

MODULO I

PRINCIPIOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA



Ing. Magdalena Castillo Aguilar
malecast@prodigy.net.mx



Actividades de aprendizaje

- Problemas de comprensión.
- Investigación de conceptos.
- Examen del modulo se entregara el 6 de abril a AMERIC.
- Evaluación:

Examen	80 %
Asistencia y participación	20 %
Total	100%



Objetivos Generales:

Al término de la unidad el participante será capaz de identificar los principios básicos de la termodinámica en sistemas de climatización.



Temario

1. Sistema de Unidades y análisis dimensional

2. Termodinámica.

3. Propiedades fisicoquímicas y mecánicas en HVAC&R

3.1 Gasto másico, caudal, volumen específico, densidad, peso, fuerza, viscosidad.

3.2 capacidad calorífica, C_p , T , P , K , térmica;

3.3 P_{sistema} , P_{atm} , P_{abs} ;

3.3 Calor y mecanismos de transferencia de calor

3.4, Estados de agregación de la materia y sus interacciones.

3.6 Relaciones graficas de P , T , V , Q , H .

3.7 Trabajo, Energía interna, Entalpia, Entropía;

4. Ecuación de Bernoulli.



Sistema de Unidades y dimensiones



- ❖ **SI** [=] m, kg, s, A, K, Candela y el mol.
- ❖ **MKS, CGS,**
- ❖ **GRAVITACIONAL o TECNICO:** Kilopond-metro-segundo [=] (Kp), (m) y (s) respectivamente.
- ❖ **SISTEMA INGLES:** pié-libra-segundo [=] (ft), (lb) y (s) respectivamente.



Ejercicios:

- ▶ Calcular la masa de **1m³** de nitrógeno si la densidad es de **1.25 g/l** en kg

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V$$

$$= 1.25 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 1 \text{ m}^3 \left| \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right| \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} = 1.25 \text{ Kg}$$

Calcular el V de 12.5g de hierro si su ρ es de 7.7g/cm^3 en L

$$V = \frac{m}{\rho}$$



La densidad del aire es
0.00129g/ml ¿Qué volumen
ocupa una masa de
10000g?

$$\rho = \frac{m}{V}$$



Realiza las siguientes conversiones:



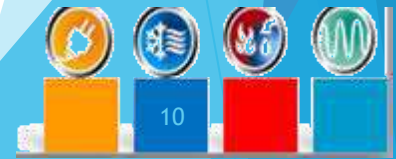
- a) 242 lbm a g
- b) 68.3 cm³ a ft³
- c) 22.6 m a ft
- d) 442 lbm a ton
- e) 25.4 lbf a kgf
- f) 3.5 poise a lbm/(s ft)
- g) 120m³ a gal



Importancia del análisis dimensional:

$$Ph [=] \rho h g$$

$$[=] \frac{kg}{m^3} * m * \frac{m}{s^2} [=] \frac{kg * m}{m^2 * s^2} [=] \frac{N}{m^2} [=] Pa$$



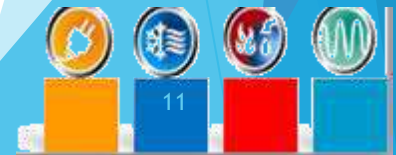
Termodinámica



❖ Vocablos griegos:

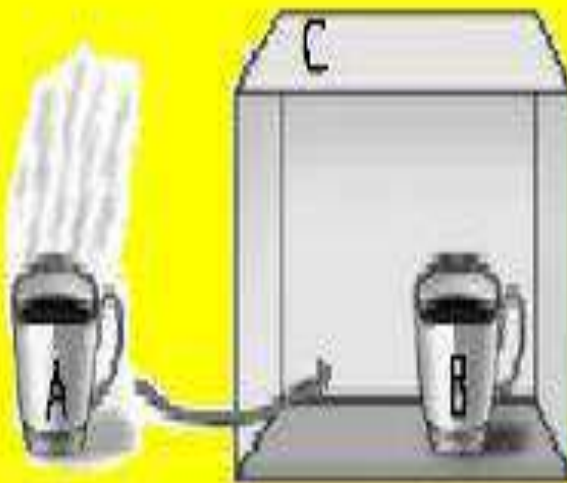
therme (calor) y ***dynamis*** (fuerza),

Describe los primeros esfuerzos por convertir el calor en potencia motriz.



❖ La termodinámica se basa en observaciones de sistemas experimentales que después se expresan en términos de algunas leyes básicas:

➤ Ley cero de la Termodinámica:



A está muy caliente

B y C están en equilibrio térmico



A, B y C están en equilibrio térmico

❖ 1a Ley de la Termodinámica:

La energía no puede ser creada ni destruida, solo puede transformarse de un tipo de energía a otro.

$$\begin{aligned} &\Delta(\textit{Energía del Sistema}) \\ &\underline{+ \Delta(\textit{Energía de los alrededores})} \\ &= 0 \end{aligned}$$

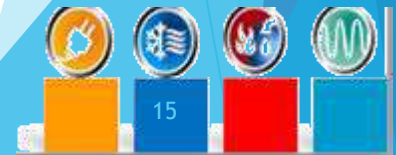
- ...
- ❖ Para un **sistema cerrado** todo intercambio de energía con sus alrededores equivaldrá a la energía neta transferida hacia o desde ellos como calor o trabajo.

$$\Delta(\textit{Energía del Sistema}) = Q + W$$

- ❖ Para procesos ΔU sistema:

$$\Delta U = Q + W$$

- ❖ Para procesos a P cte: $dW = -P dV$



- ❖ Sustituyendo en la ecuación de la 1ª Ley:

$$dQ = dU + P dV$$

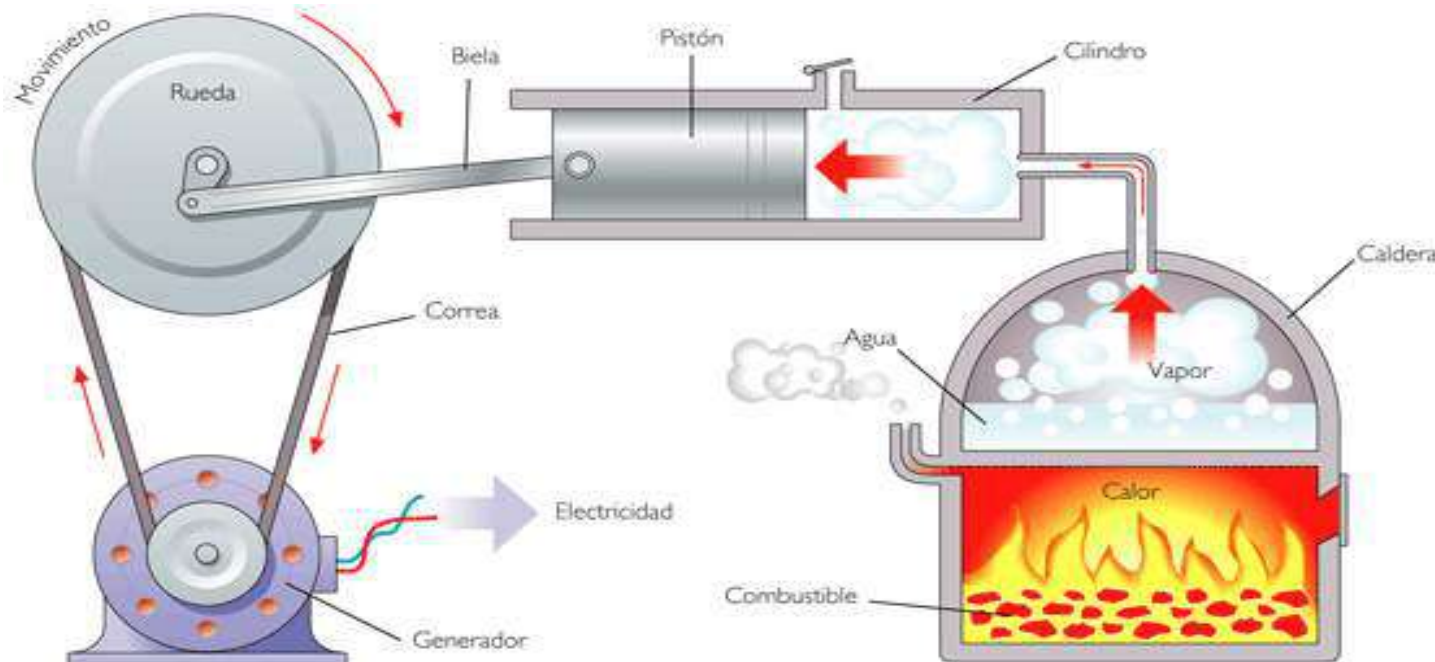
- ❖ Por definición: $dH = dU + P dV$

- ❖ Integrando:

$$H = U + PV$$

• Segunda Ley de la Termodinámica.

- Solo es posible la realización de un trabajo a partir del paso del calor de un cuerpo con menor temperatura a uno de mayor temperatura; esta ley además da una explicación del por qué existe una parte de la energía que no puede convertirse en trabajo.

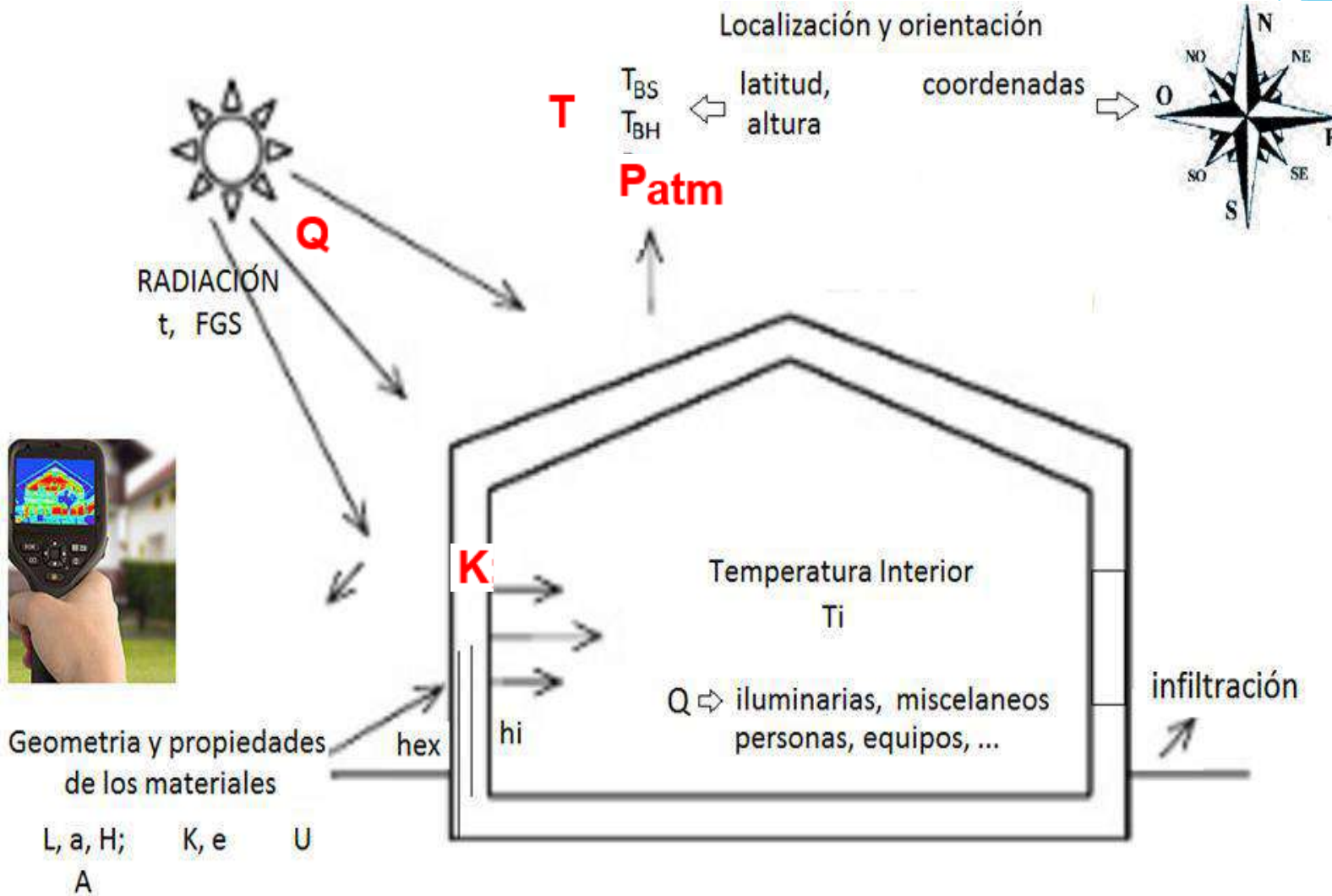


Propiedades fisicoquímicas mecánicas en HVAC&R

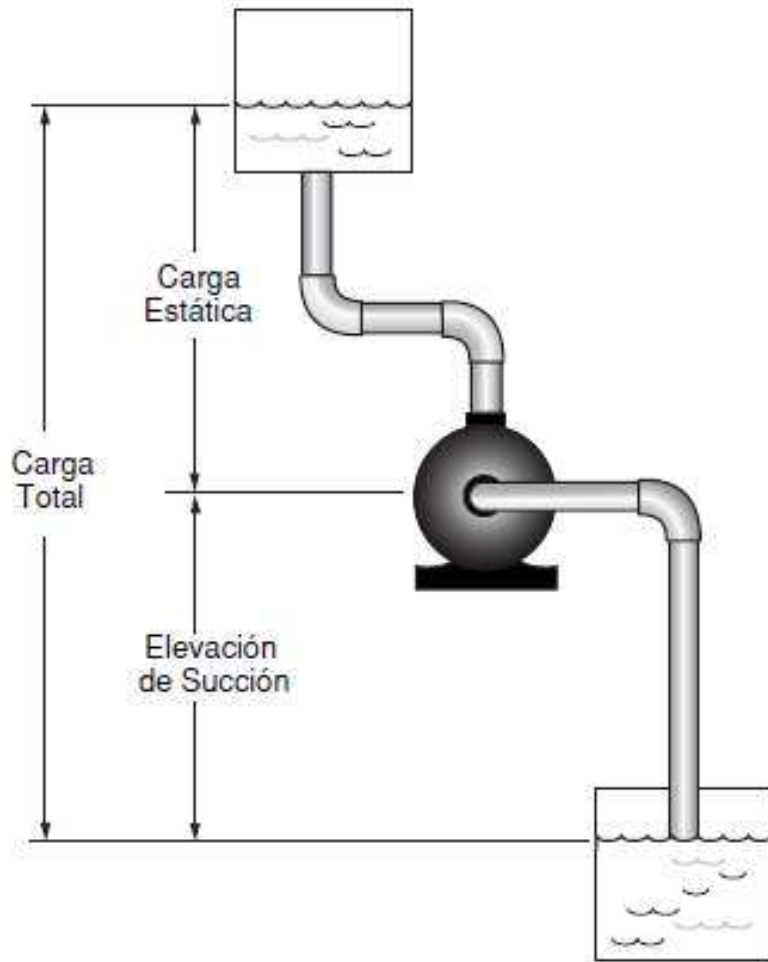
y



Gm
 $\dot{Q}$
 v
 ρ
 μ
 C_p







P H,U,S, W I, g

❖ **Masa.** Es una medida de la cantidad de materia que posee un cuerpo. kg

Sistema Inglés: lb_m

$$1lb_m = 0.454\ kg$$

Onzas: $16\ Oz = 1\ lb_m$

Granos: Es la unidad de masa británica más pequeña y se utilizaba para indicar el peso de las pepitas de oro

(Goldnuggets). $7,000\ gr = 1\ lb_m$



❖ Gasto másico o Flujo másico

$$Gm = AV\rho = m^2 \frac{m}{s} \frac{kg}{m^3} = \frac{kg}{s}$$

donde:

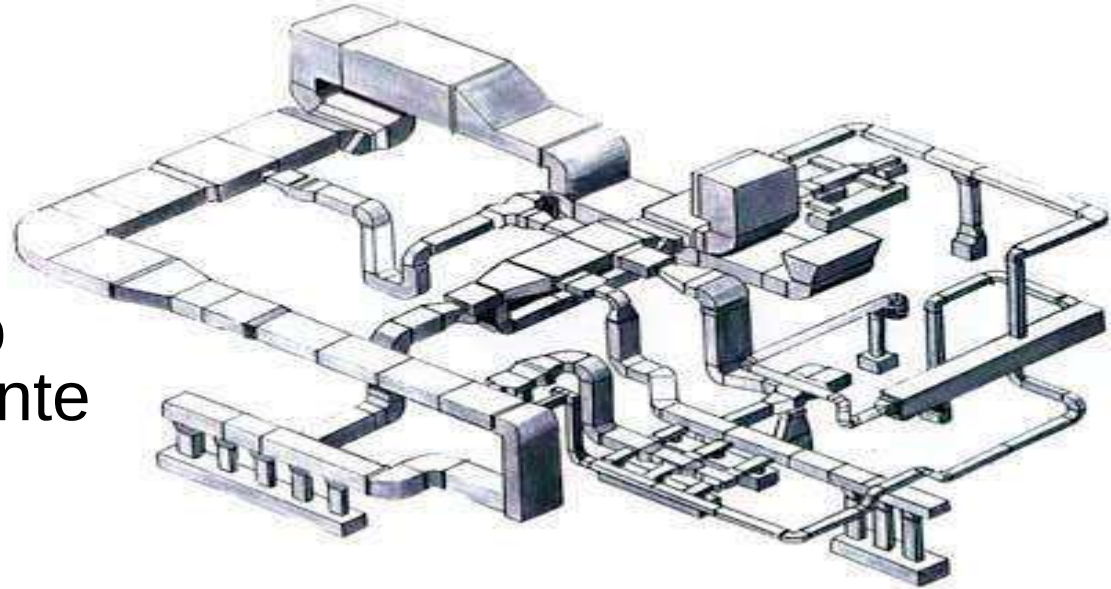
$\dot{m}$ = Gasto másico

ρ = Densidad del fluido

V = Velocidad del fluido

A = Área del tubo corriente

d = diámetro



$$\sum_{e=1}^x \dot{m}_e = \sum_{s=1}^y \dot{m}_s$$

- ❖ **Volumen.** El volumen total, que representa el tamaño de un sistemas, es una cantidad definida como el producto de tres longitudes.

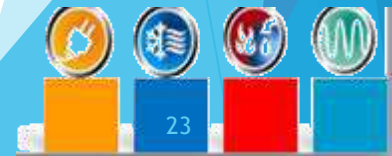


- *Volumen Específico:*

$$v = \frac{V}{m} [=] \frac{m^3}{kg} [=] \frac{ft^3}{lb}$$

- ▶ **Caudal o Gasto volumétrico:**

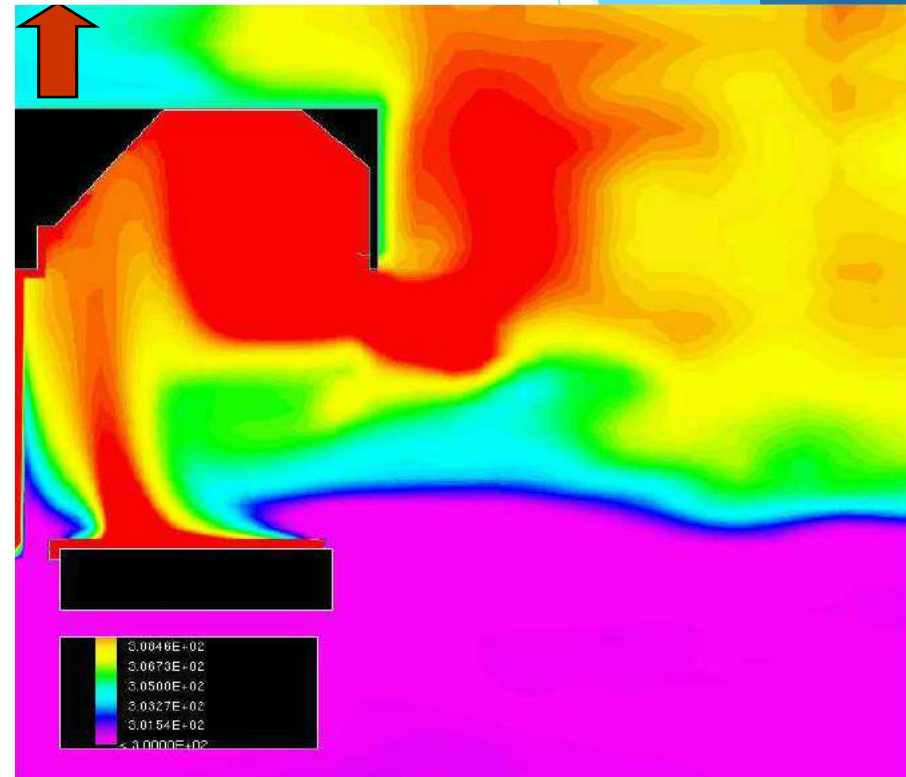
$$G_v = \dot{Q} \quad \frac{V}{t} [=] \frac{m^3}{s}$$



❖ **Densidad.** Es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia.

$$\rho = \frac{m}{V} [=] \frac{kg}{m^3}$$

Densidad Relativa = δ



❖ **Fuerza.** Se deduce de la 2ª Ley de Newton, que expresa a la fuerza:

$$F = ma [=] kg * \frac{m}{s^2} [=] N$$

❖ El **peso** es una fuerza y se define como:

$$W = mg [=] kg * \frac{m}{s^2} [=] N$$



- ❖ **lb_f** se define como la fuerza que acelera 1 *libra masa* a 32.174 ft/s².
- ❖ La Ley de Newton debe incluir en este caso una *constante de proporcionalidad dimensional* para ser consistente con esta definición:

$$F = \frac{1}{g_c} * 1(lb_m) * 32.174 \frac{ft}{s^2}$$

- Por lo que sus unidades son:

$$g_c = 32.174 \frac{lb_m ft}{lb_f s^2}$$



❖ Sistema Inglés:

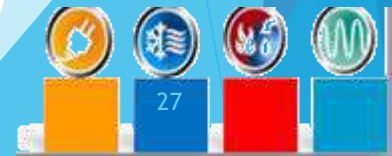
$$g_c = 32.174 \frac{lb_m ft}{lb_f s^2}$$

❖ Sistema Internacional:

$$g_c = 1 \frac{kg m}{N s^2}$$

❖ Sistema MKS:

$$g_c = 9.807 \frac{kg m}{kg_f s^2}$$



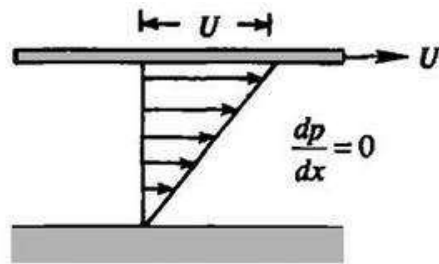
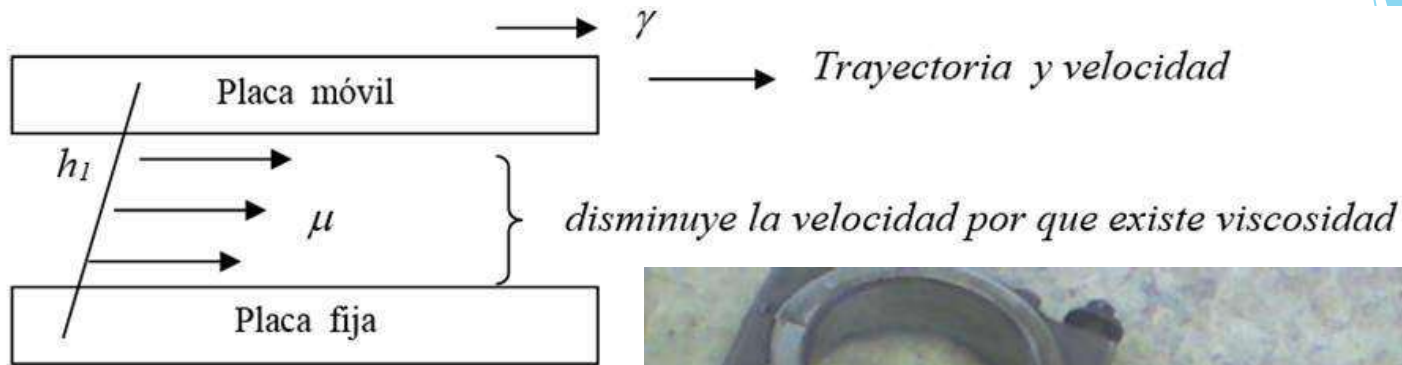
❖ Viscosidad. Resistencia al fluir



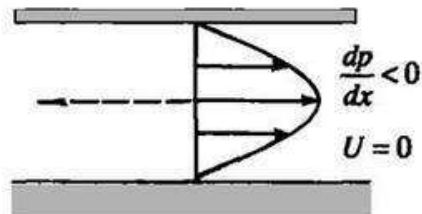
$$1\text{Pa.s} = 1000\text{cP} = 1 \text{ kg}/(\text{m.s})$$

$$\frac{\text{lb}_f \text{s}}{\text{in}^2} \quad \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = \frac{\frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kgms}}{\text{m}^2 \text{s}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{ms}} = \text{poise}$$

Flujo de Couette



Flujo Plano de Couette



Flujo Plano de Poiseuille

γ = viscosidad cinemática $\gamma = \frac{\mu}{\delta}$ $[-]$ m^2/s

η = viscosidad dinámica $\eta = \gamma\delta$ $[-]$ $Pa*s$



Determinar el numero de Reynolds de un fluido que circula agua a una velocidad de 3m/s por una tubería con diámetro de 3in si la densidad de 1000 kg/m³ con una viscosidad de 1 kg/(ms) R= 228.6

Donde: ρ es la densidad

v es la velocidad del fluido

D es el diámetro de la tubería

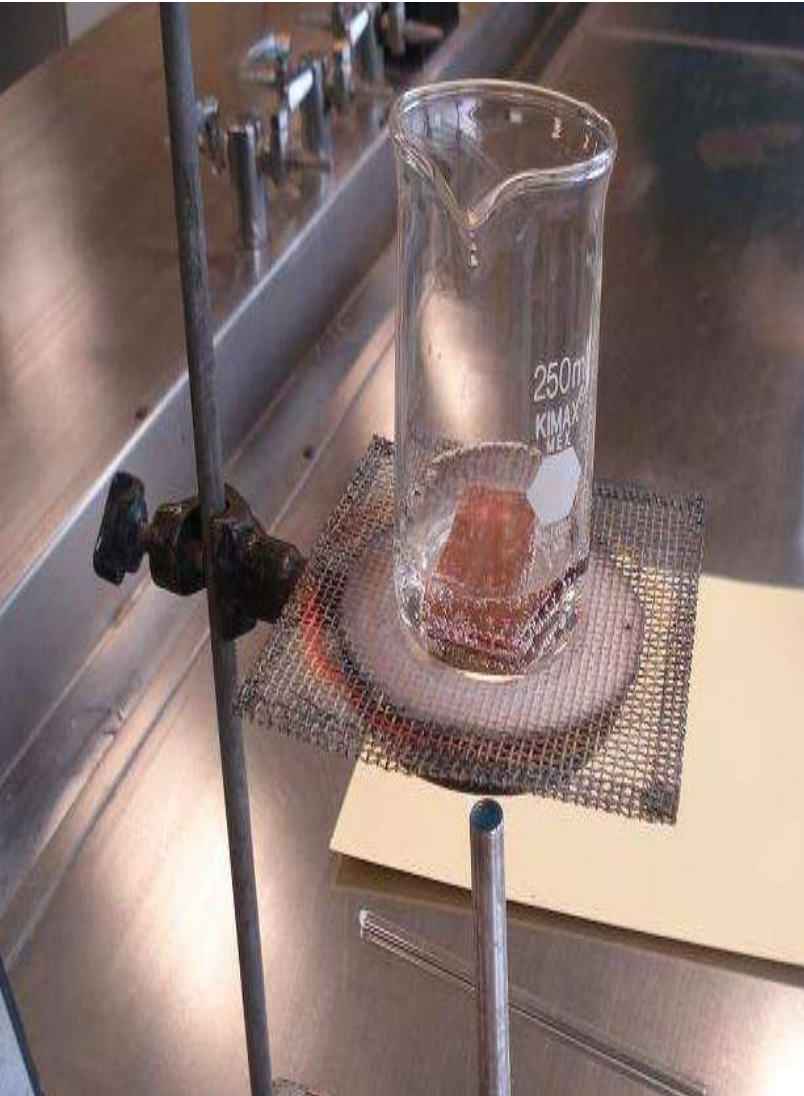
μ es la viscosidad dinámica del fluido.

$$N_R = \frac{\rho v D}{\mu}$$

El número de Reynolds es adimensional.



Capacidad calorífica



- ❖ Es la capacidad de absorción de calor cuando existe un cambio en la temperatura.

$$C = \delta Q / dT$$

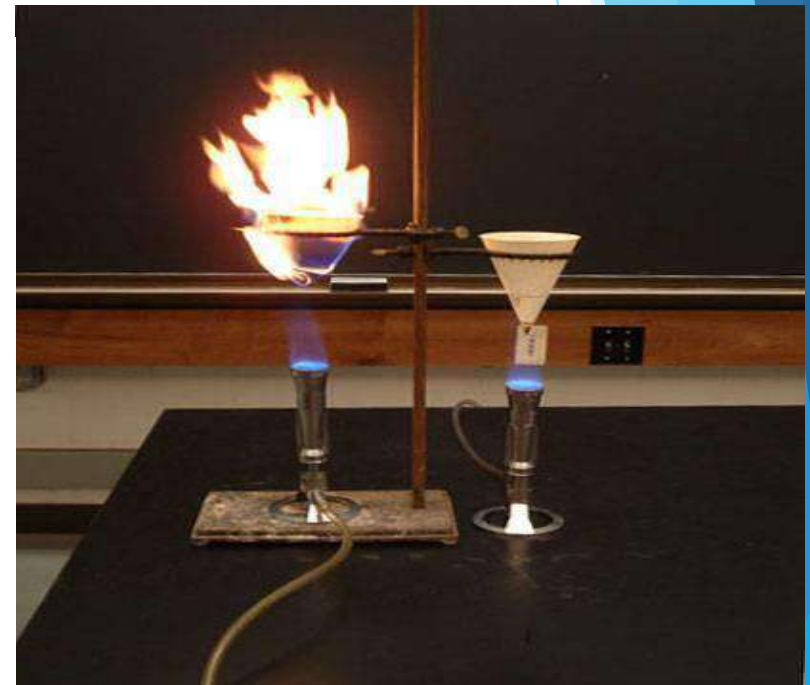
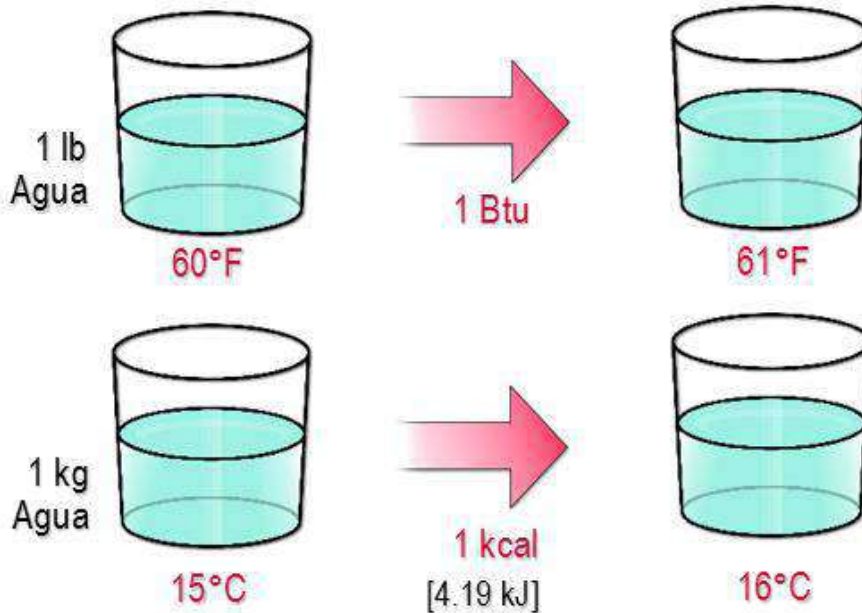
- ❖ Capacidad calorífica a $v=cte$

$$C_v = (\delta U / \delta T)_v$$

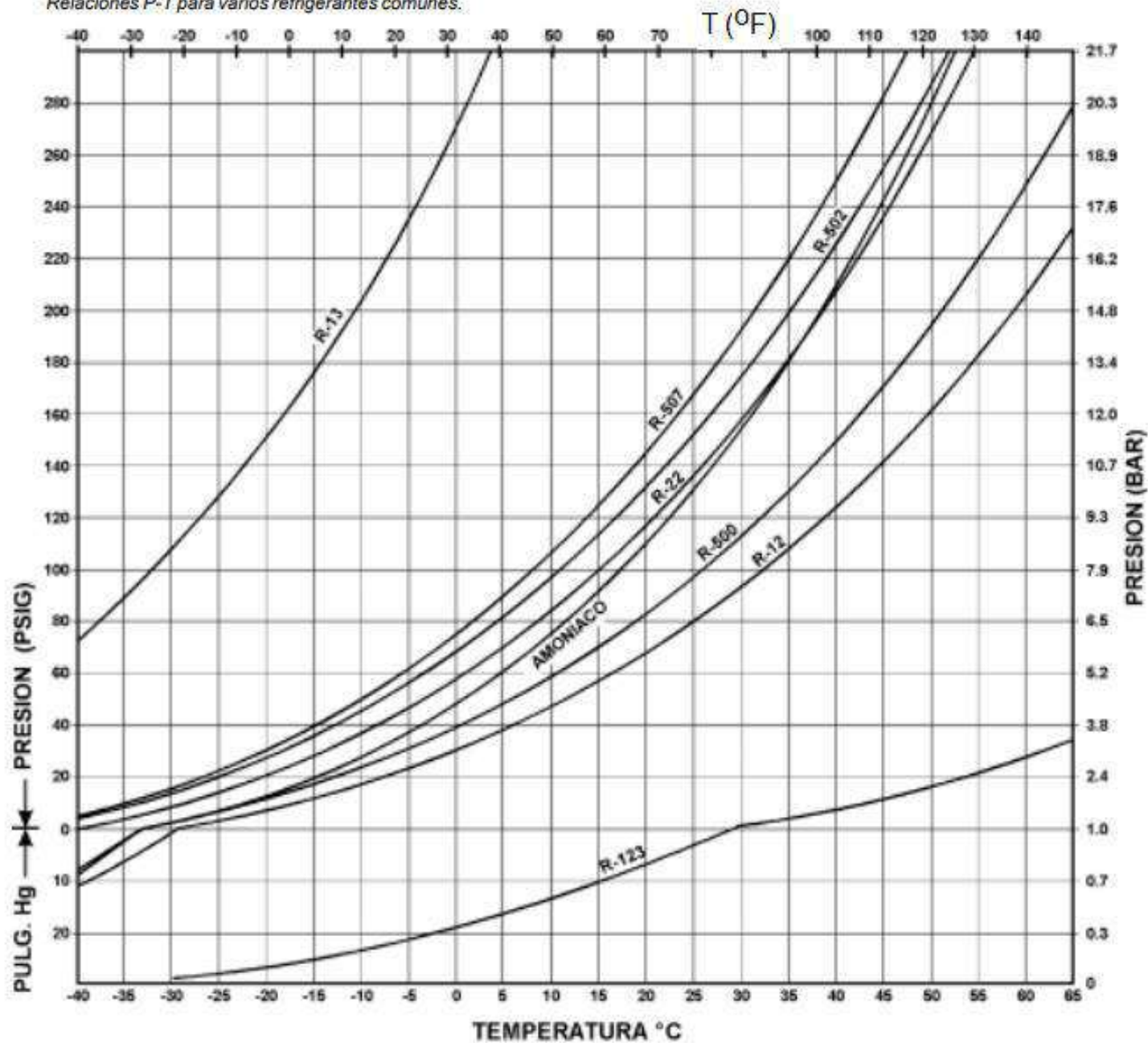
- ❖ Capacidad calorífica a $P=cte$

$$C_p = (\delta H / \delta T)_P$$

❖ El **Calor específico** de una sustancia es la cantidad de energía necesaria para aumentar a una unidad de masa (1 kg) 1 °C su temperatura.



Relaciones P-T para varios refrigerantes comunes.



- ▶ Para cuantificar la cantidad de calor recibido o emitido por una sustancia cuando se modifica su temperatura se utiliza la ecuación:

$$Q = m C_p (T_f - T_i)$$

Donde:

Q = Calor cedido o agregado (Kcal. ó BTU)

m = Cantidad de materia (Kg o lb)

C_p = Calor específico (Kcal/Kg°C o BTU/lb°F)

T_f = Temperatura final (°C o °F)

T_i = Temperatura inicial (°C o °F)

C_p agua = 1kcal/kg°C o 1 BTU/lb °F

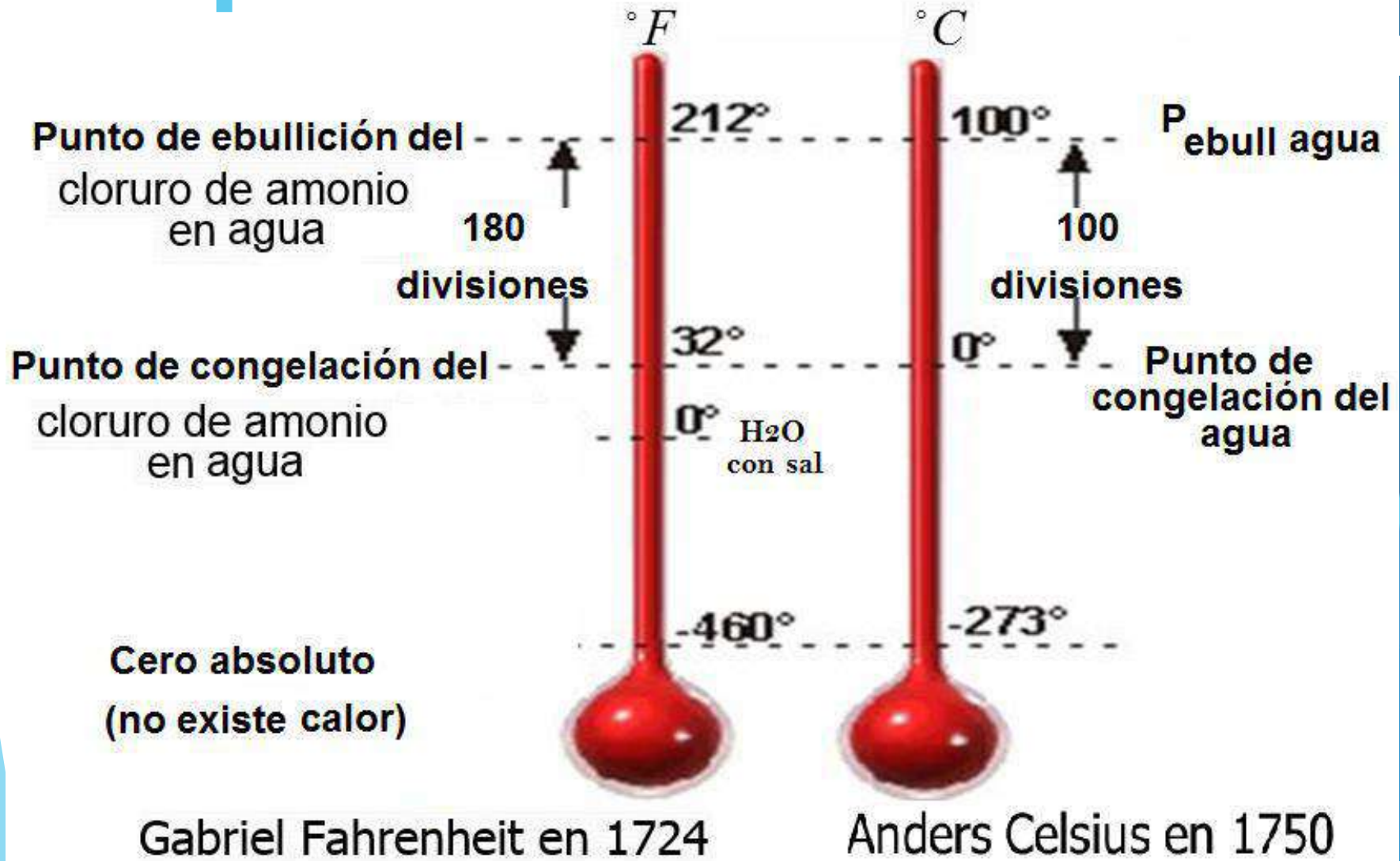


Conductividad térmica K

		K	ρ	Cp
	Material	W/mK	kg/m ³	J/kgK
1	Poliuretano	0,026	30	1400
2	Aire	0,026	1,223	1063
3	Poliestireno	0,035	50	1675
4	Espuma fenólica	0,038	30	1400
5	Lana de vidrio	0,041	200	656
6	Corcho comprimido	0,085	540	2000
7	Mortero de cemento	0,090	1920	669
8	Madera de construcción	0,130	630	1360
9	Madera de pino	0,148	640	2512
10	Madera pesada	0,200	700	1250
11	Concreto celular	0,220	600	880
12	Tierra con paja	0,300	400	900
13	Concreto celular	0,330	800	880
14	Yeso	0,488	1440	837
15	Mortero cemento/arena	0,530	1570	1000

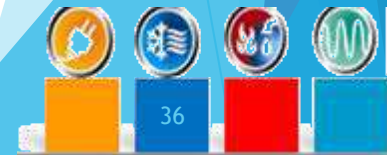


Temperatura



$$^{\circ}F = (^{\circ}C \times 1.8) + 32$$

$$^{\circ}C = \frac{^{\circ}F - 32}{1.8}$$



Temperatura y punto de ebullición



PRESIÓN

- ❖ **Presión.** La presión (P) ejercida sobre una superficie se define como la fuerza normal ejercida por unidad de área de la superficie.

$$P = \frac{F}{A} [=] \frac{mg}{A} \Rightarrow \frac{N}{m^2} [=] Pa$$

- Para fluidos, dado que la masa de un fluido está dada por:

$$m = Ah\rho$$

Entonces:

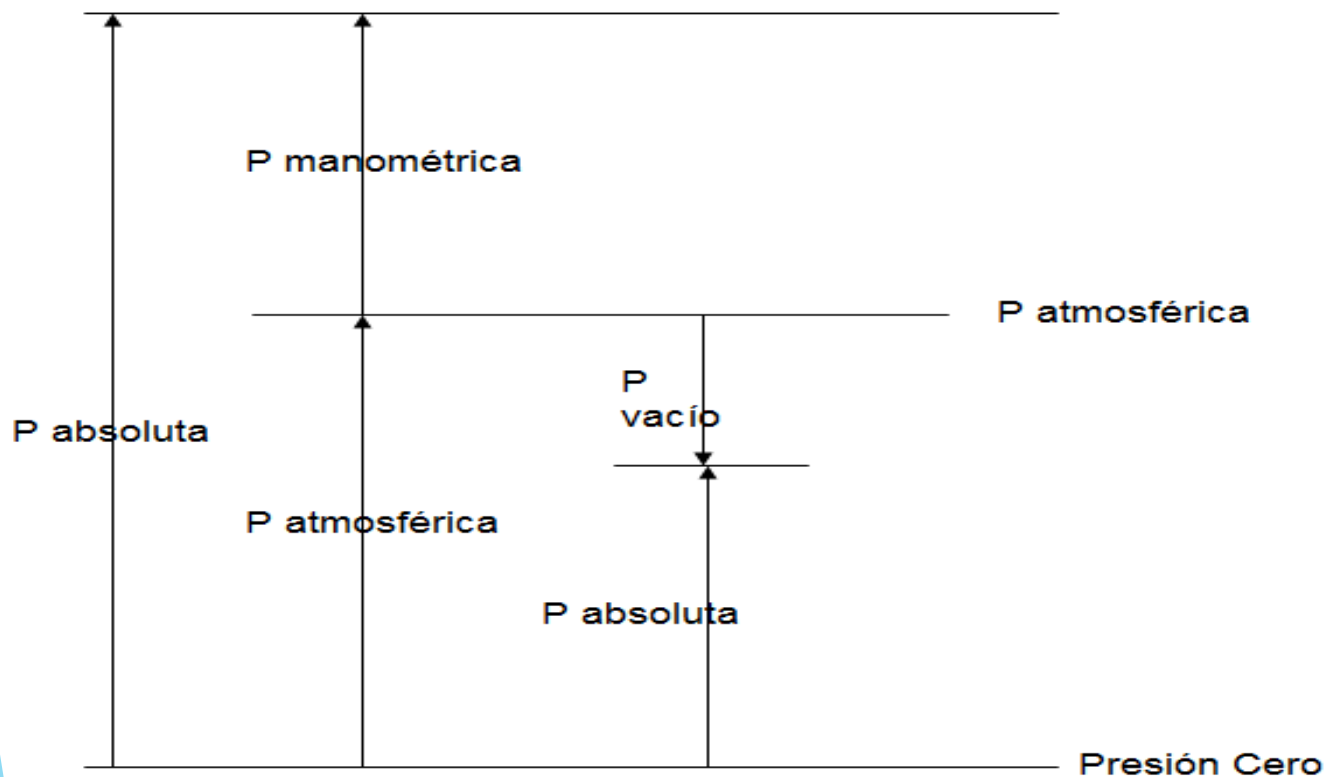
$$P = \frac{F}{A} [=] \frac{mg}{A} [=] \frac{A\rho hg}{A} [=] \rho hg$$



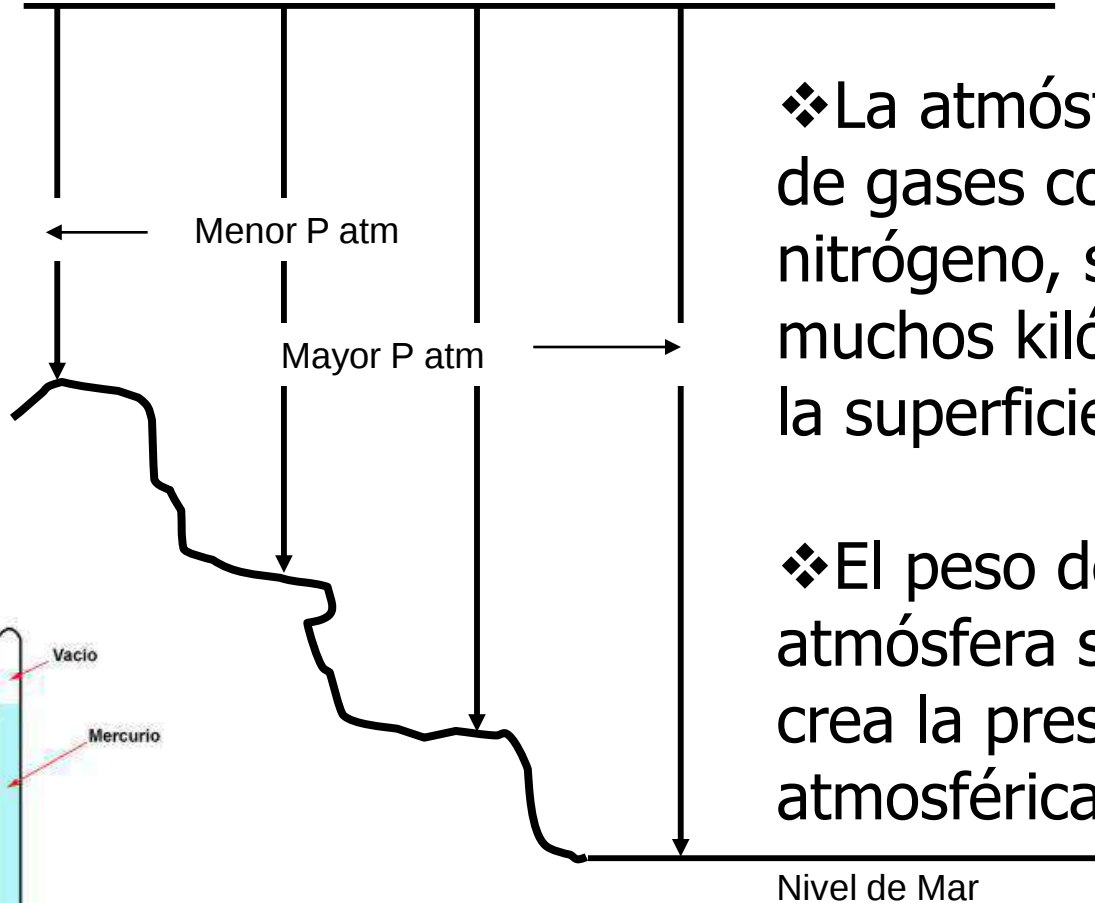
PRESIÓN ABSOLUTA

$$\diamond P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}}$$

$$\diamond P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}}$$

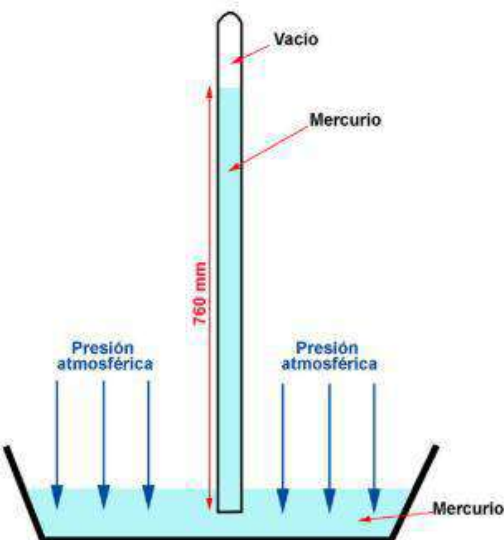


Atmósfera Superior



❖ La atmósfera compuesta de gases como oxígeno y nitrógeno, se extiende muchos kilómetros sobre la superficie.

❖ El peso de esta atmósfera sobre la tierra crea la presión atmosférica.



PRESIÓN MANOMÉTRICA



- ❖ Cuando la presión del equipo o del sistema es mayor que la presión atmosférica, se denomina presión manométrica.
- ❖ Un manómetro está calibrado para leer 0 Kgf/cm^2 (0 lbf/in^2) cuando está a presión atmosférica o no se encuentra conectado a algún recipiente con presión.

PRESIONES DE VACÍO

- ❖ Las presiones inferiores a 0 Kg /cm² (o en Psig) que se leen en los manómetros son realmente presiones de vacío.
- ❖ se expresa generalmente en micrones de mercurio:
$$760 \text{ mm Hg} = 760,000 \mu\text{m Hg}$$
- ❖ Siendo el rango típico para equipos de expansión directa de los 500 a 250 μm de mercurio.



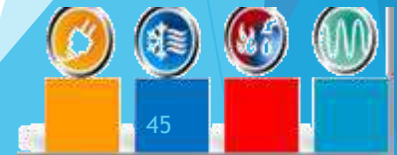
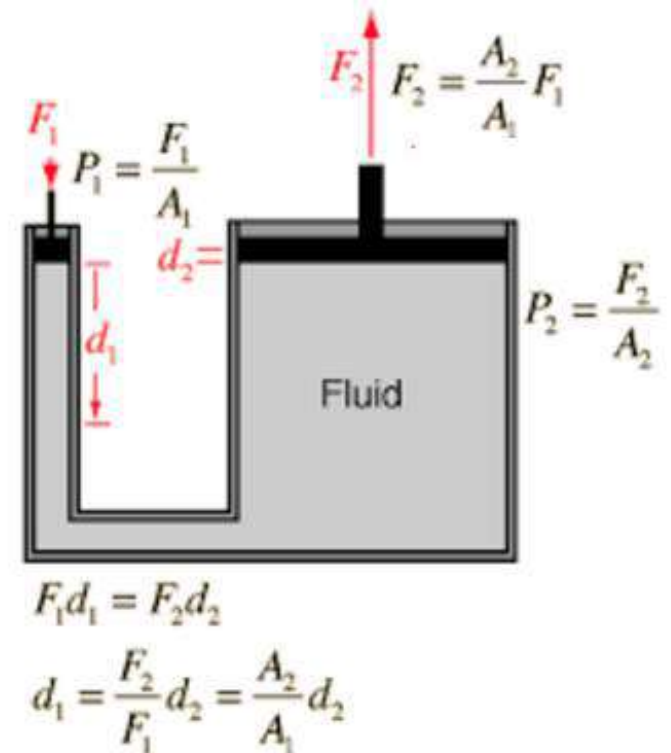
PRESIÓN DE VACÍO



Presión hidrostática

❖ La presión creada por los líquidos puede calcularse si se conoce la densidad y si se mantiene la misma relación de altura a presión sin importar el área de la columna vertical (como la presión es igual a fuerza entre área no es relevante la sección transversal).

$$P_h = \rho gh$$



La 1ª Primera Ley de la Termodinámica en su forma diferencial puede enunciarse como:

$$dQ = du + p dv + v dp + dE_k + dE_z + dW \quad (1)$$

Donde: dQ = Calor ganado o cedido por el fluido.

u = Energía interna.

p = Presión.

V = Volumen.

E_k = Energía específica.

E_z = Energía potencial.

W = trabajo realizado por el fluido o sobre el fluido.

$$\frac{p_1}{\rho} + Z_1 g + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + Z_2 g + \frac{V_2^2}{2}$$



Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \Sigma H_B - \Sigma H_{1-2} - \Sigma H_T = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

H_B = Energía suministrada al sistema por bombas

H_T = Energía que el sistema suministra a turbinas

H_{1-2} = Energía pérdida por fricción

$\frac{P_1}{\rho g}$ = Energía por la presión

Z = Energía potencial o geodésica

$\frac{V_1^2}{2g}$ = Energía cinética

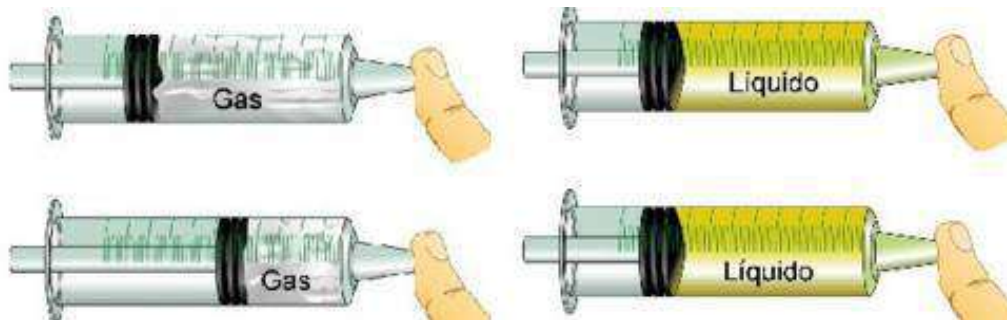
EQUIVALENCIAS

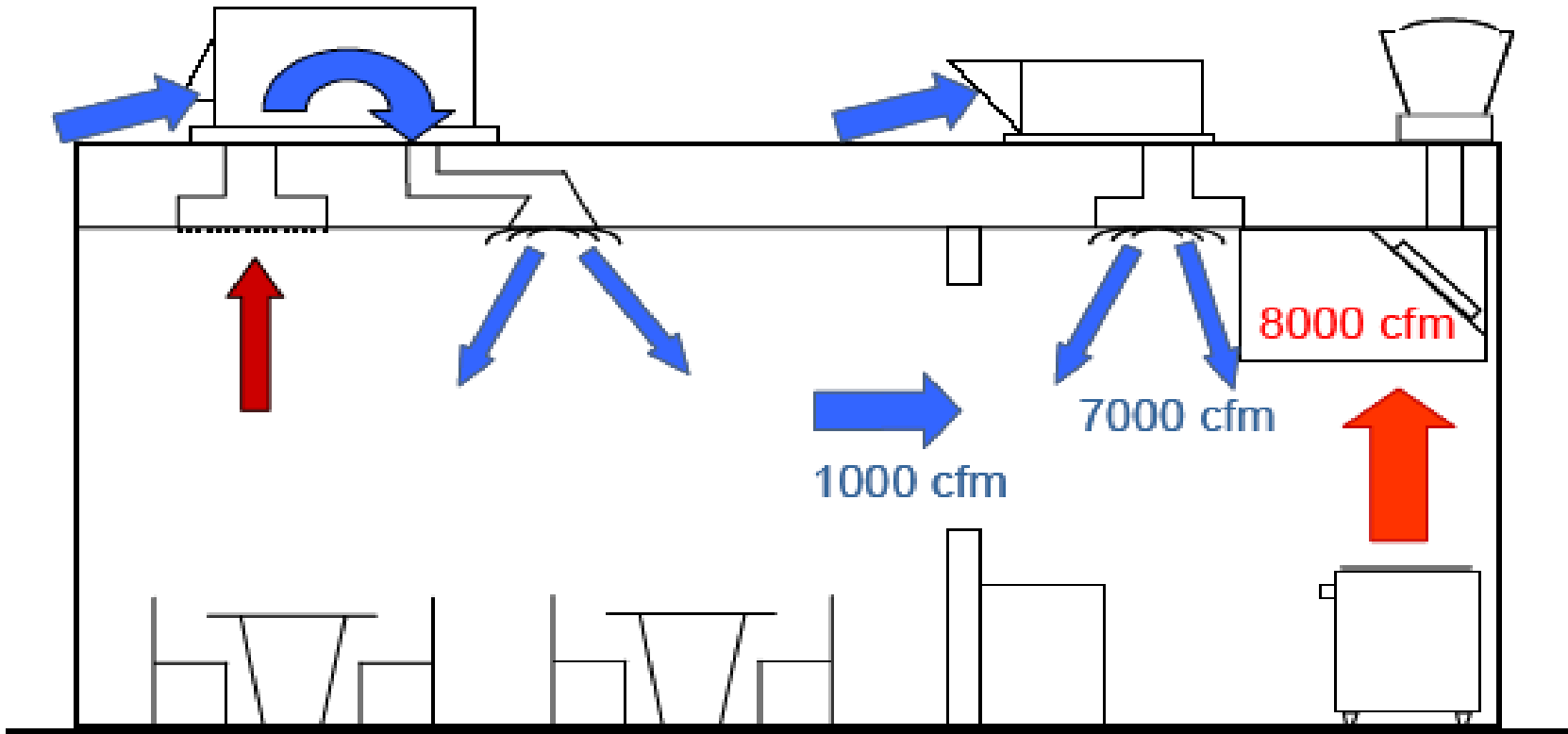
❖ Conversiones:

$$1 \text{ Atm} = 760 \text{ mmHg} = 101,325 \text{ Pa} = 1.013 \text{ Bar} = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb}_f/\text{in}^2$$

❖ Sistema inglés:

- Psig: Pounds per Square Inch Gauge.
- Psi: Pounds per Square Inch.
- Psia: Pounds per Square Inch Absolut.





Leyes de los gases $PV=nRT$



- ❖ **Ley de Avogadro:** Volúmenes iguales de diferentes gases, medidos en las mismas condiciones de presión y temperatura, contienen el mismo número de moléculas.
- ❖ **Ley de Boyle:** La presión ejercida por una fuerza física es inversamente proporcional al volumen de una masa gaseosa, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante
- ❖ **Ley de Charles:** A presión constante, el volumen de una masa determinada de gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta.
- ❖ **Ley de Gay-Lussac:** La presión de una cantidad fija de un gas a volumen constante es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

- ▶ $T = \text{cte} \rightarrow$ Ley de Boyles $(T_1 = T_2)$
- ▶ $P = \text{cte} \rightarrow$ Ley de Charles $(P_1 = P_2)$
- ▶ $V = \text{cte} \rightarrow$ Ley de Gay Lussac $(V_1 = V_2)$



Problemas:

- Determine la constante de gases ideales R en sistema internacional y sistema inglés, si se tiene una mol de un gas a 1atm, 0°C en un recipiente de 22.4 L

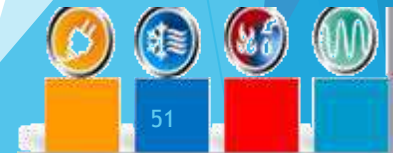
R= 0.082 L*atm/(mol*K), _____ ft³*psia/(lbmol*R)

- Determinar la Presión en sistema internacional y sistema inglés a un objeto que se encuentra a una profundidad de 2m en un recipiente con un fluido de densidad 1000kg/m³

R= 19.6 kPa, _____ psi

- Las presiones atmosféricas en la parte superior e inferior de un edificio se leen con un barómetro y son 96.0 y 98.0 KPa. Si la densidad del aire es de 1.2 Kg/m³, calcular la altura del edificio en m y en ft.

R= _____ m, _____ ft



Problemas:

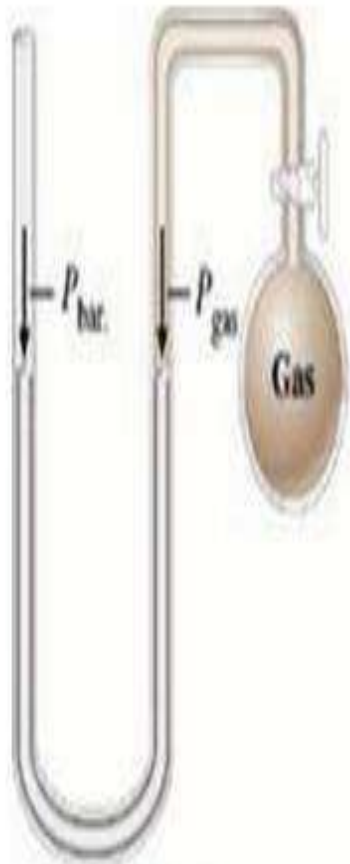
1 – Que diámetro comercial recomienda para un tubo que debe manejar 280 galones/min a una velocidad de 11 ft/s; si fluye agua con una densidad de 1g/mL
R=3.22 in

2 – Se va a conducir 230 gal/min de un líquido que tiene una gravedad específica de 0.95 y una velocidad de 10.75 ft/s. ¿Que diámetro recomienda en cm y in?
R= 7.5cm y 3 in respectivamente

3.- Una esfera de plomo tiene una masa de $1.20 \cdot 10^4$ g y su volumen es de $1.05 \cdot 10^3$ cm³ Calcular la densidad del plomo en kg/m³.
R= 11,428.57 kg/m³

4- La densidad del mercurio es de 13.6 g/mL ¿Cuántos g caben en 95.8 mL?
R= 1,302.88g

5- Por una tubería de 4 pulgadas de diámetro circula un gas a 2 kgf /cm² man de presión a 30° C de Temperatura y una velocidad de 3 m/s; el gas se hace pasar por un compresor y se descarga en una tubería de 1.5 pulgadas de diámetro interior, donde la presión del gas es de 50 lb_f/ in² man y la temperatura es de 40°C. ¿Cuál será la nueva velocidad del gas?
R=14.7 m/s



$$P_{\text{gas}} = P_{\text{bar.}}$$

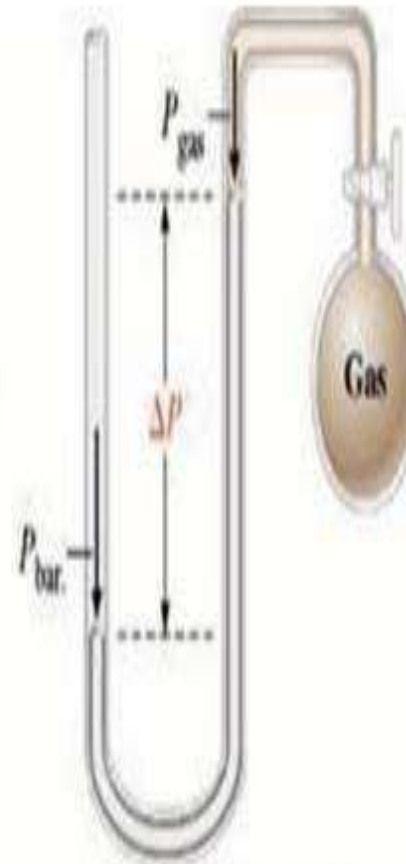
(a) Presión del gas igual a presión barométrica



$$P_{\text{gas}} = P_{\text{bar.}} + \Delta P$$

$(\Delta P > 0)$

(b) Presión del gas mayor que presión barométrica



$$P_{\text{gas}} = P_{\text{bar.}} + \Delta P$$

$(\Delta P < 0)$

(c) Presión del gas menor que presión barométrica



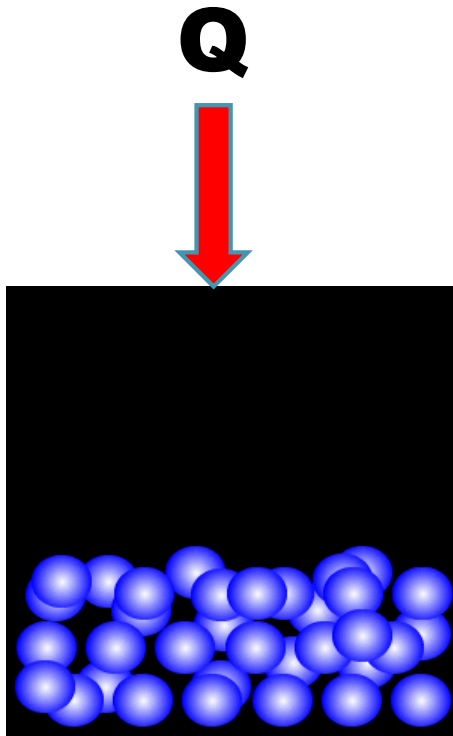
CALOR...



- ❖ Sabemos por experiencia que un objeto caliente que se pone en contacto con otro objeto frío tiende a enfriarse, al mismo tiempo que este último se calienta.
- ❖ Una visión razonable es que algo se transfiere del objeto caliente al frío, y a ese algo le llamamos calor (Q).
- ❖ El calor siempre fluye de una temperatura más alta a una más baja, lo cual lleva al concepto de la temperatura como la *fuerza impulsora* de la transferencia de energía como calor.
- ❖ Con más precisión, la rapidez de transferencia de calor de un cuerpo a otro es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos.
- ❖ Cuando no existe diferencia de temperatura, no hay transferencia neta de calor.



CALOR

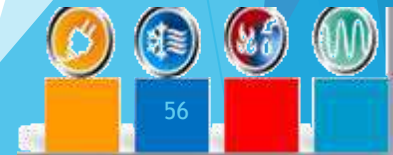


- ❖ Termodinámicamente, el calor **NUNCA** se almacena en un cuerpo, al igual que el trabajo, solamente existe como energía en tránsito entre un sistema y sus alrededores.
- ❖ Cuando se agrega energía en forma de calor a un cuerpo, se almacena no como calor, sino como energías cinética, de traslación y de rotación de los átomos y moléculas que constituyen el sistema.

Unidades de Calor



- ❖ **Joule (J)**, Sistema Internacional: se define como el trabajo mecánico realizado por la fuerza de 1 N que actúa a través de una distancia de 1 m, esto es: $1 J = 1 N m$
- ❖ **Caloría:** es la cantidad de calor necesaria para incrementar en un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua.
- ❖ **Kilocaloría:** equivale a 1,000 calorías y que puede ser definida como la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado centígrado un kilogramo de agua.
- ❖ **BTU:** en el sistema inglés la unidad de calor es la British Thermal Unit, comúnmente llamada como BTU, que se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit.



Calor... Tonelada De Refrigeración



- ❖ Es una unidad de capacidad de enfriamiento ampliamente utilizada en el aire acondicionado y la refrigeración.
- ❖ Una tonelada de refrigeración representa la capacidad de enfriamiento producido cuando 2000 libras de hielo se funden en 24 horas.
- ❖ El hielo se supone sólido a 32 °F (0°C) inicialmente, y finaliza en agua a 32°F (0°C).
- ❖ La energía absorbida por el hielo en ese período de tiempo es el calor latente de hielo.
- ❖ Se define como 12000 BTU/hr. ó 3023 Kcal/hr.



Equivalencias

$$1 \text{ KJ} = 0.239 \text{ kcal} = 0.948 \text{ BTU}$$

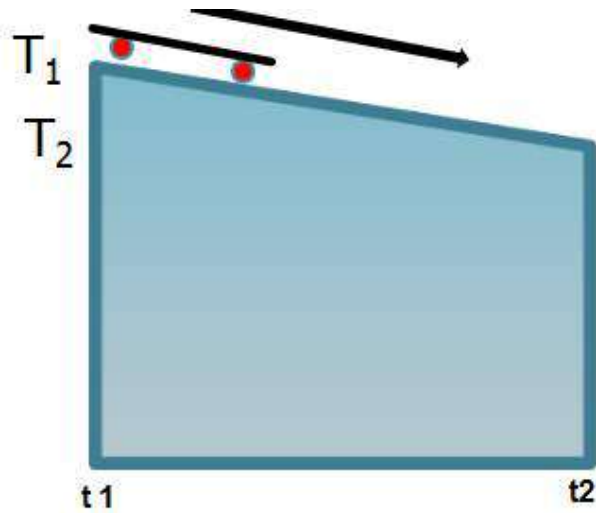
$$1 \text{ Cal} = 0.004 \text{ KJ} = 0.004 \text{ BTU}$$

$$1 \text{ BTU} = 1.055 \text{ KJ} = 0.252 \text{ kcal}$$

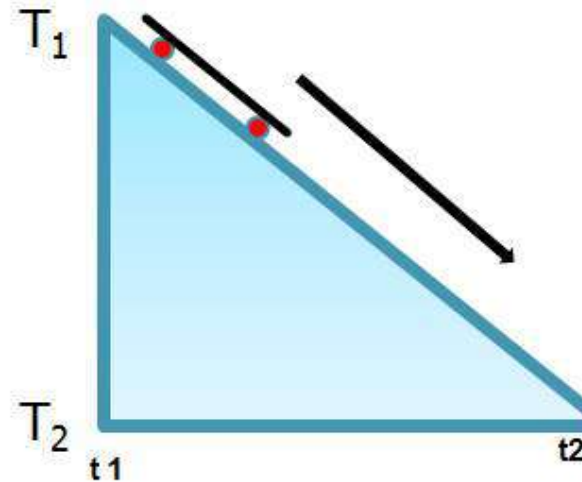


Calor ... Transferencia de calor

A mayor diferencia de temperatura, mayor velocidad de transferencia de calor



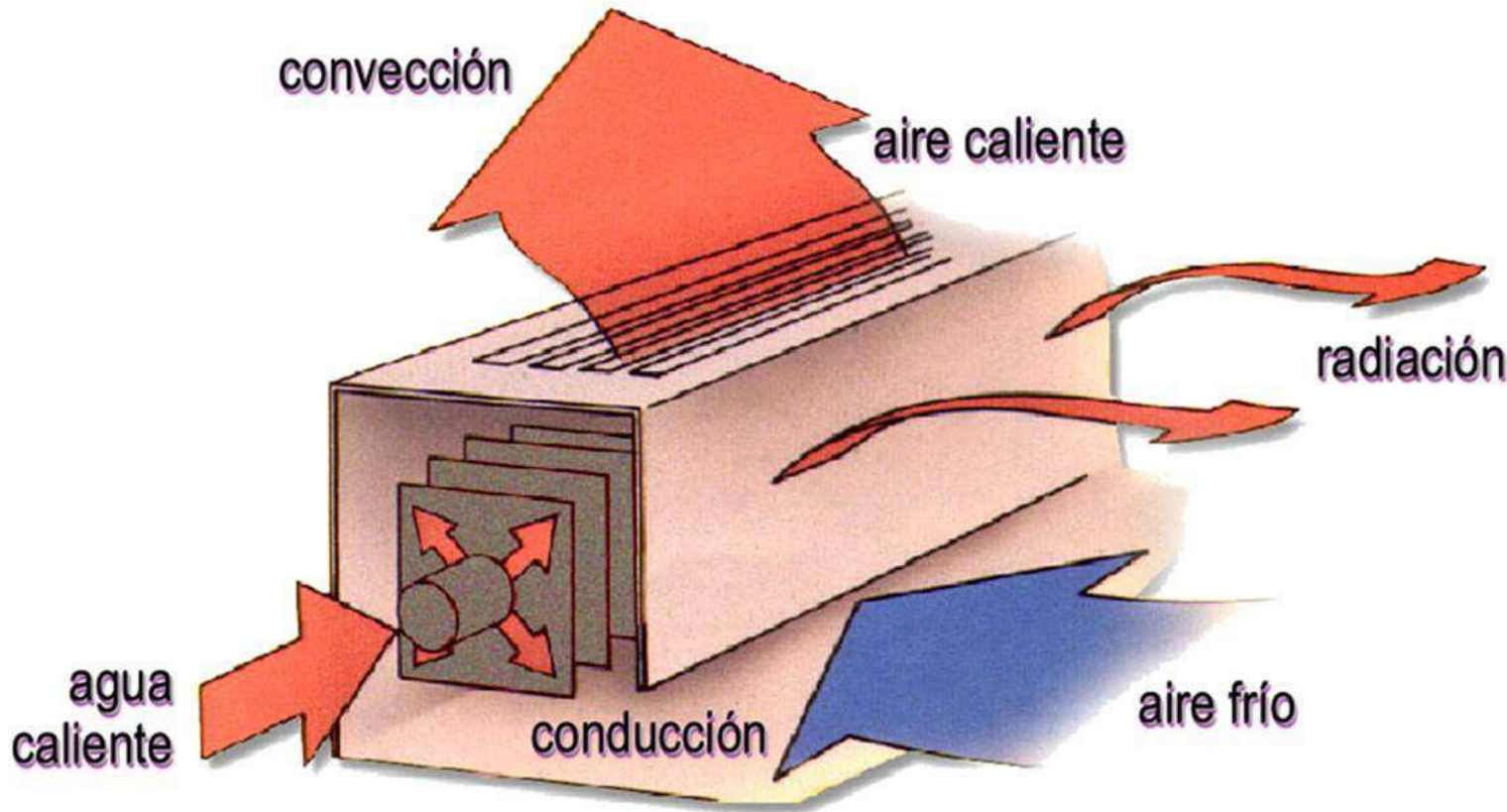
$$T_1 > T_2$$



$$T_1 \gg T_2$$

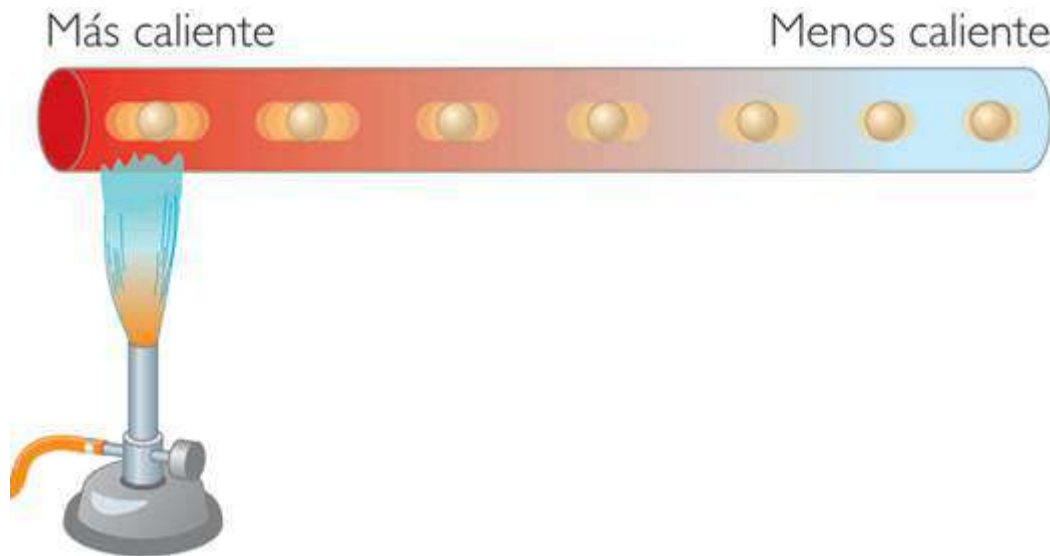


Mecanismos de transferencia de calor en un equipo de aire acondicionado zoco radiante



Mecanismos de Transferencia de calor...

- ❖ **Conducción:** es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y que tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo y entre diferentes cuerpos en contacto.

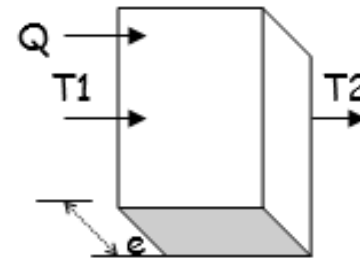


$$q = Q/A = -k dT/dl$$

Mecanismos de Transferencia de calor...

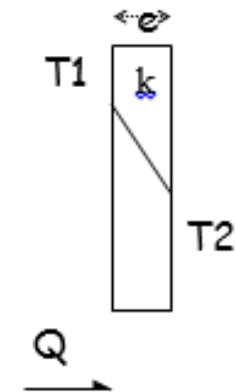
Condiciones para que se lleve a cabo una transf de calor por conducción.

- $T_1 > T_2$
- No hay acumulación de calor
- $dQ \propto A (-dT/de)$ - el incremento de temp es contraria al fujo de calor
- $dQ = -k A dT/de$ k conductividad térmica



La conductividad térmica es una propiedad física característica de cada material, y en base a su magnitud, podemos calificar a un material de bueno o mal conductor de calor.

Para intervalos de T muy amplios, k varia linealmente con la T



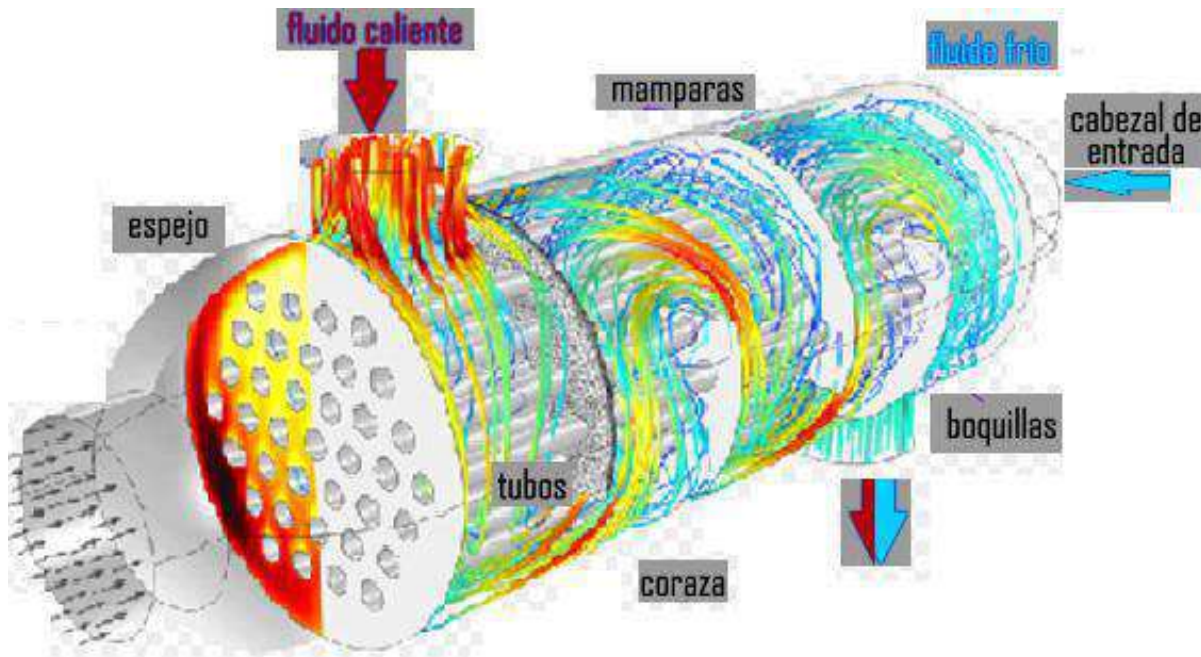
$$Q = -k A dT/dl = kA \Delta t/L$$

$$q = Q/A = -k dT/dl$$



Mecanismos de Transferencia de calor...

- ❖ **Convección:** Se produce a través del desplazamiento de partículas entre regiones con diferentes temperaturas. Se produce únicamente en materiales *fluidos*. Éstos al calentarse disminuyen su densidad y ascienden al ser desplazados por las porciones superiores que se encuentran a menor temperatura.



$$Q = h A \Delta T$$

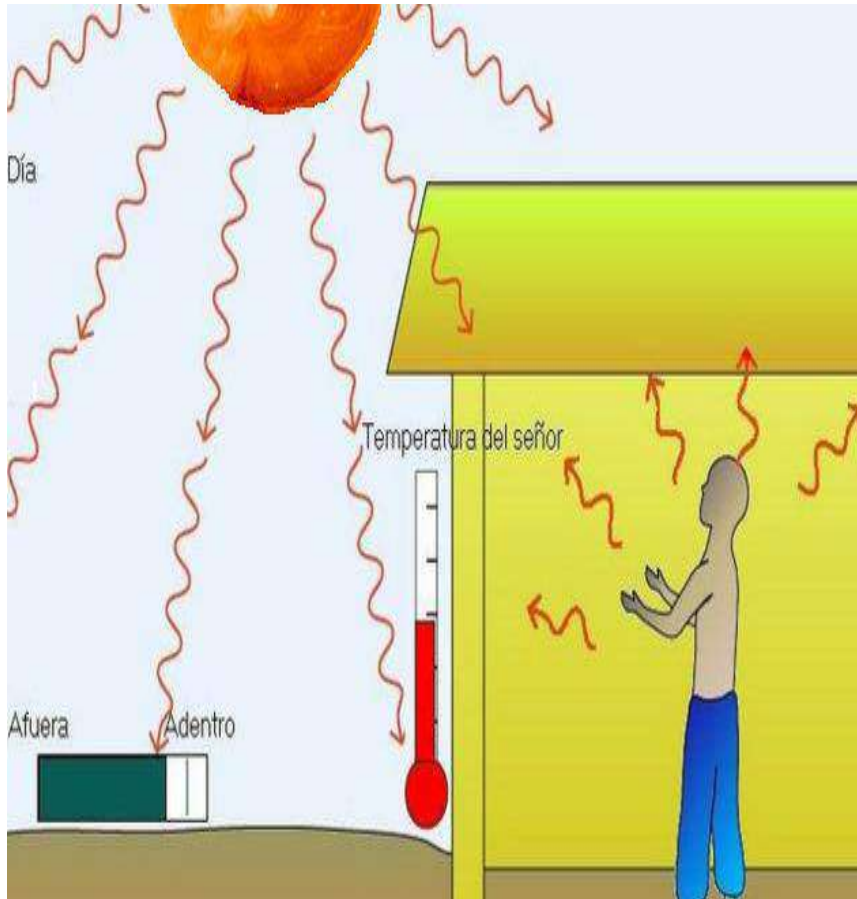
Mecanismos de Transferencia de calor...

$$dQ = h A (dT)$$

donde: h = coef. Individual de conductividad termica o coeficiente de pelicula (facilidad que tienen los fluidos para transmitir el Q).



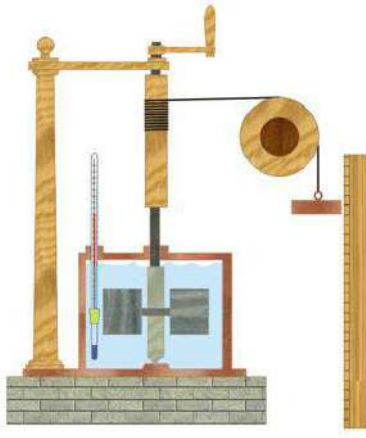
Mecanismos de Transferencia de calor



- ❖ **Radiación:** Es la transmisión de calor por ondas similares a las de la luz y a las ondas del radio; un ejemplo de radiación es la transmisión de energía solar hacia la tierra, ocurre a cualquier temperatura superior al cero absoluto.

$$dQ = \sigma \varepsilon dA T^4$$

Trabajo... EXPERIMENTOS DE JOULE



- ❖ Joule colocó en recipientes aislados cantidades conocidas de agua, aceite y mercurio, y después mezcló el fluido con un agitador mecánico.
- ❖ La cantidad de trabajo hecha sobre el fluido con el agitador fue medida con precisión y se anotó cuidadosamente el cambio de temperatura del fluido.
- ❖ Joule encontró que para cada fluido se requiere una cantidad fija de trabajo por unidad de masa, por cada grado de aumento en la temperatura causado por el agitador, y que la temperatura original del fluido se puede restituir por la transferencia de calor a través del simple contacto con un objeto más frío.
- ❖ De esta manera **demostró que existe una relación cualitativa ente el trabajo y el calor** y que, por lo tanto, el calor es una forma de energía.



TRABAJO

- ❖ Por definición:

$$dW = Fdl$$

- ❖ Para un sistema cilindro-pistón:

$$dW = -PA d\frac{V}{A}$$

- ❖ Dado que A es constante:

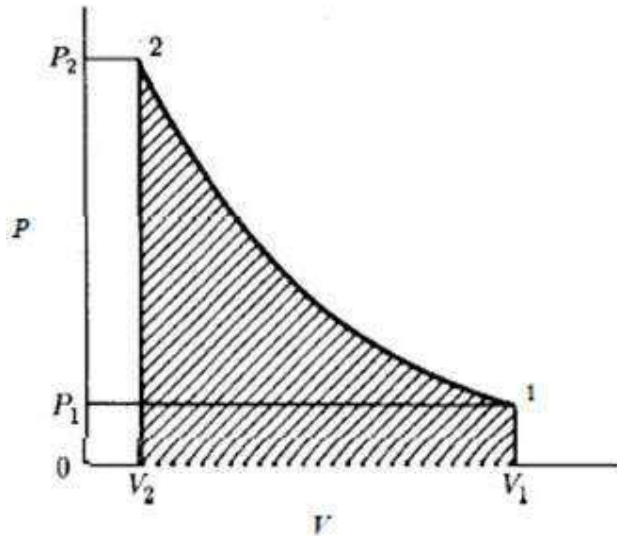
$$dW = -PdV$$

- ▶ Integrando:

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (1)$$



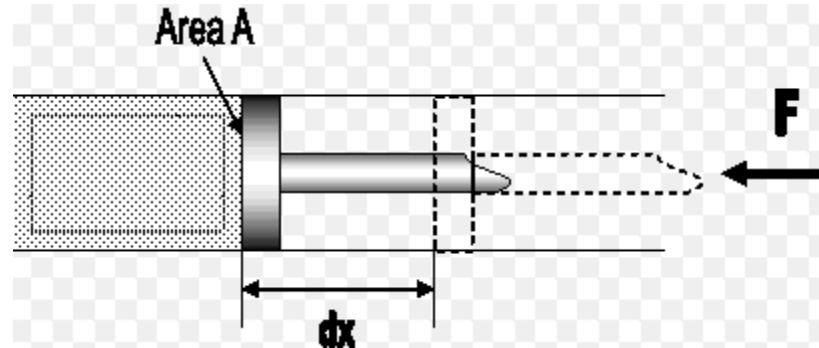
TRABAJO



- ❖ Esta ecuación expresa el trabajo hecho por un proceso de compresión o de expansión finita.
 - ❖ La figura muestra una trayectoria para la compresión de un gas del **Punto 1** V_1 a P_1 al **punto 2** con V_2 a P_2 .
 - ❖ Esta trayectoria relaciona la presión en cualquier punto del proceso con el volumen.
- ❖ El trabajo requerido está dado por la Ec. (1) y es proporcional al área bajo la curva.



TRABAJO...



- ❖ Su unidad en el sistema internacional es el Joule (J).
- ❖ En el sistema inglés se utiliza con frecuencia el ft-lb_f , esta unidad de medida nace de los legendarios trabajos realizados por James P. Joule durante la década de 1840 y se conoce como el **equivalente mecánico del calor**.
- ❖ Conversiones:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ J} &= 0.7376 \text{ ft lb}_f \\
 1 \text{ BTU} &= 778.17 \text{ ft lb}_f \\
 1 \text{ BTU} &= 1.055 \text{ kJ} \\
 1 \text{ BTU} &= 0.252 \text{ kcal} \\
 1 \text{ kcal} &= 4.187 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$



ENERGÍA INTERNA

- ❖ En experimentos como los realizados por Joule, la energía que se agrega a un fluido en forma de trabajo se transfiere posteriormente desde el fluido como calor.
- ❖ ¿Dónde se encuentra esta energía entre su adición al fluido y la transferencia desde el mismo?
- ❖ Pensando de modo lógico se diría que está contenido en el fluido, pero en otra forma llamada energía interna.
- ❖ **La energía interna de una sustancia se refiere a la energía cinética de traslación, de rotación y vibración de las moléculas de la sustancia.**

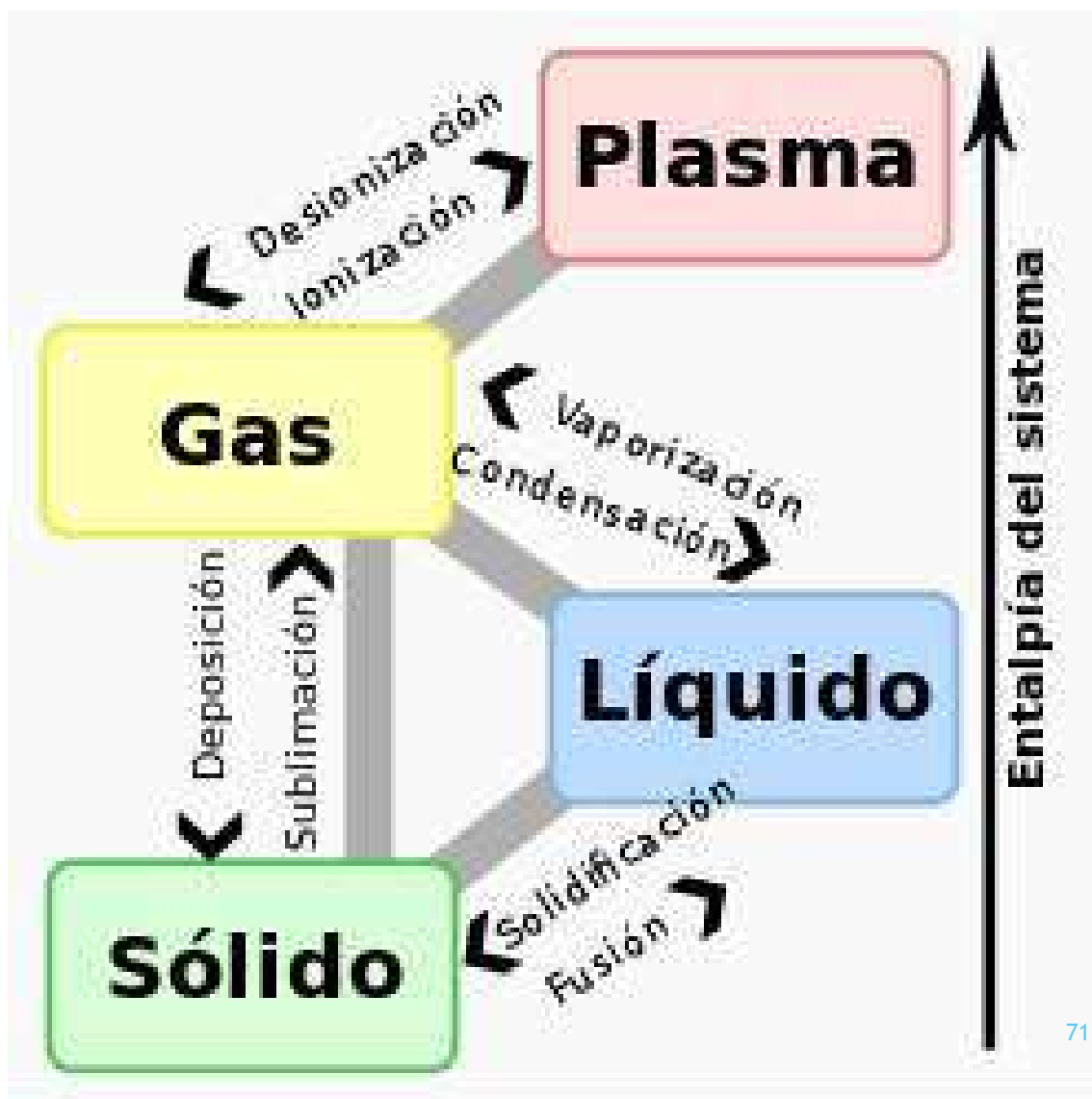
Primer principio de la Termodinámica

$W_{\text{ext}} = -P(V_2 - V_1)$
 $Q = mc(T_3 - T_2)$

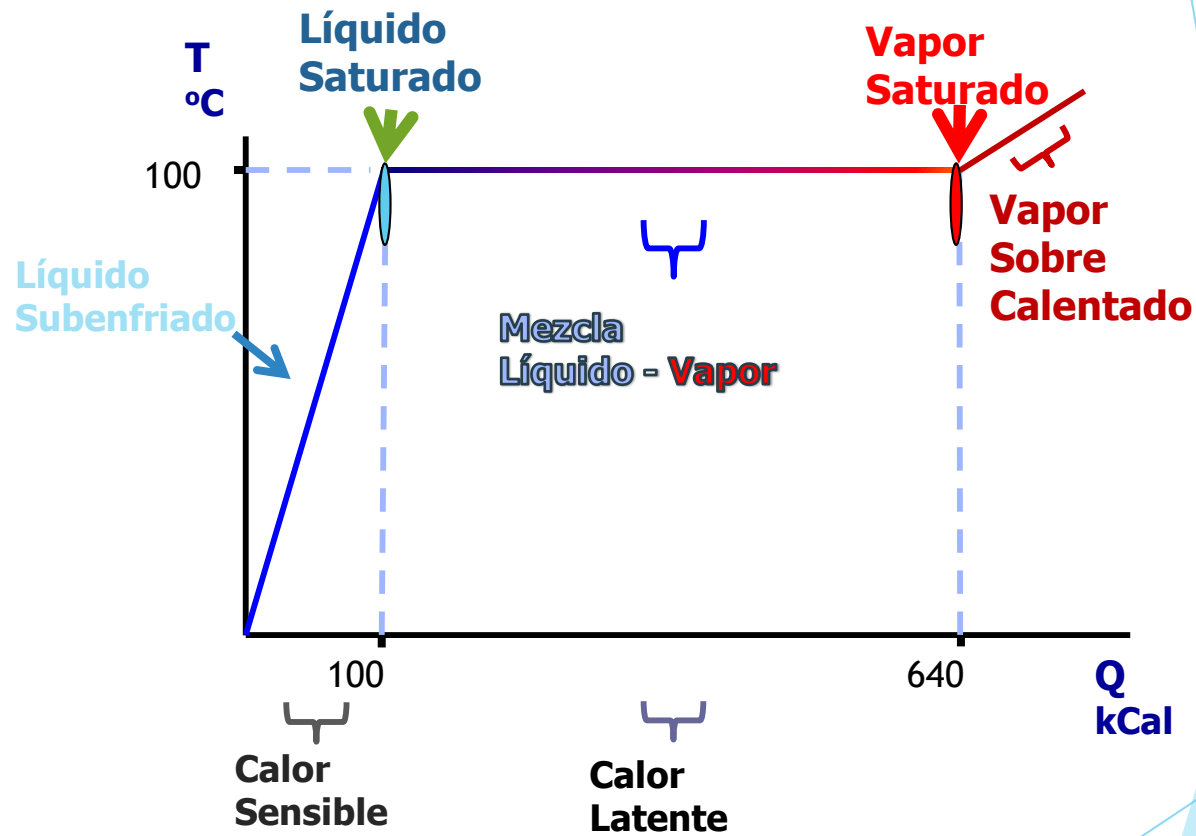
$U_{\text{final}} - U_{\text{inicial}} = \Delta U = Q + W_{\text{ext}}$

Un sistema *sólo* tiene energía interna: Un sistema no contiene calor o trabajo. Estos sólo existen durante un *cambio* del sistema

Estado de agregación ...

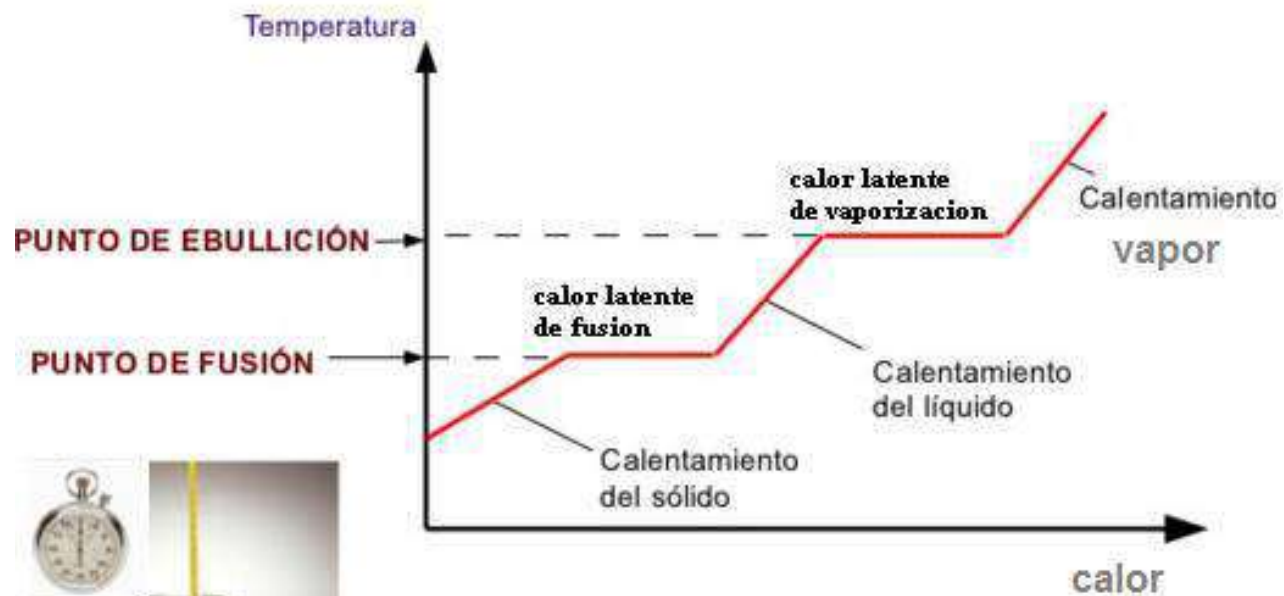


Para 1 Kg de agua que se encuentra a 1 Atm de presión



CAMBIO DE ESTADO

GRÁFICA DE CAMBIO DE ESTADO



CALOR SENSIBLE



- ❖ Se define como el calor que provoca un cambio de temperatura en una sustancia sin cambiar su estado.
- ❖ Como su nombre lo indica, es el calor que puede percibirse por medio de los sentidos.



CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN



- ❖ Para cambiar una sustancia de líquido a vapor se requiere calor latente de evaporación, que aunque no provoca un cambio de temperatura, sí provoca un cambio de fase.
- ❖ Para el proceso contrario (condensación), el calor latente de condensación tiene exactamente el mismo valor que el calor latente de vaporización.



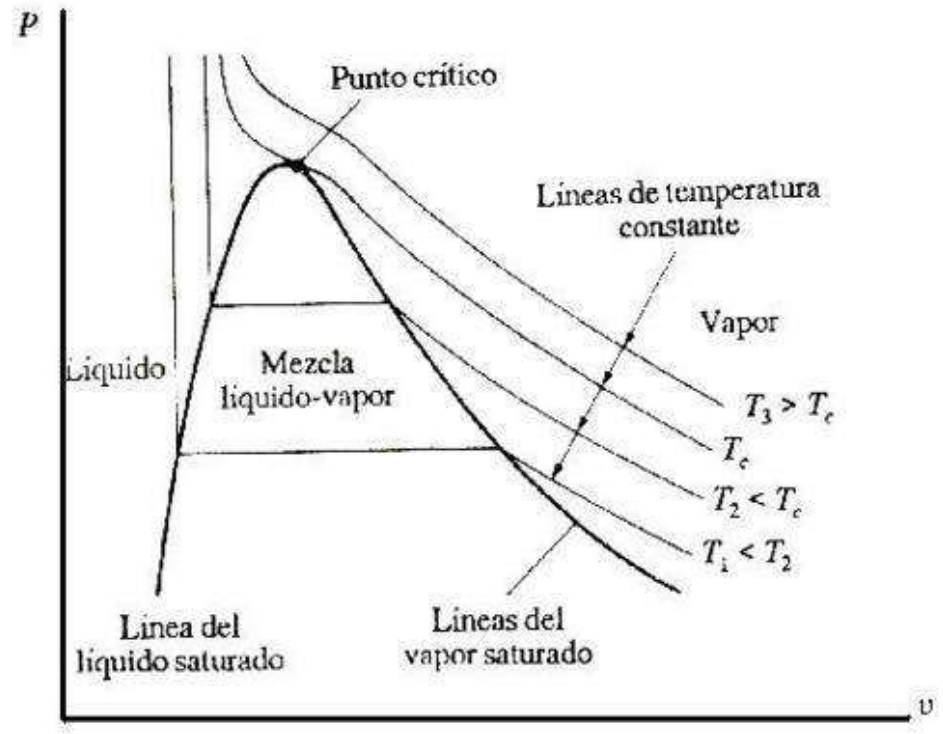
RELACIÓN PRESIÓN-TEMPERATURA

- ❖ Temperatura de ebullición del agua a nivel del mar:
 - $P = 1 \text{ Atm}$ $T_E = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.
- ❖ Temperatura de ebullición del agua a nivel de la Cd. de México:
 - $P = 0.77 \text{ Atm}$ $T_E = 92 \text{ }^\circ\text{C}$.
- ❖ Como se puede observar la temperatura de ebullición del agua depende directamente de la presión atmosférica:
 - A menor presión, menor temperatura de ebullición.
 - A mayor presión, mayor temperatura de ebullición.
- ❖ La relación también es inversa, esto es, a temperatura constante el agua solo hervirá cuando se alcance la presión de saturación correspondiente a esa temperatura.



RELACIÓN PRESIÓN-volumen específico...

- **Saturación:** Es la condición de temperatura y presión en la cual el líquido y el vapor pueden existir simultáneamente.
- **Líquido Saturado:** Es un líquido a punto de evaporarse.
- **Vapor Saturado:** Es un vapor que se encuentra a su temperatura de saturación.
- **Líquido Subenfriado:** Todo líquido que se encuentre por debajo de su temperatura de saturación.
- **Vapor Sobrecalentado:** Vapor a una temperatura superior a su temperatura de saturación.



RELACIÓN TEMPERATURA- VOLUMEN ESPECIFICO

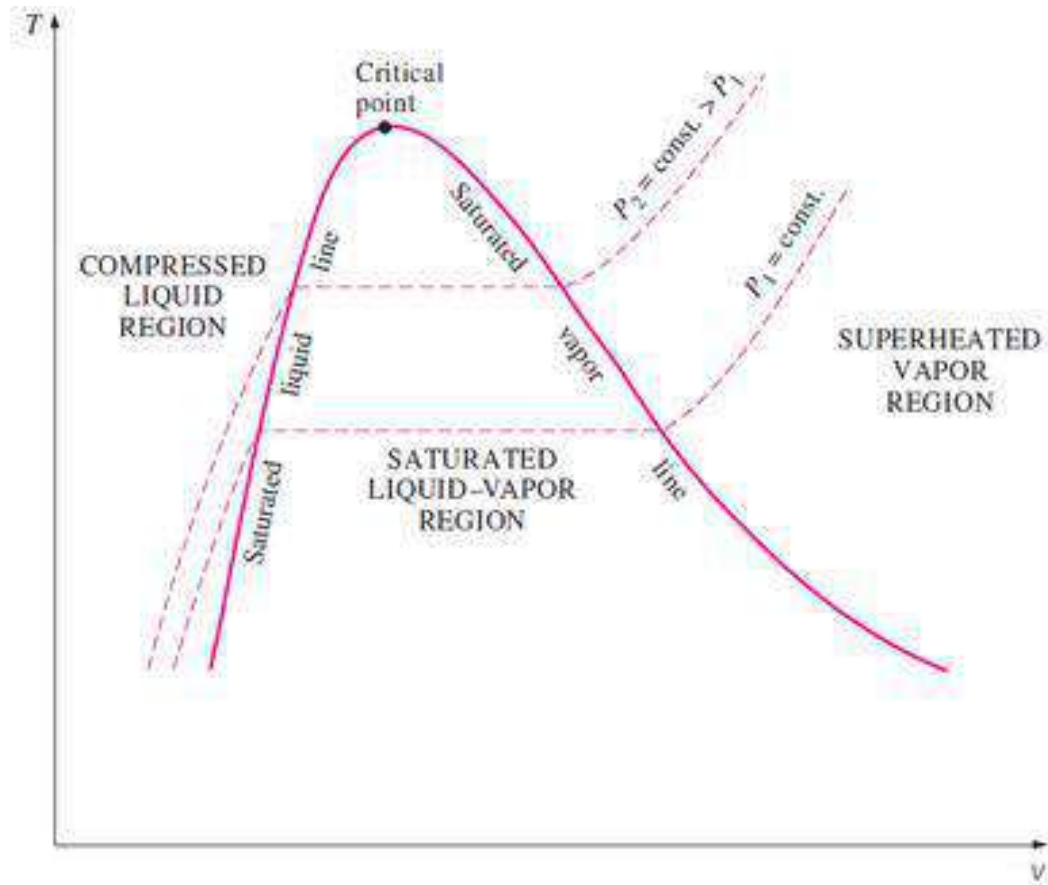
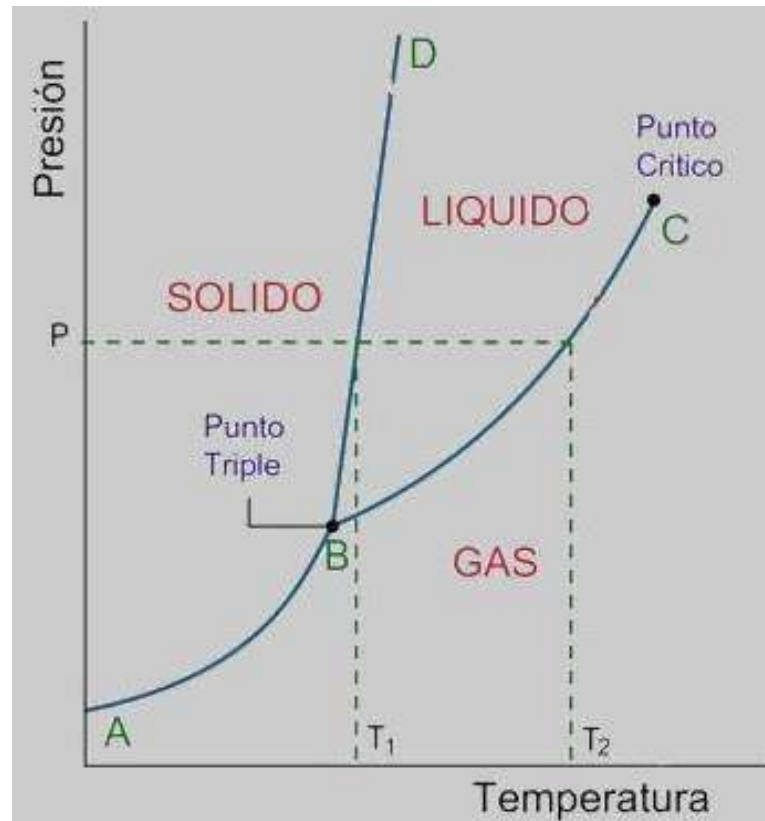
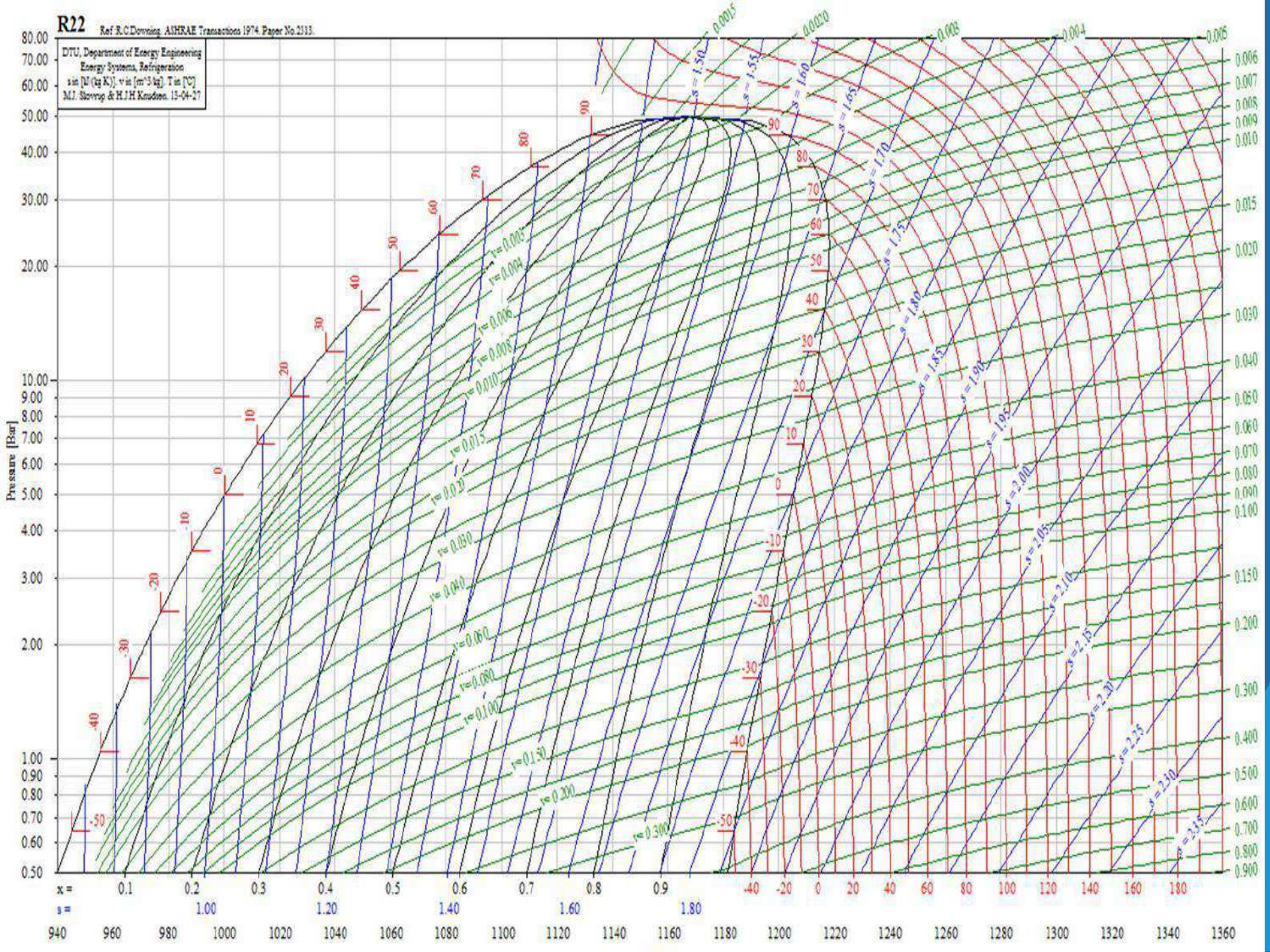


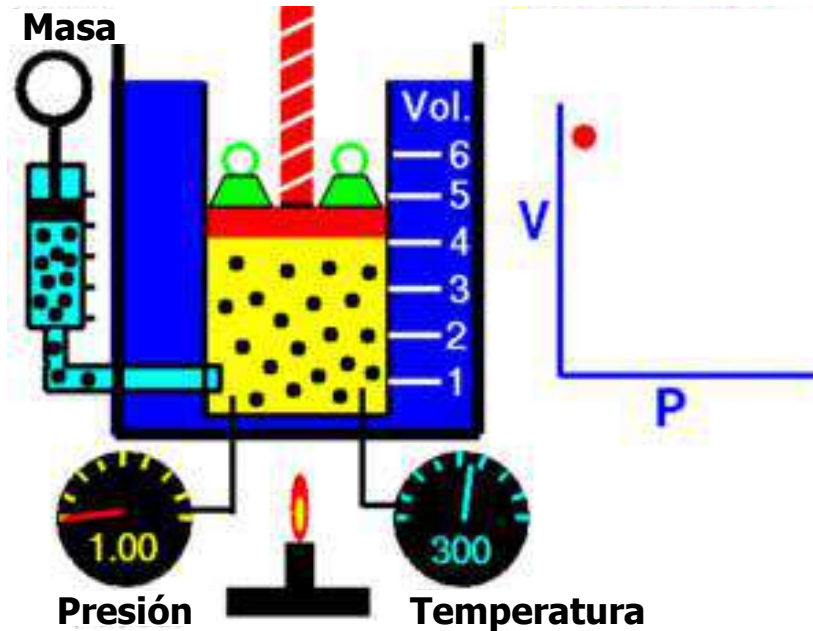
DIAGRAMA DE FASES P vs T



DTU, Department of Energy Engineering
Energy Systems, Refrigeration
s in [J/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M1: Skovrup & H.J.H Knudsen, 13-04-27



Proceso Reversible



- ❖ No existe fricción.
- ❖ El proceso es adiabático.
- ❖ Sus cambios son infinitesimales.
- ❖ Recorre una sucesión de estados de equilibrio.
- ❖ Se puede invertir en cualquier punto mediante un cambio diferencial en las condiciones externas.
- ❖ Cuando se invierte restaura el estado inicial del sistema y de sus alrededores.



Procesos Irreversibles

- ❖ Los factores que causan la irreversibilidad de un proceso se llaman irreversibilidades. Entre ellas están:
 - La fricción.
 - La expansión libre.
 - La transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperaturas.
 - La resistencia eléctrica.
 - La deformación inelástica de los sólidos.
- ❖ La presencia de cualquiera de estos efectos produce un proceso irreversible.
- ❖ Considere refresco frío que se deja en una habitación caliente. El calor fluirá de desde el aire más caliente de la habitación al refresco más frío.



Procesos Irreversibles



- ❖ Proceso que puede invertirse es a través de la refrigeración.
- ❖ Al final del proceso inverso, el refresco regresará a su estado inicial pero los alrededores no.
- ❖ U de los alrededores aumentará en una cantidad igual en magnitud al trabajo suministrado por el refrigerador.
- ❖ El regreso de los alrededores a su estado inicial solo puede efectuarse si este exceso de energía interna se convierte completamente en trabajo, lo cual viola la segunda ley de la termodinámica.

DIFERENCIA DE Q Y W

Entropía S...

- ❖ En un balance de energía, tanto el trabajo como el calor se incluyen como simples términos aditivos, implicando que una unidad de calor, 1 J, equivale a la misma unidad de trabajo.
- ❖ Aunque esto es válido para el balance de energía, la experiencia muestra que hay **diferencias entre calor y trabajo** en cuanto a **la calidad**.
- ❖ El trabajo se transforma rápidamente en otras formas de energía:
 en energía potencial mediante la elevación de un peso,
 en energía cinética por la aceleración de una masa.
- ❖ Estos procesos pueden realizarse con un rendimiento de conversión cercano al 100% cuando se elimina la fricción, proceso disipativo que transforma el trabajo en calor.
- ❖ De hecho el trabajo se transforma por completo en calor, como lo demostraron los experimentos de Joule.



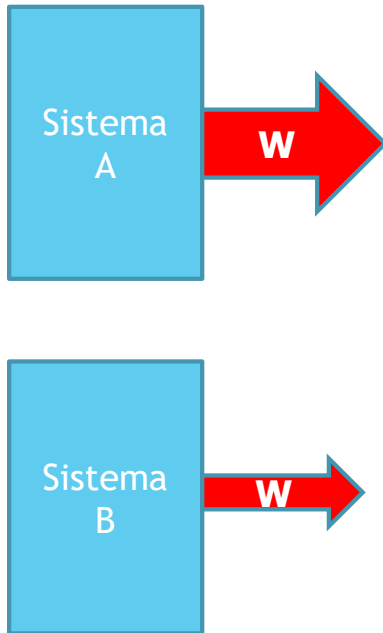
Entropía



- ❖ La primera ley de la termodinámica tampoco puede explicar ciertos fenómenos físicos observados:
 - el calor no puede fluir espontáneamente desde una región de baja hacia otra de alta temperatura,
 - una pelota que cae al suelo finalmente dejará de botar,
 - un resorte que se encuentre vibrando alcanzará el reposo por sí mismo en algún momento.
- ❖ Como resultado de las investigaciones se acepta hoy en día otra gran verdad científica:
 - En un sistema aislado, la calidad de la energía definida en relación a la habilidad para desarrollar trabajo, no se puede conservar. Lo anterior recibe el nombre de **"Principio de la Degradación de la Energía"**.



TRABAJO DISPONIBLE O ENERGIA DISPONIBLE ... S

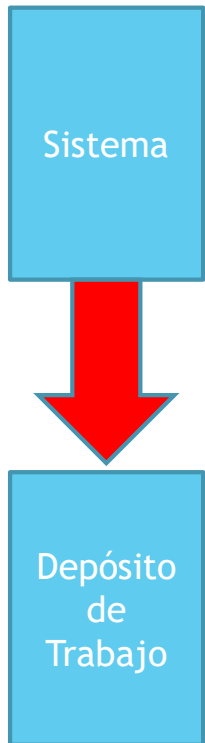


- ❖ Dado que la energía se ha definido como la capacidad para desarrollar trabajo, es razonable definir la calidad de la energía en función de su potencial para desarrollar trabajo.
- ❖ Podemos entonces decir que la **calidad de energía** en un sistema A es mayor que la calidad de energía en un sistema B si cada unidad de energía en el sistema A potencialmente puede efectuar más trabajo que cada unidad de energía en el sistema B.
- ❖ Aquella parte del contenido de energía en un sistema dado, que potencialmente puede efectuar trabajo para nosotros recibe el nombre de **trabajo disponible o energía disponible del sistema**.



ENERGIA DISPONIBLE

..Entropía...



- ❖ Este trabajo disponible de un sistema se puede determinar en principio, permitiendo que el sistema efectúe un cambio de estado cuasiestáticamente y que interactúe con un depósito estándar de trabajo.
- ❖ Si representamos con E_d el *trabajo disponible de un sistema* cuyo contenido total de energía es E , podemos escribir:

$$E = E_d + E_{nd}$$

- donde E_{nd} recibe el nombre de *energía no disponible del sistema*.
- ❖ En general, cuando un sistema cerrado efectúa un cambio de estado, se tendrá un cambio en su contenido total de energía y un cambio en su trabajo disponible.



Entropía

- ❖ Ahora definiremos una propiedad primitiva, la entropía S , de tal manera que un cambio en ella, dS , durante un cambio de estado se relacione con el cambio de energía dE y el cambio en trabajo disponible dE_d correspondientes, evaluando este último como:

$$dS = C(dE - dE_d) \quad (1)$$

- donde C es una constante positiva arbitraria cuyo valor depende del depósito estándar.
- ❖ La definición anterior implica que la entropía es proporcional a la energía no disponible del sistema y que se trata de una propiedad extensiva.
- ❖ De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, $dE = 0$ para un sistema aislado y conforme al principio de la degradación de la energía, dE_d debe ser negativo para el mismo sistema.



Entropía

- ❖ Por lo tanto, de la Ec. (1), debemos tener para un sistema aislado:

$$(dS)_{ais} \geq 0 \quad (2)$$

- ❖ La Ec. (2) constituye la expresión matemática de la segunda ley de la termodinámica: La Entropía de un Sistema Aislado Nunca puede Disminuir.
- ❖ Dado que un sistema considerado junto con sus alrededores durante cualquier tipo de interacción, constituye un sistema aislado, podemos expresar la segunda ley de la siguiente manera:

$$(dS)_{sistema} + (dS)_{alrededores} \geq 0 \quad (3)$$

- ❖ Como se recordará, la diferencia entre un proceso reversible y un proceso irreversible es que en el primero no se tienen efectos disipadores.
- ❖ Se concluye entonces que el signo de desigualdad en las Ec. (2) y (3) corresponde al caso en que cualquiera de los procesos efectuados por un sistema aislado constituye un proceso irreversible.



Entropía

- ❖ El signo de igualdad en las mismas ecuaciones corresponde al caso en que todos los procesos efectuados por el sistema aislado sean reversibles.
- ❖ Generalmente, el lado derecho de las Ecs. (2) y (3) debe ser una cantidad positiva diferente de cero y debe tener unidades de entropía.
- ❖ Se puede entonces introducir al concepto de generación, producción o creación de entropía y expresar la segunda ley de la termodinámica como:

$$(dS)_{ais} = (dS)_{sistema} + (dS)_{alrededores} = \bar{d} S_{irr} \quad (4)$$

- donde se conoce a $\bar{d} S_{irr}$ como generación de entropía debido a las irreversibilidades.
- ❖ Se trata de una cantidad positiva diferente de cero para todo proceso real.

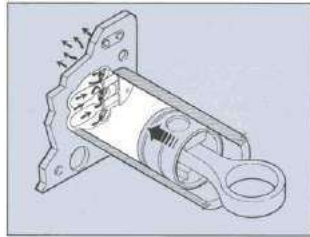


Entropía

- ❖ **Su magnitud** depende del proceso de que se trate; es decir, es una cantidad que **depende de la trayectoria** seguida para realizar el proceso.
- ❖ **Es cero únicamente cuando el proceso es reversible.**
- ❖ Dado que la entropía es una medida de la energía no disponible, cada vez que generamos, producimos o creamos entropía, estamos creando energía no disponible (es decir, **estamos destruyendo energía disponible**).
- ❖ La forma de desarrollar procesos y sistemas que minimicen la producción de entropía, y que a la vez sean consistentes con las restricciones económicas y medioambientales, es uno de los grandes retos que tiene la ingeniería.



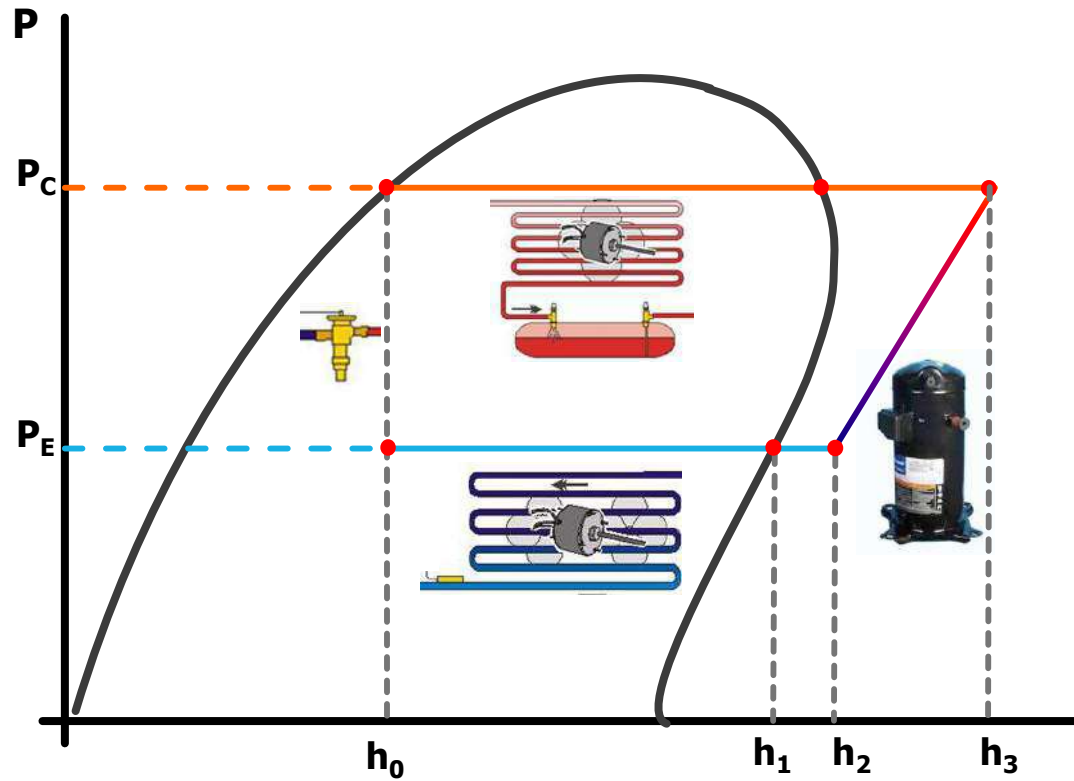
Aplicación



- ❖ Compresores más eficientes producen menos irreversibilidades.
- ❖ El sistema de compresión del compresor Scroll no produce pérdidas por fricción.
- ❖ Los compresores reciprocantes en su sistema cilindro-pistón provocan irreversibilidades debido a la fricción.
- ❖ Los compresores semiherméticos son menos eficientes que los compresores herméticos.



Ciclo de Refrigeración



Diseño de Sistemas de Refrigeración

- ❖ Para el diseño de un sistema de refrigeración son fundamentales: las temperaturas de evaporación y condensación, y por lo tanto, las presiones.
- ❖ La **temperatura de condensación de diseño** se determina tomando la temperatura de diseño de la ciudad donde operará el equipo (Tablas de Temperatura para Diseño de la República Mexicana de AMERIC), y sumándole 15 °C.
- ❖ Este incremento permite que el diferencial de temperatura entre el refrigerante a la salida del compresor y la temperatura ambiente, sea suficiente para que el refrigerante condense en el serpentín de condensación.
- ❖ Por ejemplo, un sistema de refrigeración que debe mantener una cámara a -10 °C , debe tener un evaporador que opere por lo menos a -15 °C para poder mantener la cámara a la temperatura de diseño (-10 °C).



Diseño de Sistemas de Refrigeración

- ❖ Si el sistema se instalará en la Cd. de México:
 - $T_D = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 - por lo que $T_C = 32 + 15 = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- ❖ En un proceso real se tienen al menos las siguientes irreversibilidades:
 - Caída de presión en los tubos de conexión.
 - Transferencia de calor desde o hacia el refrigerante por los tubos de cobre.
 - Caídas de presión en los serpentines.
 - Transferencia de calor desde el compresor.
 - Sobrecalentamiento a la salida del evaporador.
 - Subenfriamiento a la entrada de la VTE.



BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Fundamentals of thermodynamics & psychrometrics. Richard R. Johnson. Ph.D., North Carolina State University; ASHRAE
- ▶ Refrigeración y Acondicionamiento de Aire; Stoecker, Mc Grow Hill: Manual de aire Acondicionado Carrier, Carrier, Marcombo
- ❖ Termodinámica. Cengel Y.A., Boles M.A. Editorial Mc Graw Hill. Cuarta Edición.
- ❖ Ingeniería Termodinámica. Jones J.B., Dugan R.E. Editorial Prentice Hall.
- ▶ *Mataix, Claudio* Módulo I. Principios de Refrigeración. AMERIC.
- ▶ *Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas, Harla, 1990.*





Tels: (55) 52 94 41 90,

Cel: 04455 10 48 2948

www.dimisamx.com.mx



<http://www.americmx.com/>



Ex Presidente Cap Cd de Méx. (2012 – 2013)

www.ashrae.org

