de calor a la refrigeración. Calcular:
  - i. Cuál es el trabajo suministrado si la variación de la energía cinética y potencial prácticamente nulas.
  - ii. Cuál es la cantidad total de calor transferida a la refrigeración.
  - iii. Cuál es la potencia teórica del compresor.
- d. El ciclo de evolución de un gas se compone de las siguientes transformaciones;
  1. Una adiabática en la cual la energía interna disminuye en 8 Kcal.
  2. Una isobárica en la cual se entrega una cantidad de calor de 12 Kcal.
  3. Una isotérmica que completa el ciclo en la cual cede calor de 20 Kcal al medio exterior: Se pide:
    - ii. Representar el ciclo.
    - iii. Calcular los intercambios de energía en cada transformación y en el ciclo completo.
- e. Un compresor tiene que dar por hora 160 Kg de aire a presión de  $6 \text{ Kg/cm}^2$  siendo la presión inicial de  $1 \text{ Kg/cm}^2$  y la temperatura inicial de  $10^\circ\text{C}$ . Calcular la potencia teórica necesaria para la compresión, suponiendo:
  - i. Isoterma
  - ii. Adiabática
  - iii. Calcular para la compresión isotérmica la cantidad de calor generada por hora.