



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS.



NOMBRE DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE:

TERMODINÁMICA

**UNIDAD DE COMPETENCIA III: SEGUNDA LEY
DE LA TERMODINÁMICA.**

Responsable: Dr. Jorge Mulia Rodríguez

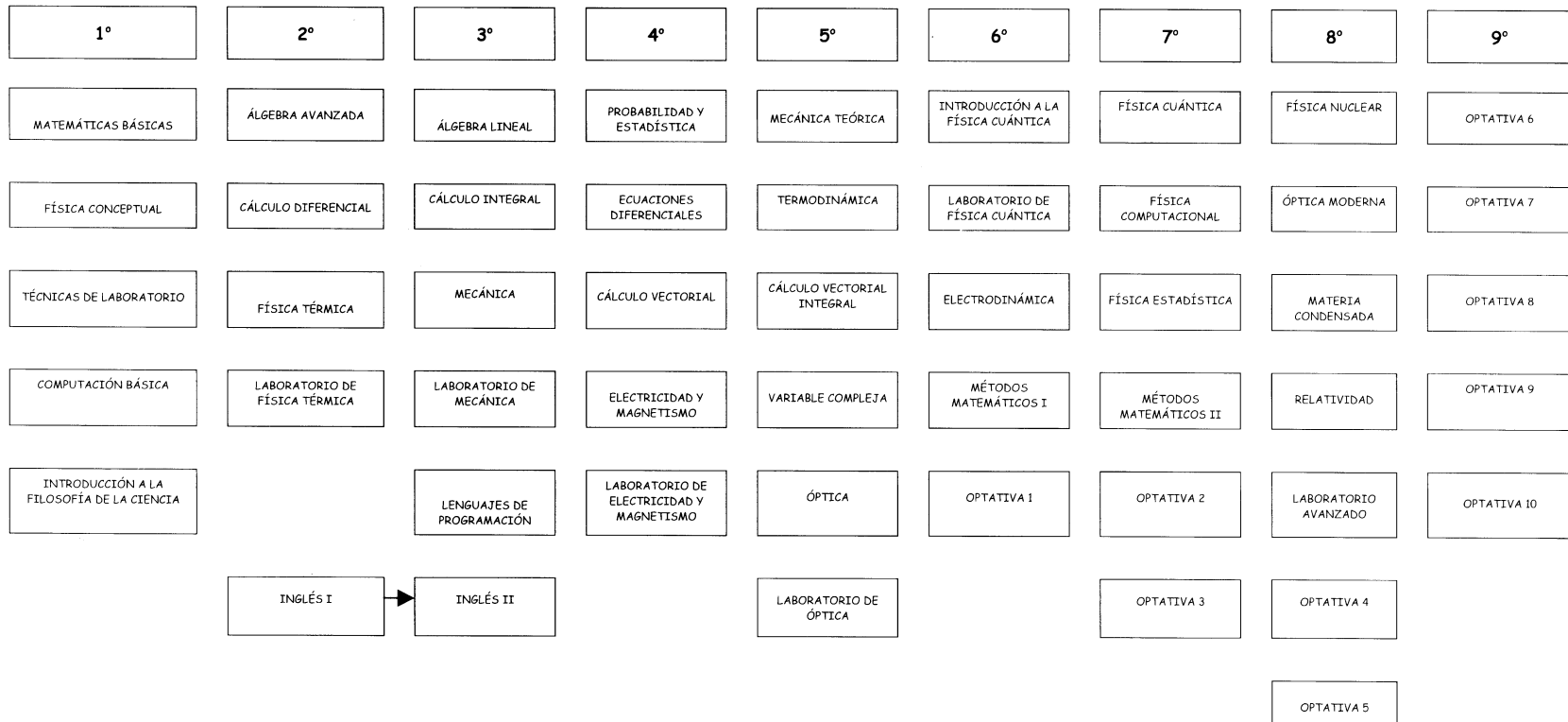
Septiembre de 2018

GUIA EXPLICATIVA DE USO GENERAL PARA LA UNIDAD DE APRENDIZAJE DE TERMODINÁMICA (2018B). UNIDAD DE COMPETENCIA III. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

	Página		Página
Trayectoria académica	3	3 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA: ENTROPÍA (ORDEN, DESORDEN)	23
Unidad de Aprendizaje	4	3.1 Definición macroscópica de entropía	25
Estructura de la unidad de aprendizaje	5	4 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA	26
Desarrollo de la unidad de aprendizaje	6	5 VARIACIÓN DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CERRADOS	27
Objetivos	8	6 CICLO DE CARNOT	31
Introducción	9	Ejercicios de tarea	34
1 CAMBIO ESPONTÁNEO	10	BIBLIOGRAFÍA	36
2 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA	12		
2.1 Concepto de entropía	14		
2.2 Desigualdad de Clausius	16		
2.3 La entropía base de la segunda ley de la termodinámica	19		
2.4 Ejercicios	20		
2.5 Caso particular: sistema aislado	22		

Trayectoria académica

TRAYECTORIA IDEAL (9 SEMESTRES) DE LA LICENCIATURA EN FÍSICA



Unidad de aprendizaje



Universidad Autónoma del Estado de México

Secretaría de Docencia

Coordinación General de Estudios Superiores

Programa Institucional de Innovación Curricular

Programa de Estudios por Competencias
(Incluir el nombre de la unidad de aprendizaje)

I. IDENTIFICACIÓN DEL CURSO TERMODINAMICA

ORGANISMO ACADÉMICO: FACULTAD DE CIENCIAS									
Programa Educativo: FISICO				Área de docencia: DEPARTAMENTO DE FÍSICA					
Aprobación por los H.H. Consejos Académico y de Gobierno			Fecha:		Programa reestructurado por: JORGE MULIA RODRIGUEZ, CARLOS RAÚL SANDOVAL ALVARADO, MIGUEL MAYORGA ROJAS, LORENA ROMERO SALAZAR			Fecha de reestructuración : febrero de 2006	
Clave	Horas de teoría	Horas de práctica	Total de horas	Créditos	Tipo de Unidad de Aprendizaje	Carácter de la Unidad de Aprendizaje	Núcleo de formación	Modalidad	
	4	2	6	10	CURSO	OBLIGATORIA	SUSTANTIVO	PRESENCIAL	
Prerrequisitos (Conocimientos Previos): CONOCIMIENTOS BÁSICOS DE: CALOR Y TEMPERATURA, DERIVADAS PARCIALES, INTEGRACIÓN DE UNA VARIABLE REAL.					Unidad de Aprendizaje Antecedente Física Térmica, Calculo Diferencial, Cálculo integral vectorial, Algebra Lineal		Unidad de Aprendizaje Consecuente Física Estadística		
Programas educativos en los que se imparte: Licenciatura en Física									

Estructura de la unidad de aprendizaje



Universidad Autónoma del Estado de México

Secretaría de Docencia

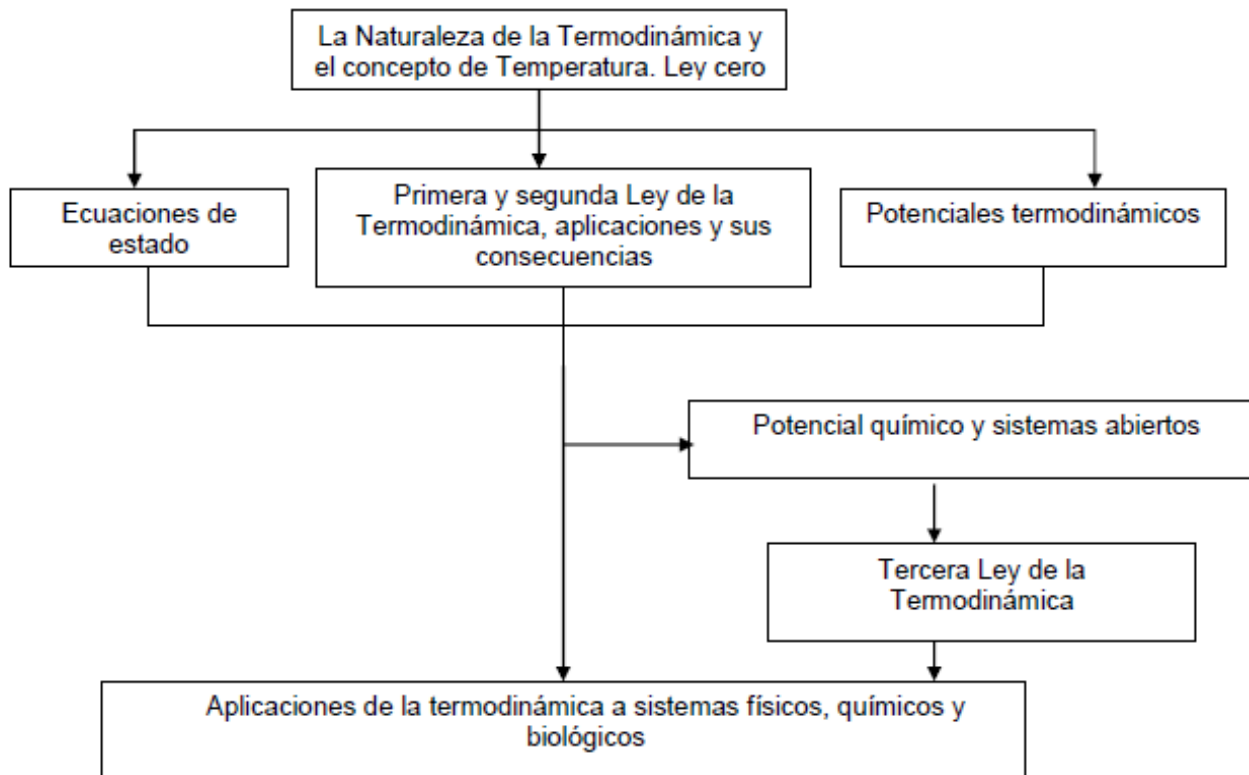
Coordinación General de Estudios Superiores

Programa Institucional de Innovación Curricular

II. ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE

1. La Naturaleza de la Termodinámica y el concepto de Temperatura. Ley cero de la termodinámica.
2. Ecuaciones de estado
3. Primera y segunda Ley de la Termodinámica, aplicaciones y sus consecuencias.
4. Potenciales termodinámicos
5. Tercera Ley de la Termodinámica
6. Sistemas abiertos
7. Aplicaciones de la termodinámica

X.- SECUENCIA DIDÁCTICA



XI. DESARROLLO DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE



Universidad Autónoma del Estado de México

Secretaría de Docencia

Coordinación General de Estudios Superiores

Programa Institucional de Innovación Curricular

UNIDAD DE COMPETENCIA III	ELEMENTOS DE COMPETENCIA		
	Conocimientos	Habilidades	Actitudes/ Valores
Primera y Segunda Ley de la Termodinámica, aplicaciones y sus consecuencias	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajo termodinámico. • Calor • Energía • Primera Ley de la Termodinámica • Aplicaciones de la Primera Ley • Consecuencias de la Primera Ley • Segunda Ley • Aplicaciones de la Segunda Ley • Máquinas térmicas, descripción y su eficiencia 	<p>Capacidad de seleccionar adecuadamente dos estados termodinámicos para poder determinar el trabajo termodinámico en diferentes trayectorias en un diagrama PV.</p> <p>Determinar las capacidades caloríficas de un gas ideal y de un gas real.</p> <p>Identificar un proceso reversible: isotérmico, isobárico, isocórico, o adiabático infinitesimal,</p> <p>Identificar la entropía y temperatura absoluta en diferentes procesos cuasiestáticos para ver la expresión general de la segunda ley.</p> <p>Aplicar Primera y Segunda Ley de la termodinámica.</p> <p>Analizar ciclos en máquinas térmicas y su analogía con sistemas físicos, químicos y biológicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Participar en discusiones. - Interés en los temas. - Cooperar en el trabajo en equipo. • Responsabilidad. • Disciplina • Tolerancia y participación crítica.
ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS: Exposiciones del docente Lecturas y discusión en clase. Elaboración de mapas conceptuales.	RECURSOS REQUERIDOS	TIEMPO DESTINADO	
	<ul style="list-style-type: none"> - Pizarrón - Cuaderno de ejercicios. - Proyector de acetatos. 	30 horas	

SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

Objetivos

- ▶ Introducir los conceptos básicos y definiciones requeridos por **la segunda ley de la Termodinámica**.
- ▶ Introducir el concepto de **entropía**.

Introducción.

- ▶ Es **el segundo principio** el que nos indicará las limitaciones que existen en las transformaciones energéticas.
- ▶ Se identificará la entropía en diferentes procesos cuasiestáticos para ver la expresión general de la segunda ley.

1. CAMBIO ESPONTÁNEO

Cambio espontáneo: Ocurre sin necesidad de ser impulsado por una influencia externa.



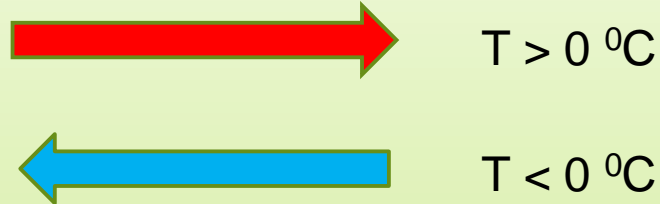
Imagen tomada de:
<http://elnoticierodearteixo.com/not/32009/fritanga-contra-el-cambio-climatico>

Estudio publicado en Nature Communications, científicos de la Universidad de Reading muestran que las moléculas de ácidos grasos emitidas durante la cocción forman espontáneamente estructuras tridimensionales complejas en gotas de aerosoles atmosféricos *.

- **El tiempo** va en una dirección y que todo sistema aislado evoluciona en un sentido hasta alcanzar el equilibrio.

* <http://elnoticierodearteixo.com/not/32009/fritanga-contra-el-cambio-climatico>

- El **sentido** del proceso espontáneo puede depender de la temperatura.



- En cualquier proceso **espontáneo**, el camino entre el estado inicial y el final es **irreversible**.
- A $T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ el sistema se encuentra en **equilibrio**, ninguna es espontánea, **proceso reversible**.

2. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

Entropía (S)

- La función de estado cuya variación en un proceso determina en qué sentido tiene lugar, es la **entropía (S)**.

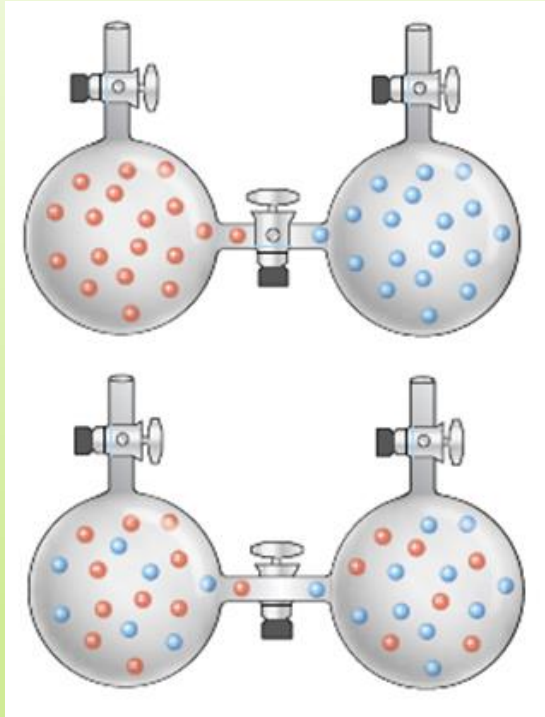
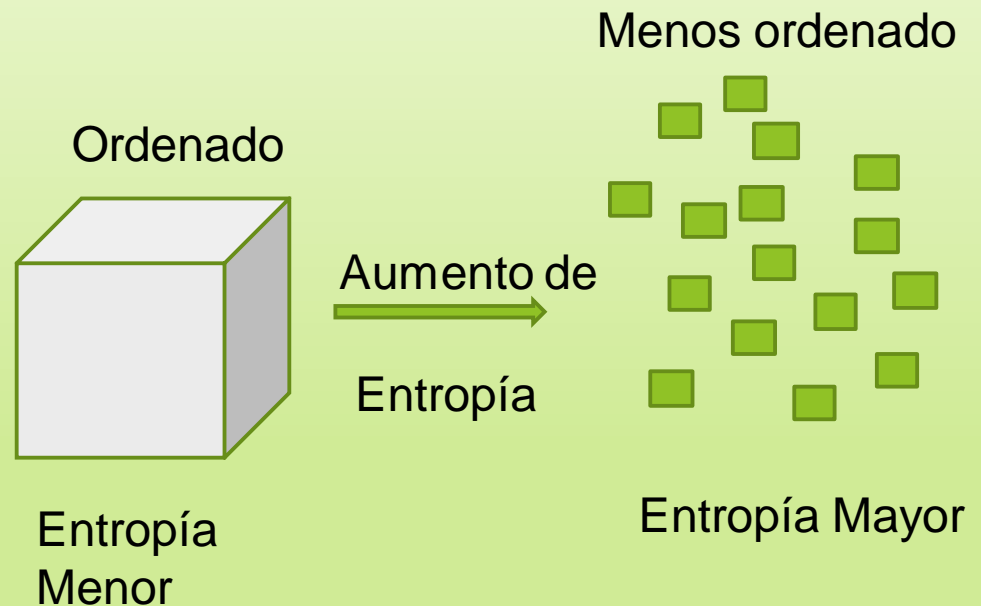


Imagen tomada de:
<https://lidiakonlaquimica.files.wordpress.com/2015/06/entropia.png>



Segunda ley de la termodinámica.

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

Criterio de espontaneidad:

$$\Delta S_{\text{univ}} > 0$$

- En todo proceso reversible, la entropía del universo permanece constante.
- En todo proceso irreversible, la entropía del universo aumenta.

Proceso reversible: $\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ent}} = 0$ \longrightarrow EQUILIBRIO

Proceso irreversible: $\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ent}} > 0$ \longrightarrow ESPONTÁNEO

Desigualdad de Clausius: $\Delta S_{\text{univ}} \geq 0$

2.1 Concepto de entropía

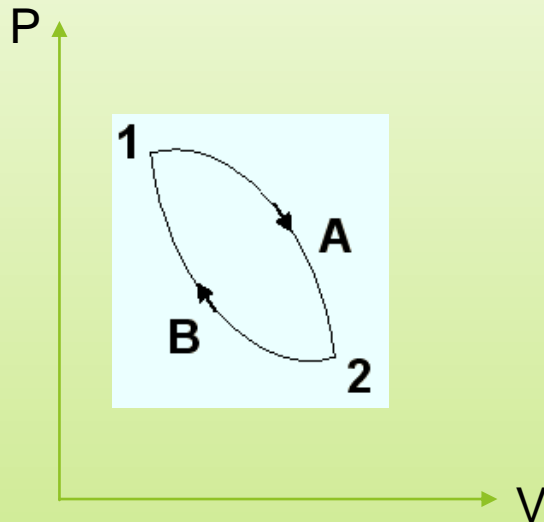


Figura: Ciclo reversible formado por dos procesos internamente reversibles A y B como se muestra en la

- La desigualdad de Clausius es base para definir una nueva propiedad llamada **entropía (S)**.

Aplicando la desigualdad de Clausius.

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

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

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} - \int_{1B}^{2B} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1B}^{2B} \frac{\delta Q}{T}$$

$$\int_{1A}^{\bar{2}A} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1B}^{\bar{2}B} \frac{\delta Q}{T}$$

La integral $\int \frac{\delta Q}{T}$ es la misma, independientemente de la trayectoria.

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

2.2 Desigualdad de Clausius

Considérese un sistema B, y aplicando la primera ley al sistema, la ecuación es:

$$\oint \delta Q_S = \oint \delta W_B$$

Los flujos de energía tienen lugar simultáneamente se obtendrá:

$$\frac{\delta Q_R}{T_o} = \frac{\delta Q_S}{T} \quad \delta Q_R = T_o \frac{\delta Q_S}{T}$$

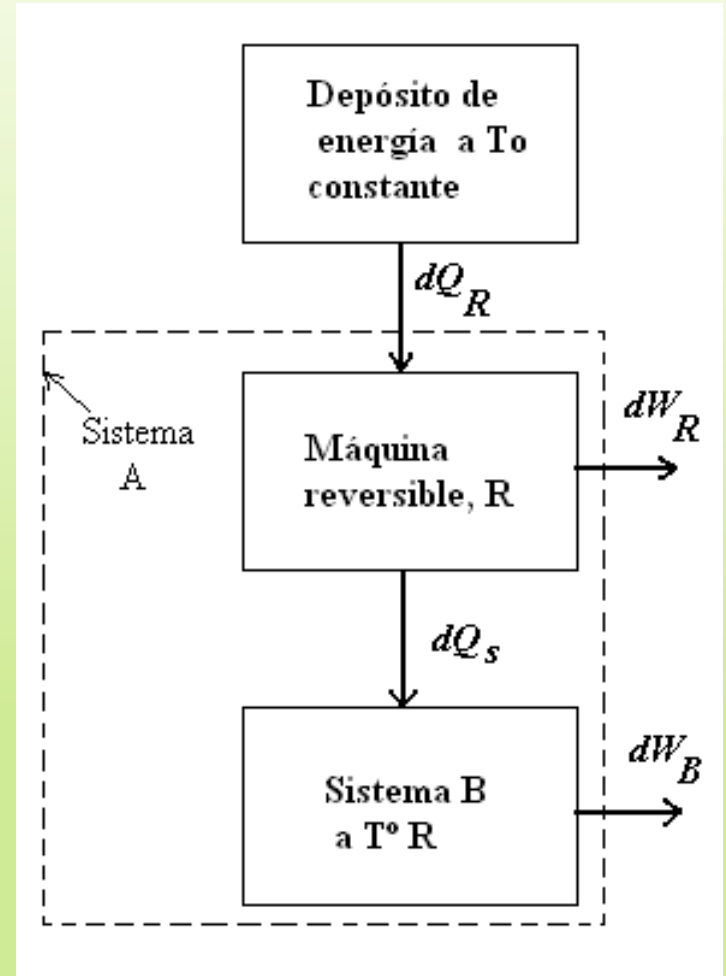


Figura: Esquema para la desigualdad de Clausius

Aplicando la primera ley al motor R da:

$$(1) \quad \delta W_R = \delta Q_R - \delta Q_S$$

Sustituyendo el calor que recibe, obtenemos

$$(2) \quad \delta W_R = T_o \frac{\delta Q_S}{T} - \delta Q_S$$

Para un sistema A el trabajo total es

$$(3) \quad \delta W_A = \delta W_B + \delta W_R = \delta Q_S + T_o \frac{\delta Q_S}{T} - \delta Q_S = T_o \frac{\delta Q_S}{T}$$

Concluimos que:

$$\oint \delta W_A = T_o \oint \frac{\delta Q_s}{T} \leq 0$$

Finalmente la relación conocida con el nombre de *desigualdad de Clausius*, es:

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

δ ; Símbolo para un incremento infinitesimal de una función de camino.

2.3 La entropía base de la segunda Ley de la Termodinámica

Si los procesos son todos reversibles, ningún trabajo neto tendrá que suministrarse, en otras palabras, la integral cíclica de dW_A es igual a cero y, por tanto, podemos escribir la expresión de la desigualdad de *Clausius*:

$$\oint \left(\frac{dQ}{T} \right) = 0$$

Esta ecuación conduce a un resultado importante. Si la integral a lo largo del ciclo arbitrario de una magnitud es cero, entonces la magnitud es una propiedad y se le ha dado el nombre de **entropía**, llamada también Ecuación de la segunda Ley de la Termodinámica.

$$dS = \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{int.rev.}}$$

2.4 Ejercicios:

1. De los siguientes enunciados de la segunda ley, ¿cuál es incorrecto?

- a) La entropía de un sistema aislado debe permanecer constante o aumentar.
- b) La entropía de un bloque de cobre caliente disminuye a medida que se enfría.
- c) Si se derrite hielo en agua en un recipiente aislado, la entropía neta disminuye.
- d) Debe introducirse trabajo si se transfiere energía de un cuerpo frío a uno caliente.

2. Una máquina opera con agua geotérmica a 100°C . Descarga a un arroyo a 20°C . Su eficiencia máxima es más cercana a:

- a) 21% b) 32 % c) 58% d) 80%

3. Un inventor dice que una máquina térmica opera entre capas oceánicas a 300°K y 200°K . Produce 100 kW y descarga 12000 kJ/min. Esta máquina es:

- a) Posible b) Imposible c) Reversible
d) Probable.

2.5 CASO PARTICULAR: SISTEMA AISLADO

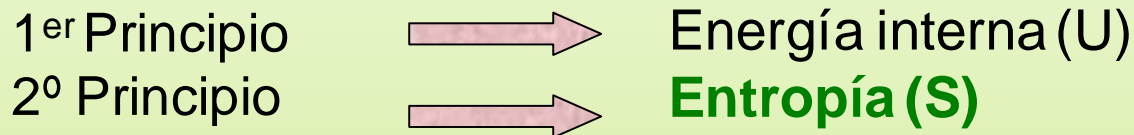
“Los sistemas aislados al evolucionar, tienden a desordenarse, nunca a ordenarse”.

$$\Delta S_{\text{ent}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}}$$

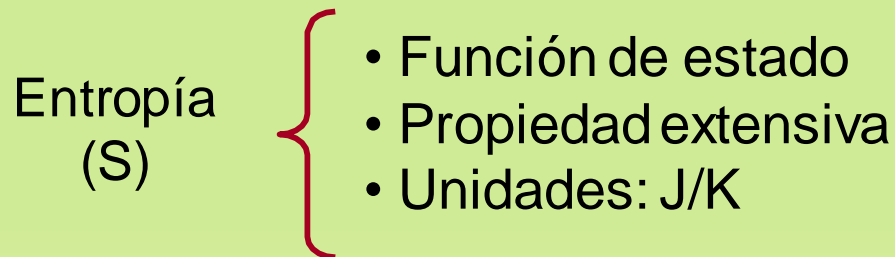
Proceso reversible, sistema aislado: $\Delta S_{\text{sis}} = 0$

Proceso irreversible, sistema aislado: $\Delta S_{\text{sis}} > 0$

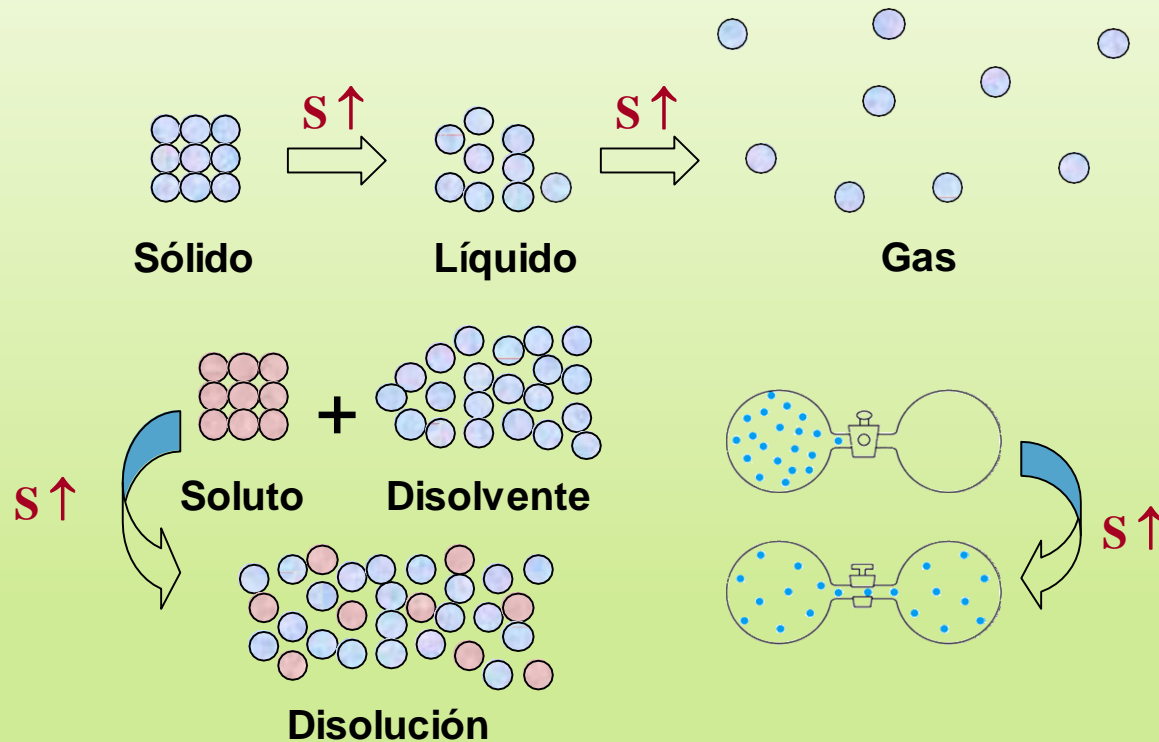
3. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA. ENTROPÍA (ORDEN, DESORDEN)



La entropía mide el grado de desorden o de orden del sistema y depende únicamente de los estados inicial y final de dicho sistema.



La **entropía** puede considerarse como una medida de la **probabilidad** (desorden).



Imágenes tomadas de:
<https://slideplayer.es/slide/3206473/>

*¿Cómo es que el agua a menos de 0°C congela espontáneamente?
¿Acaso no disminuye la entropía?*

3.1 Definición macroscópica de Entropía

Si se añade una pequeña cantidad de calor δQ a una temperatura T (en Kelvin) durante un proceso termodinámico el cambio de la entropía del sistema está dado por:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{Proceso termodinámico reversible}$$

$$dS > \frac{\delta Q_{\text{irrev}}}{T} \quad \text{Proceso termodinámico irreversible}$$

$$\text{Unidades ; } \frac{\Delta Q}{T} = \frac{\text{Julios}}{\text{Kelvin}} ; \frac{\text{Calorias}}{\text{Kelvin}}$$

4 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TERMODINÁMICA

EN UN PROCESO TERMODINÁMICO REVERSIBLE

$$\delta Q_{rev} = T dS \quad \text{a } T = \text{cte}$$

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

$$\delta W_{rev} = -P dV \quad \text{a } P = \text{cte}$$

$$dU = TdS - PdV$$

*Ecuación
Fundamental*

5 VARIACIÓN DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CERRADOS

1. Proceso Cíclico

$$\Delta S = S_1 - S_1 = \int dS = \int \frac{\partial Q_{rev}}{T} = 0$$

- ▶ En un proceso cíclico el estado final es el inicial, con independencia de si es reversible o irreversible.

▶ 2. Proceso Adiabático Reversible.

- ▶ $\Delta S = \int dS = \int \frac{\partial Q_{rev}}{T} = 0$

En un proceso adiabático reversible $\delta q_{rev} = 0$, luego $\Delta S = 0$

3. Proceso Isotérmico reversible

$$\Delta S = \int dS = \int \frac{\partial Q_{rev}}{T} = \frac{1}{T} \int \partial Q_{rev} = \frac{Q_{rev}}{T}$$

4. Proceso Isobárico o Isocórico reversible.

P = cte

$$\partial Q_{rev} = dH = n c_p dT$$

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{n c_p}{T} dT = n c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Si C_p = cte y no hay cambio de fase

V = cte

$$\partial Q_{rev} = dU = n c_v dT$$

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{n c_v}{T} dT = n c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Si C_v = cte

5. Cambio de fase [T y P constantes]

$$\Delta S = \int dS = \int \frac{\partial Q_{rev}}{T} = \frac{1}{T} \int \partial Q_{rev} = \frac{Q_{rev}}{T} = \frac{\Delta H}{T}$$

Fusión (paso de sólido a líquido)

$$\Delta S_f = \frac{\Delta H_f}{T_f} > 0 \quad (\text{porque } \Delta H_f \text{ y } T_f > 0) \Rightarrow S_{lig} > S_{sol}$$

Vaporización (paso de líquido a gas)

$$\Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T_v} > 0 \quad (\text{porque } \Delta H_v \text{ y } T_v > 0) \Rightarrow S_{gas} > S_{liq}$$

Sublimación (paso de sólido a gas)

$$\Delta S_s = \frac{\Delta H_s}{T_s} > 0 \quad (\text{porque } \Delta H_s \text{ y } T_s > 0) \Rightarrow S_{gas} > S_{sol}$$

6. Gas ideal (procesos reversibles e irreversibles)

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad \text{Función de estado}$$

$$\Delta S = \int dS = \int \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} \quad \begin{array}{l} dU = \delta Q_{\text{rev}} + \delta W_{\text{rev}} \\ \delta W_{\text{rev}} = -PdV \end{array} \quad \longrightarrow \quad = \int \frac{dU + PdV}{T} \quad \longrightarrow \quad = \int \frac{C_v dT + PdV}{T}$$

$dU = \delta Q_v = C_v dT$

Si C_v es constante $\Delta S = C_v \int \frac{1}{T} dT + \int \frac{P}{T} dV$

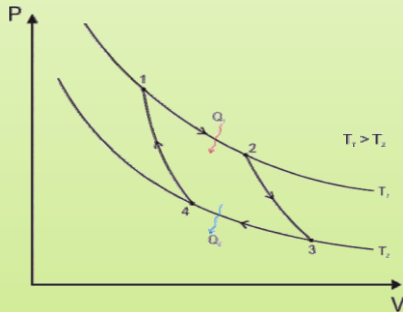
Como es un Gas Ideal $\frac{P}{T} = \frac{nR}{V}$

$$\Delta S = C_v \int \frac{1}{T} dT + \int \frac{nR}{V} dV = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

6 CICLO DE CARNOT

El **ciclo de Carnot** es un ciclo termodinámico ideal reversible entre dos fuentes de temperatura, en el cual el rendimiento es máximo. (Sadi Carnot, 1824)

Consiste en dos transformaciones isothermas y dos transformaciones adiabáticas



Una máquina térmica que realiza este ciclo se denomina máquina de Carnot. Trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de la fuente de alta temperatura y cede un calor Q_2 a la de baja temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior.

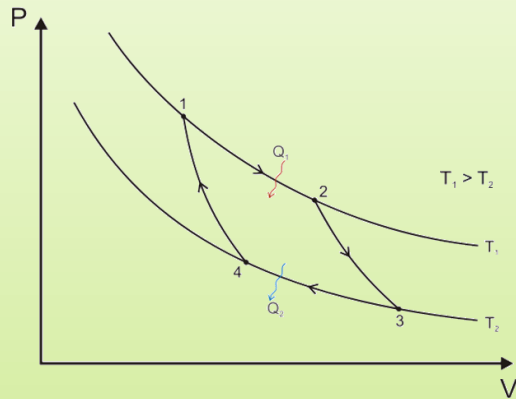
El **rendimiento** viene definido, como en todo ciclo, por

$$\eta = \frac{W_{\text{producido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{Q_{\text{absorbido}} - Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

y es mayor que cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura.

Es el ciclo más eficiente que existe en una máquina
térmica

CICLO DE CARNOT



Expansión isoterma: (proceso 1 → 2)

$$Q_{12} > 0 \quad U_{12} = 0$$

$$S_{12} = \frac{Q_{12}}{T_1} > 0$$

Expansión adiabática: (proceso 2 → 3)

$$Q_{23} = 0$$

$$U_{23} < 0$$

$$U_{23} = W_{23} < 0$$

$$S_{23} = 0$$

Compresión isoterma: (proceso 3 → 4)

$$Q_{34} < 0$$

$$U_{34} = 0 \quad W_{34} = -Q_{34} > 0$$

$$S_{34} = \frac{Q_{34}}{T_2} < 0$$

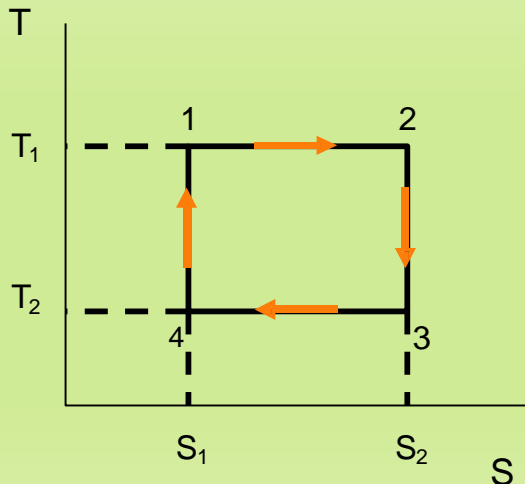
Compresión adiabática: (proceso 4 → 1)

$$Q_{41} = 0$$

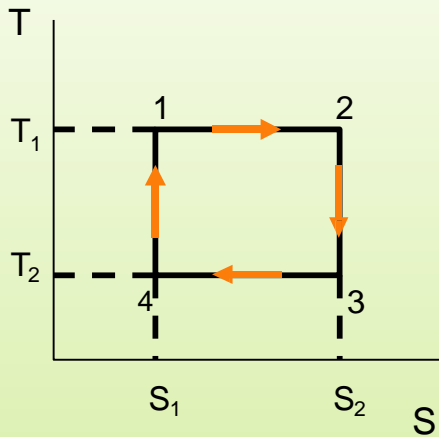
$$U_{41} > 0$$

$$U_{41} = W_{41} > 0$$

$$S_{41} = 0$$



TEOREMA DE CARNOT



$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

$$Q_1 = \int T_1 dS = T_1 \Delta S$$

$$Q_2 = -\int T_2 dS = -T_2 \Delta S$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2 \Delta S}{T_1 \Delta S} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Eficiencia de Carnot

“El rendimiento máximo de todas las máquinas térmicas que operan entre dos fuentes corresponde a la máquina reversible, el cual sólo depende de las temperaturas de las fuentes”.

Teorema de Carnot

Es imposible construir una máquina térmica de rendimiento 100% (Es imposible transformar todo el calor en trabajo, siempre existen pérdidas –porque la entropía del universo se tiene que incrementar-) **Segundo principio de la termodinámica**

Ejercicios de tarea:

1.- Cuál es la eficiencia de una máquina térmica a la cual se le suministrarán 8 000 calorías para obtener 25 200 Joules de calor de salida?

2.- Calcular la eficiencia de una máquina térmica a la cual se le suministran 5.8×10^8 cal, realizando un trabajo de 8.3×10^7 J.

3.- Suponga que una persona le comenta que construyó una máquina térmica la cual, en cada ciclo, recibe 100 cal de la fuente caliente y realiza un trabajo de 418 J. Sabiendo que $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$. ¿Qué puede opinar al respecto?

7 BIBLIOGRAFÍA

1. Classical and Statistical Thermodynamics, A. H. Carter, Prentice Hall, New Jersey 2001
2. Heat and Thermodynamics, Mark W. Zemansky, McGraw-Hill, Inc. 1992.
3. Introducción a la Termodinámica Clásica, L. García-Colín Scherer, Trillas, 1990.
4. Problemario de Termodinámica Clásica, L. García-Colín Scherer y L. Ponce Ramírez, Trillas, 1991.
5. Termodinámica, R. Annequin y J. Boutigny, Editorial Reverté, S. A. 1978.
6. Termodinámica del Equilibrio, C. J. Adkins, Editorial Reverté, S. A., 1977
7. Termodinámica, Eduardo Piña Garza, Editorial LIMUSA, 1978
8. Física, Volumen I: Mecánica, radiación y calor, Feynman, Addison Wesley, 1987.
9. Introducción a la Termodinámica de Sistemas Abiertos, L. García-Colín Scherer, Ed. El Colegio Nacional, 1981.
10. Modern Thermodynamics, From Heat Engines, D. Kondepudi e I. Prigogine, John Wiley & Sons, 1998.