

2DO. PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA: ENTROPÍA

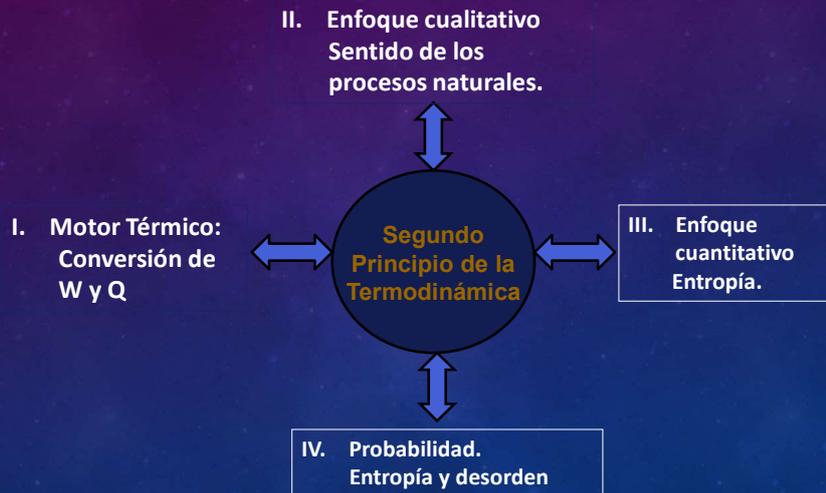
Termodinamica - F Ing - UNCuyo 2021

1/48

ENTROPÍA – BALANCE - PROBABILIDAD

- Introducción
- III. Entropía. Enfoque cuantitativo
 - Teoremas de Poincaré
 - Teorema de Clausius: Procesos Reversibles e Irreversibles
 - Entropía: Formulación matemática
 - Concepto de entropía
 - Diagramas Entrópicos
 - Cálculos para la variación de Entropía
 - Balance de Entropía

DISTINTAS FORMAS DE ABORDAR EL 2DO. PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA



ENTROPIA

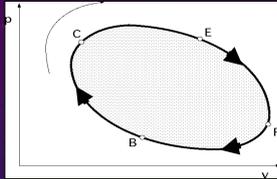
FORMULACION MATEMÁTICA DEL 2do. PRINCIPIO

- Basada en los conceptos vistos relacionados con el Motor ideal de Carnot de máximo rendimiento
- Algunas Propiedades de los Ciclos Reversibles estudiados por Poincaré:
 - 1er. Teorema ciclos parciales
 - 2do Teorema nunca se cortan adiabáticas reversibles
 - 3er Teorema las transformaciones pueden ser reemplazadas por otras.

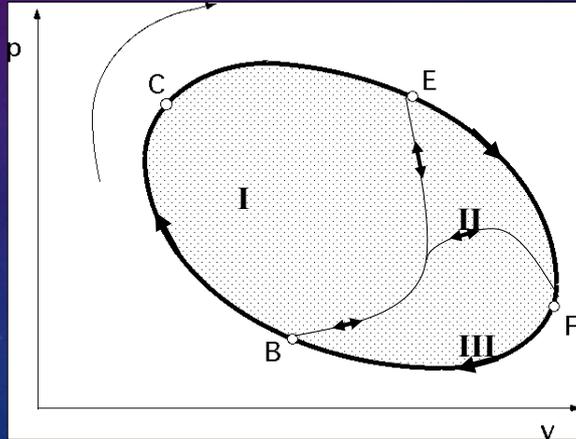
Termodinámica - F Ing - UNCuyo 2021

4/48

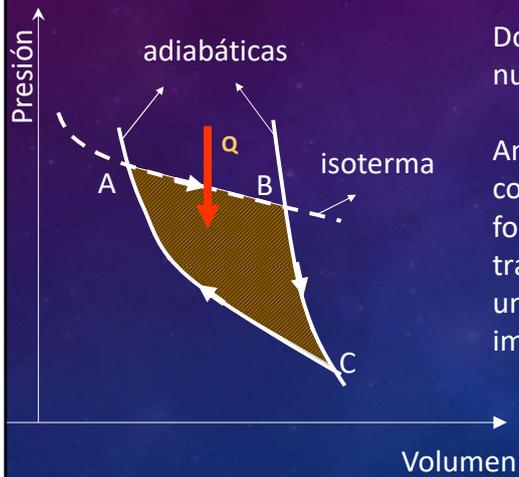
1ER. TEOREMA DE POINCARÉ



Un ciclo reversible se puede descomponer en ciclos parciales mediante transformaciones reversibles que unan puntos de su perímetro



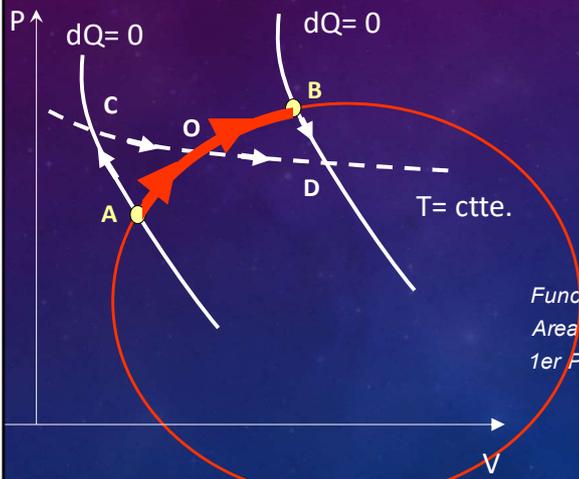
2DO. TEOREMA DE POINCARÉ



Dos transformaciones adiabáticas nunca se pueden cortar.

Ambas adiabáticas podrían ser cortadas por una isoterma, formando el ciclo ABC que produce trabajo por el área sombreada con una única fuente térmica. Es imposible

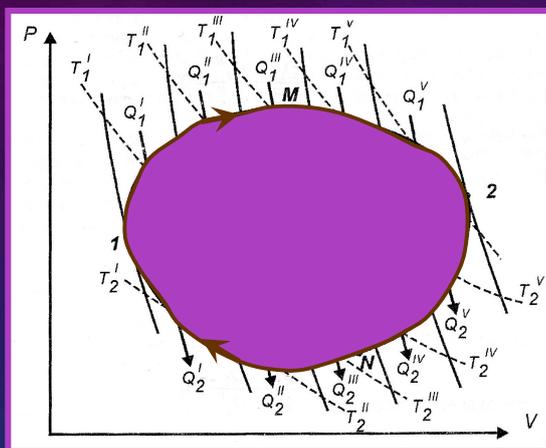
3ER. TEOREMA DE POINCARÉ



Un proceso AB cualquiera puede ser reemplazado por otro proceso ACODB cumpliéndose:

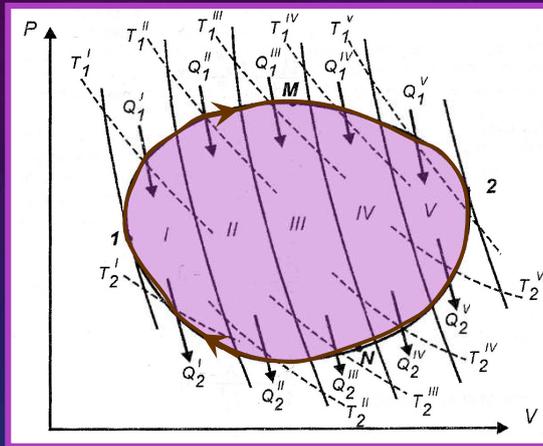
Función de estado $\Delta U_{AB} = \Delta U_{ACODB}$
Áreas iguales $W_{AB} = W_{ACODB}$
1er Ppio $Q_{AB} - W_{AB} = \Delta U_{AB}$
 $\therefore Q_{AB} = Q_{ACODB}$

TEOREMA DE CLAUSIUS



Basándose en el 1er enunciado de Poincaré, Clausius propuso dividir el ciclo reversible 121 en varios subciclos también reversibles.

TEOREMA DE CLAUSIUS



Cada ciclo parcial reversible queda definido por 2 transformaciones adiabáticas y 2 isothermas, formando distintos ciclos de Carnot. Se tiene en cuenta el 3er. Teorema de Poincaré

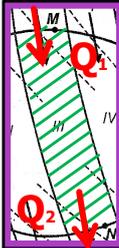
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Termodinámica - F Ing - UNCuyo

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

2021

9/48



TEOREMA DE CLAUSIUS

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \longrightarrow \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad \text{por ser } Q_2 \text{ cedido: } \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Se puede expresar para cada uno de los ciclos en que esta dividido el ciclo completo:

$$\frac{Q'_1}{T'_1} + \frac{Q'_2}{T'_2} = 0 \longrightarrow \frac{Q''_1}{T''_1} + \frac{Q''_2}{T''_2} = 0 \quad \frac{Q'''_1}{T'''_1} + \frac{Q'''_2}{T'''_2} = 0$$

$$\frac{Q^{IV}_1}{T^{IV}_1} + \frac{Q^{IV}_2}{T^{IV}_2} = 0 \longrightarrow \frac{Q^V_1}{T^V_1} + \frac{Q^V_2}{T^V_2} = 0$$

Sumando todas estas igualdades:

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q^i_1}{T^i_1} + \sum_{i=1}^n \frac{Q^i_2}{T^i_2} = 0$$

TEOREMA DE CLAUSIUS

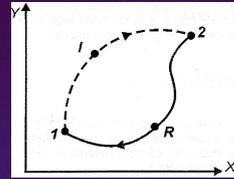
$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_1^i}{T_1^i} + \sum_{i=1}^n \frac{Q_2^i}{T_2^i} = 0$$

Estas sumatorias se pueden expresar en forma de integrales.
Dividimos al ciclo en infinitos ciclos de Carnot:

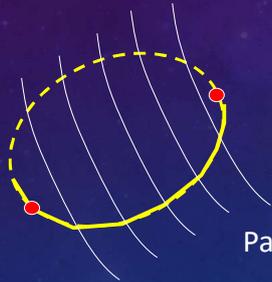
$$\int_{1M2} \frac{dQ}{T} + \int_{2N1} \frac{dQ}{T} = 0 \quad \Rightarrow \quad \oint \frac{dQ}{T} = 0$$

Expresión matemática del Teorema de Clausius para "Ciclos Reversibles"

TEOREMA CLAUSIUS: "CICLOS IRREVERSIBLES"



- Suponemos el mismo ciclo anterior pero en alguna parte aparece una irreversibilidad: ciclo será irreversible



$$\eta_i < \eta_{\text{carnot}}$$

Por Carnot:
$$\eta_{\text{carnot}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Para otro ciclo irreversible:
$$\eta_i = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

T. Clausius: "Ciclos Irreversibles"

$$\frac{Q_1^i - Q_2^i}{Q_1^i} < \frac{T_1^i - T_2^i}{T_1^i}$$

$$1 - \frac{Q_2^i}{Q_1^i} < 1 - \frac{T_2^i}{T_1^i} \quad \longrightarrow \quad \frac{Q_2^i}{T_2^i} > \frac{Q_1^i}{T_1^i}$$

$$\frac{Q_1^i}{T_1^i} - \frac{Q_2^i}{T_2^i} < 0 \quad \xrightarrow{Q_2^i: \text{ calor cedido}} \quad \frac{Q_1^i}{T_1^i} + \frac{Q_2^i}{T_2^i} < 0$$

T.Clausius: "Ciclos Irreversibles"

Se puede expresar para el ciclo irreversible:

$$\frac{Q'_1}{T'_1} + \frac{Q'_2}{T'_2} < 0$$

Al igual que antes, para el resto de los ciclos irreversibles:

$$\frac{Q''_1}{T''_1} + \frac{Q''_2}{T''_2} < 0 \quad \frac{Q'''_1}{T'''_1} + \frac{Q'''_2}{T'''_2} < 0 \quad \frac{Q^{IV}_1}{T^{IV}_1} + \frac{Q^{IV}_2}{T^{IV}_2} < 0 \quad \frac{Q^V_1}{T^V_1} + \frac{Q^V_2}{T^V_2} < 0$$

Sumando todas estas ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q^i_1}{T^i_1} + \sum_{i=1}^n \frac{Q^i_2}{T^i_2} < 0$$

TEOREMA DE CLAUSIUS

Haciendo las mismas consideraciones anteriores:

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0$$

Expresión matemática del Teorema de Clausius para "Ciclos Irreversibles"

El Teorema de Clausius en general será:

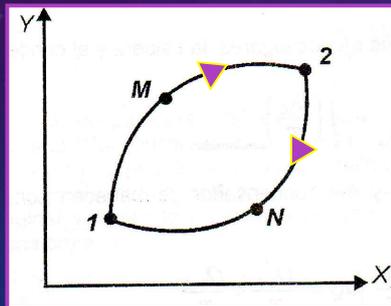
$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

"Ciclos Reversibles e Irreversibles"

ENTROPÍA: DEFINICIÓN MATEMÁTICA

Proceso Reversible

Se consideran 2 estados de equilibrio 1 y 2 de un sistema que se transforma según un ciclo reversible.



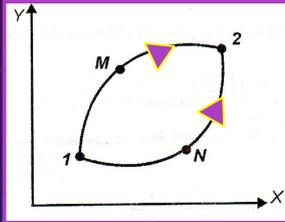
$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{1_M}^2 \frac{dQ}{T} + \int_{2_N}^1 \frac{dQ}{T}$$

ENTROPÍA: DEFINICIÓN MATEMÁTICA

Proceso Reversible

$$\int_{1_M}^2 \frac{dQ}{T} = - \int_2^1 \frac{dQ}{T} \longrightarrow \int_{1_M}^2 \frac{dQ}{T} = \int_{1_N}^2 \frac{dQ}{T}$$



Todos los caminos reversibles posibles entre 1 y 2 darán el mismo valor

$$\int_1^2 \frac{dQ_{\text{Rev}}}{T} = \int_1^2 dS = S_2 - S_1$$

Clausius comprendió en 1865 que había descubierto una nueva propiedad termodinámica y decidió nombrarla entropía

Entropía: **“Formulación matemática del Segundo Principio de la Termodinámica”**.

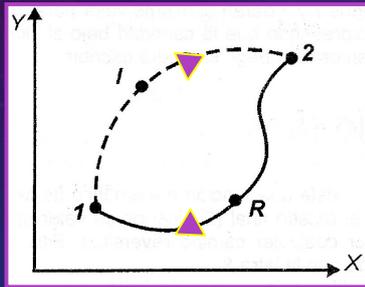
ENTROPÍA: DEFINICIÓN MATEMÁTICA

Proceso Irreversible

Se consideran 2 transformaciones: Reversible e Irreversible.

Según Clausius para este ciclo:

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0$$



$$\text{Irrev} \oint \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dQ}{T} + \int_2^1 \frac{dQ}{T} < 0$$

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} < - \int_2^1 \frac{dQ}{T} \longrightarrow \int_1^2 \frac{dQ}{T} < \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

ENTROPÍA: DEFINICIÓN MATEMÁTICA

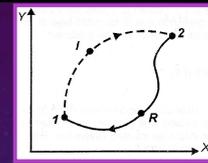
Proceso Irreversible

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} \Big|_{Irrev} < \int_1^2 \frac{dQ}{T} \Big|_{Rev} \Rightarrow \int_1^2 \frac{dQ}{T} \Big|_{Irrev} < \int_1^2 \frac{dQ}{T} = S_2 - S_1$$

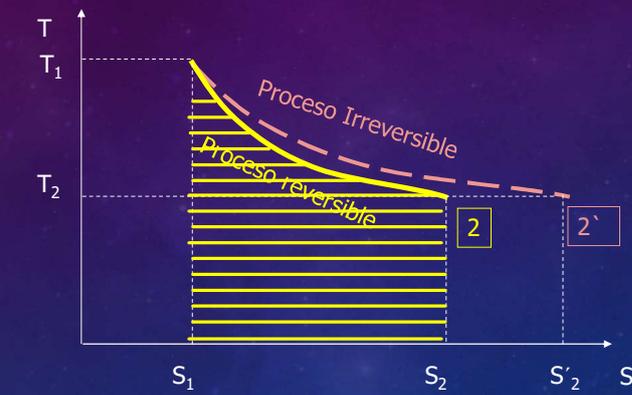
$$\int_1^2 \frac{dQ_{Irrev}}{T} < \int_1^2 dS = S_2 - S_1$$

Transf. Reversibles e Irreversibles:

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} \leq \int_1^2 dS = S_2 - S_1$$



- A partir de un estado de equilibrio 1, el sistema puede evolucionar en forma diferente hasta el estado final 2 o 2`.



Área representa el Q total intercambiado $Q_{rev} = \int T dS$

ENTROPIA

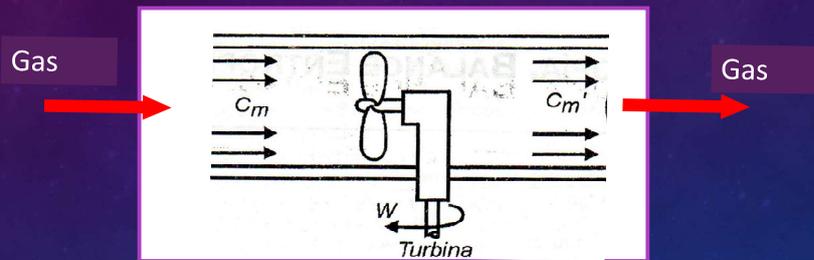
Modelos de carácter conceptual:

ENERGIA: surge por relacionar Calor y Trabajo

ENTROPIA

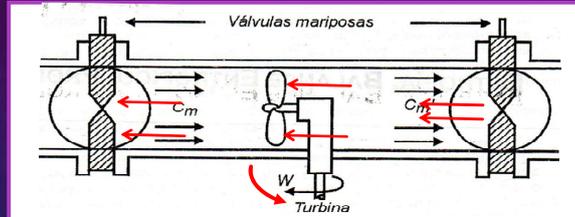
ENTROPÍA

Ejemplo de conversión de Energía Ordenada en Energía Trabajo



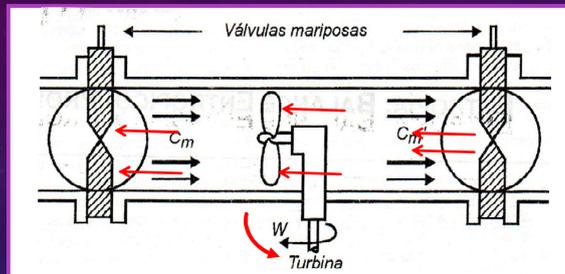
ENTROPÍA

Ejemplo de conversión de Energía Ordenada en Energía Aleatoria:
suponemos que las **válvulas de entrada y salida se cierran**



Es imposible transformar la Energía Desordenada resultante en Trabajo.
Solo parte de esa Energía Térmica podría convertirse en Trabajo

ENTROPÍA



Conclusión:

La Energía Total se mantiene constante pero se perdió la capacidad en el sistema para realizar Trabajo

ENTROPIA

Observaciones:

- La ENTROPIA es una medida de la capacidad para producir W
- Todas las Energías Mecánicas pueden convertirse en otras energías en condiciones ideales.
- Los efectos disipativos (fricción, resistencia eléctrica, histéresis, etc) producen degradación de la Energía convirtiéndose en Energía Térmica
- La Energía Térmica nunca puede convertirse totalmente en W
- Los movimientos aleatorios de las moléculas del gas tienen muy poca probabilidad de reorientarse “ordenadamente” sin ayuda externa.

CARACTERÍSTICAS DE LA ENTROPÍA:

- Transformaciones Reversibles e Irreversibles:

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} \leq S_2 - S_1$$

$$dQ = 0$$

$$S_1 \leq S_2$$

$$dQ > 0$$

$$S_1 < S_2$$

calor absorbido

$$dQ < 0$$

$$S_1 > S_2$$

calor cedido

- La entropía S es una Propiedad Extensiva y se puede transformar en Intensiva: $s = \frac{S}{m}$
- Si se conocen los estados inicial y final se puede calcular la variación de Entropía independientemente si la transformación ocurrida entre ambos es Reversible o Irreversible.

CARACTERÍSTICAS DE LA ENTROPÍA:

- Permite evaluar cambios de Entropía pero no dice nada de los valores absolutos. Sin embargo, por la **Tercera Ley de la Termodinámica** se establece para las Sustancias Puras en estado cristalino un valor de cero para 0 K (importante para sistemas reactivos).

- Unidades:
$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad \left[\frac{\text{joule}}{\text{°K}} \right] \quad \left[\frac{\text{ergio}}{\text{°K}} \right] \quad \left[\frac{\text{cal}}{\text{°K}} \right]$$

- Es una propiedad que solo depende del sistema en el estado en que se encuentra y no de su historia. Por lo tanto, se puede expresar en función de otras 2 propiedades:

$$S = f(T, V)$$

$$S = f(T, P)$$

$$S = f(P, V)$$

CARACTERÍSTICAS DE LA ENTROPÍA:

- Puede expresarse en forma diferenciada:

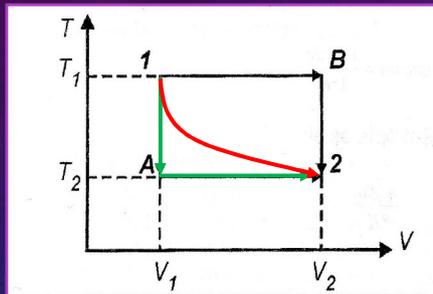
$$s = f(T, V) \quad \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right) dT + \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right) dV = dS$$

$$s = f(T, P) \quad \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right) dT + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) dP = dS$$

$$s = f(P, V) \quad \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) dP + \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right) dV = dS$$

CARACTERÍSTICAS DE LA ENTROPÍA:

- Transformación 1A 2:



$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V dT + \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV$$

$$s_A - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V dT$$

$$s_2 - s_A = \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV$$

Transformación 1 B 2 :

se puede resolver en forma similar con el mismo resultado

DIAGRAMAS ENTRÓPICOS

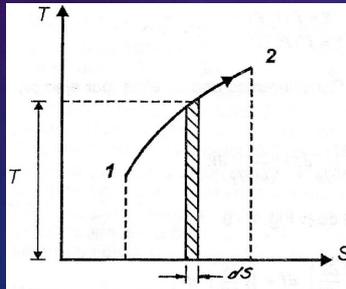
- Un sistema puede expresarse en función de la S:

$$T = \phi(S, V)$$

$$P = \phi(S, T)$$

$$V = \phi(S, P)$$

- Pueden construirse gráficos en función de S:



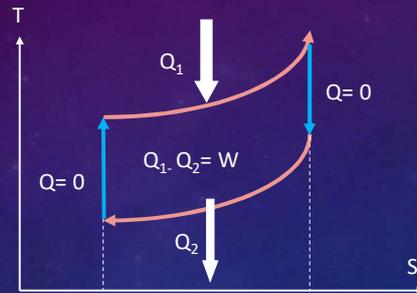
El área bajo la curva representa la cantidad de **calor intercambiada reversiblemente** con el exterior

$$dQ = TdS$$
$$Q_{1-2} = \int_1^2 TdS$$

DIAGRAMAS ENTRÓPICOS

- Si el sistema recorre un ciclo:

Las transformaciones cumplen un ciclo en un Sistema cerrado:



$$Q_{Total} + W_{Total} = \Delta U$$

$$\Delta U = 0$$

$$Q_{Total} = W_{Total}$$

Las líneas a Entropía constante representan transformaciones adiabáticas para un *sistema internamente reversible*.

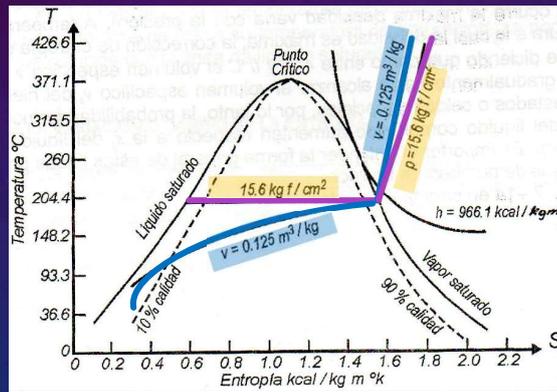
ENTROPÍA DE SUSTANCIAS PURAS

- Los valores específicos de “s” se encuentran tabulados como las otras propiedades para las sustancias puras.
- En la región de saturación, la entropía se calcula en forma similar a las otras propiedades:

$$s = x * s_g + (1 - x) * s_l$$

ENTROPÍA DE SUSTANCIAS PURAS

- Gráficos: propiedades del agua en función de s



CÁLCULO DE LA ENTROPÍA

- Gases Ideales

$$\begin{aligned} dQ &= dU + PdV \\ dQ &= TdS \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad TdS = dU + PdV$$

Se conoce que para Gases Ideales: $du = c_v dT$ $\frac{R_p}{v} = \frac{P}{T}$

reemplazando:

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{P}{T} dv = c_v \frac{dT}{T} + R_p \frac{dv}{v}$$

integrando:

$$s = f(T, v) \quad \boxed{s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_p \ln \frac{v_2}{v_1}} \quad (KJ / kg K)$$

R R particular: volumen específico- s $KJ / kg K$ – R univ: volumen molar – s $KJ / kmol K$

CÁLCULO DE LA ENTROPÍA

- Gases Ideales

$$h = u + Pv$$

$$dh = du + Pdv + vdP = dq + vdP$$

$$dq = Tds$$



$$Tds = dh - vdP$$

Se conoce que para Gases Ideales:

$$dh = c_p dT$$

$$\frac{R_p}{P} = \frac{v}{T}$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v}{T} dP = c_p \frac{dT}{T} - R_p \frac{dP}{P}$$

$$s = f(T, P)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_p \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{KJ / kg K})$$

R R particular: volumen específico - s KJ / kg K - R univ: volumen molar - s KJ / kmol K

CÁLCULO DE LA ENTROPÍA

- Gases Ideales

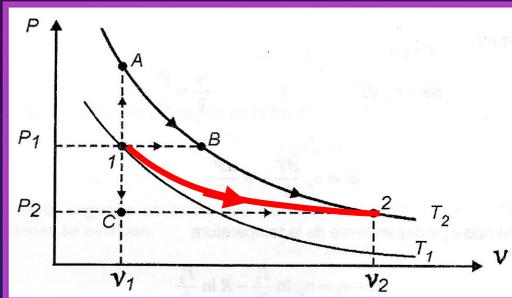
$$Pv = R_p T \quad \longrightarrow \quad ds = c_v \frac{dT}{T} + R_p \frac{dv}{v} = c_v \left[\frac{dP}{P} + \frac{dv}{v} \right] + R_p \frac{dv}{v}$$
$$\frac{dP}{P} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T}$$

$$ds = (R_p + c_v) \frac{dv}{v} + c_v \frac{dP}{P} \quad C_p - C_v = R_p$$

$$s = f(P, V) \quad \boxed{s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{V_2}{V_1} + c_v \ln \frac{P_2}{P_1}} \quad (\text{KJ} / \text{kg K})$$

CÁLCULO DE LA ENTROPÍA

- Gases Ideales: Transformación Politrópica

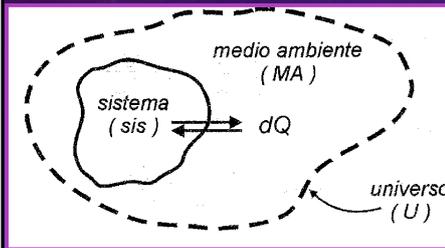


$$dq = c dT$$

$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

PRINCIPIO DE AUMENTO DE LA ENTROPÍA

- “Toda vez que se realiza una transformación irreversible, la suma de la entropía del sistema y la del medio, experimentan un aumento”.



$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} < S_2 - S_1$$

irrev

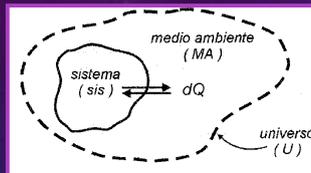
$$\int_1^2 \frac{dQ_{sist}}{T_{sist}} < (S_2 - S_1)_{sist}$$

irrev

$$\int_1^2 \frac{dQ_{ma}}{T_{ma}} < (S_2 - S_1)_{ma}$$

irrev

PRINCIPIO DE AUMENTO DE LA ENTROPÍA



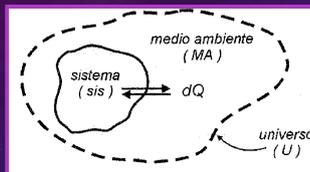
$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{ma}$$

Reemplazando:

$$\Delta S_{universo} > \int_1^2 \frac{dQ_{sist}}{T_{sist}} + \int_1^2 \frac{dQ_{ma}}{T_{ma}}$$

$$\begin{aligned} dQ_{sist} + dQ_{ma} &= 0 \\ dQ_{sist} &= -dQ_{ma} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \Delta S_{universo} > \int_1^2 \frac{dQ_{sist}}{T_{sist}} - \frac{dQ_{sist}}{T_{ma}} = \int_1^2 dQ_{sist} \left[\frac{T_{sist} - T_{ma}}{T_{sist} T_{ma}} \right]$$

PRINCIPIO DE AUMENTO DE LA ENTROPÍA



$$\Delta S_{\text{universo}} > \int_1^2 dQ_{\text{sis}} \left[\frac{T_{\text{ma}} - T_{\text{sis}}}{T_{\text{sis}} T_{\text{ma}}} \right]_{\text{irrev}}$$

Distintas situaciones que pueden presentarse:

$$\text{si } dQ_{\text{sis}} = 0 \quad \Delta S_{\text{univ}} > 0$$

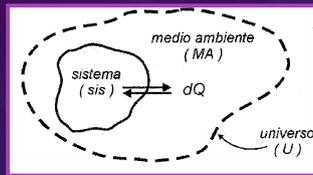
$$\text{si } dQ_{\text{sis}} \neq 0$$

$$T_{\text{ma}} > T_{\text{sis}} \quad dQ_{\text{sis}} > 0 \quad \Delta S_{\text{univ}} > 0$$

$$T_{\text{ma}} < T_{\text{sis}} \quad dQ_{\text{sis}} < 0 \quad \Delta S_{\text{univ}} > 0$$

$$T_{\text{ma}} = T_{\text{sis}} \quad \Delta S_{\text{univ}} > 0$$

PRINCIPIO DE AUMENTO DE LA ENTROPIA



$$\Delta S_{\text{universo}} > \int_1^2 dQ_{\text{sis}} \left[\frac{T_{\text{ma}} - T_{\text{sis}}}{T_{\text{sis}} T_{\text{ma}}} \right]_{\text{irrev}}$$

$$\Delta S_{\text{univ}} = (S_2 - S_1)_{\text{sistema}} + (S_2 - S_1)_{\text{ma}} > 0$$

$$(S_2_{\text{sistema}} + S_2_{\text{ma}}) > (S_1_{\text{sistema}} + S_1_{\text{ma}})$$

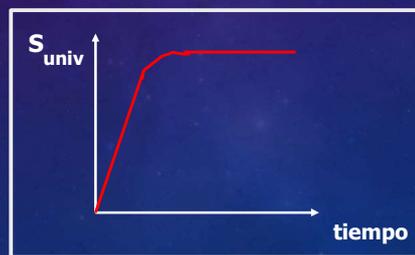
$$S_2_{\text{universo}} > S_1_{\text{universo}}$$

siempre que se produzca una transformación irreversible,
el universo experimenta un aumento de la entropía.

PRINCIPIO DE AUMENTO DE LA ENTROPÍA

Cualquier proceso que ocurre espontáneamente produce un aumento de entropía del universo

Criterio de espontaneidad: $\Delta S_{\text{univ}} > 0$



3er. Principio de la Termodinámica. Entropía

- **Valor absoluto de la Entropía de un sistema**

Se basa en el intento experimental de alcanzar las temperaturas mas bajas.

La ley general establece que el 0 K es imposible de alcanzar

Llega a la conclusión: la Entropía de todas las *sustancias en estado cristalino puro* en el cero absoluto es la misma y su valor es $S_0 = 0$

No conduce a nuevos conceptos a diferencia de la 1ro. y 2do. Principio .

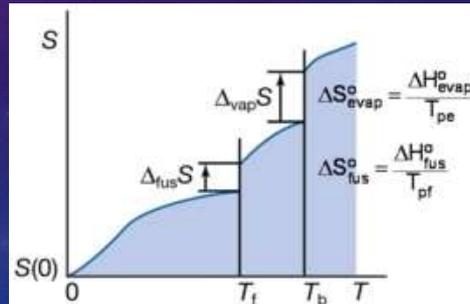
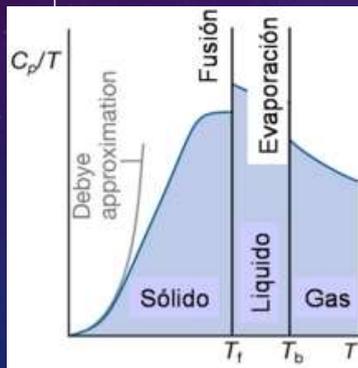
Es otro principio porque concuerda con los resultados experimentales

3er. Principio de la Termodinámica. Entropía

- Valor absoluto de la Entropía de un sistema

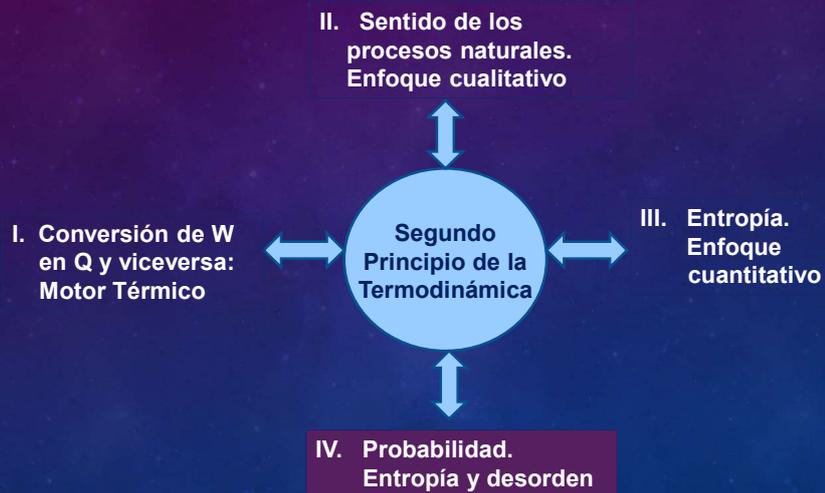
$$\int_1^2 \frac{c_p dT}{T} = S_2 - S_1$$

manteniendo $P=1bar$



$$\Delta S = S(T) - S(0K) = \int_{0K}^T dS = \int \frac{dq_{rev}}{T} = S_2$$

DISTINTAS FORMAS DE ABORDAR EL 2DO. PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA



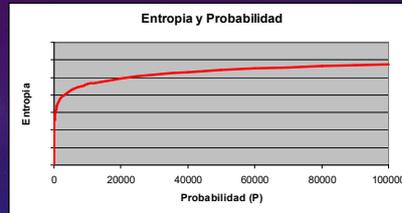
TERMODINÁMICA ESTADÍSTICA: LA ENTROPÍA PUEDE SER UNA MEDIDA DE LA PROBABILIDAD (DESORDEN)

$$S = K \ln P$$

S: entropía

K: constante de Boltzman

P: probabilidad termodinámica



P: cantidad de microestados posibles en que puede encontrarse cada partícula en el sistema.

P= 1 un solo estado posible

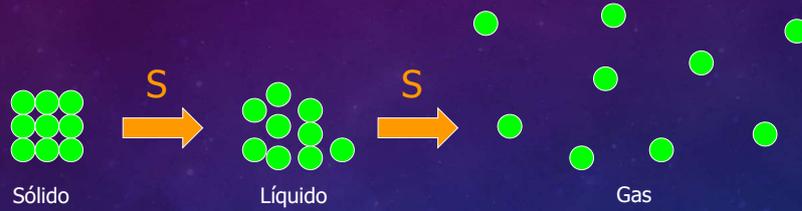
P= 10 diez estados posibles

P^N : probabilidad termodinámica para N partículas

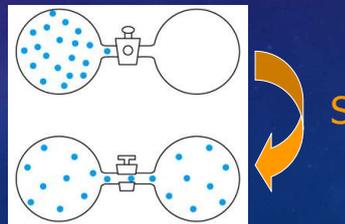
$$S = K \ln P^N = NK \ln P$$

La entropía puede ser una medida de la probabilidad (desorden)

Posibles estados de la materia



Expansión de un gas



Balance de Entropía

- Balance de Energía: existen diferentes formas de energía (Q, W, U, H, Ec, Ep)
- Balance de Entropía: siempre se expresa de la misma forma.

BALANCE DE ENTROPÍA

- Transformaciones Reversibles:

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Entropía Total} \\ \textit{entrada} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \textit{Entropía Total} \\ \textit{salida} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \textit{Variación} \\ \textit{Entropía Total} \\ \textit{sistema} \end{array} \right]$$

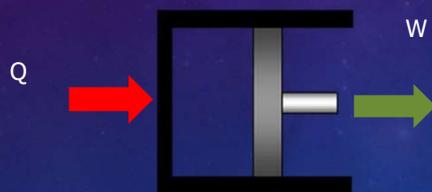
- Transformaciones Irreversibles:

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Entropía Total} \\ \textit{entrada} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \textit{Entropía Total} \\ \textit{salida} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \textit{Entropía Total} \\ \textit{generada} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \textit{Variación} \\ \textit{Entropía Total} \\ \textit{sistema} \end{array} \right]$$

Balance de Entropía – Sistema Cerrado

- Mecanismos de Transferencia de Entropía a través de la frontera

Sistemas cerrados



Transferencia de S:

Flujo de calor Q

BALANCE DE ENTROPÍA

- Transformaciones Reversibles e Irreversibles:

$$S_2 - S_1 = \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} \right]_{\text{sistema}} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{°K}} \right]$$

Internamente
Reversibles

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

$$S_2 - S_1 = \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} + S_{\text{gen}} \right]_{\text{sistema}} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{°K}} \right]$$

Internamente
Irreversibles

$$\frac{dS}{dt} = \left[\frac{d\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{\text{gen}} \right]_{\text{sistema}} \quad \left[\frac{\text{kW}}{\text{°K}} \right]$$

Internamente
Irreversibles con
variación de S
con el tiempo

Balance de Entropía - SARNE

Volumen de control – Flujo no estacionario

$$m_{\text{entrada}} \\ S_{\text{entrada}} = m_e s_e$$

Flujo de calor Q

Flujo de masa m



$$m_{\text{salida}} \\ S_{\text{salida}} = m_s s_s$$

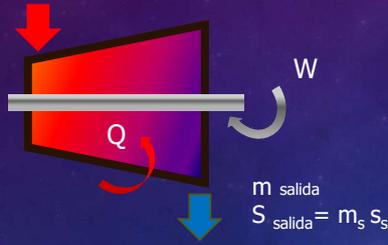
$$\int \frac{dQ}{T} + m_{\text{ent}} s_{\text{ent}} - m_{\text{sal}} s_{\text{sal}} + S_{\text{gen vc}} = S_2 - S_1 = \Delta S_{\text{ sistema}} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{°K}} \right]$$

Balance de Entropía SARE

Volumen de control -Fujo estacionario

m_{entrada}

$$S_{\text{entrada}} = m_e s_e$$



$$S_2 - S_1 = \Delta_{\text{sistema}} = 0$$

$$\int \frac{dQ}{T} + m_{\text{ent}} s_{\text{ent}} - m_{\text{sal}} s_{\text{sal}} + S_{\text{gen vc}} = 0 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{°K}} \right]$$

BALANCE DE ENTROPÍA

- Balance de Entropía del Universo

$$S_{gen} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{medio} \quad \left[\frac{kJ}{\circ K} \right]$$

$$\Delta S_{sistema} = m (s_{sal} - s_{ent}) \quad \left[\frac{kJ}{\circ K} \right]$$

$$\Delta S_{medio} = \frac{Q_{medio}}{T_{medio}} \quad \left[\frac{kJ}{\circ K} \right] \quad T_{medio} = cte$$

Termodinamica - F Ing - UNCuyo 2021