



Universidad Autónoma del Estado de México

Unidad Académica Profesional Tianguistenco

FENÓMENOS DE TRANSPORTE

INGENIERÍA EN PLÁSTICOS

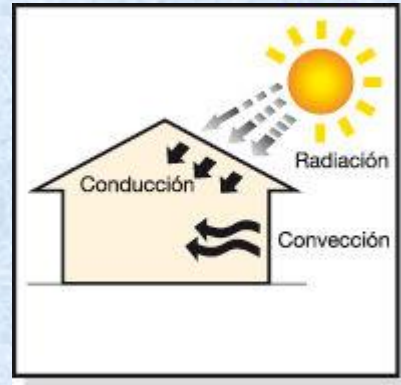
Dra. Ana Lilia Flores Vázquez

Método de uso

- El presente trabajo comprende la primera parte del curso de Fenómenos de Transporte que se imparte a los alumnos del 6º semestre de la Licenciatura de Ingeniería en Plásticos, que se imparte en la Unidad Académica Profesional Tianguistenco.
- Comprende el temario de la unidad de Aprendizaje y el desarrollo de los temas de la primera unidad, así como una serie de ejercicios para que se realicen en el aula con apoyo del docente.

Objetivo de la Unidad de Aprendizaje

Analizar sistemas que involucren la transferencia de masa, energía y momentum, por medio de la aplicación de balances, que permitan la comprensión e interpretación de los procedimientos involucrados.



Temario

1. Introducción

1.1. Los fenómenos de transporte: Fuerzas Impulsoras

1.2. Las funciones de estado fundamentales: U, H, S

1.3. La energía libre de Gibbs

1.4. La energía libre de Helmholtz

1.5. Los diagramas indicadores P-V, T-S y H-S

1.6. Psicrometría básica: Temperaturas de bulbo húmedo, de rocío, de bulbo seco y de saturación

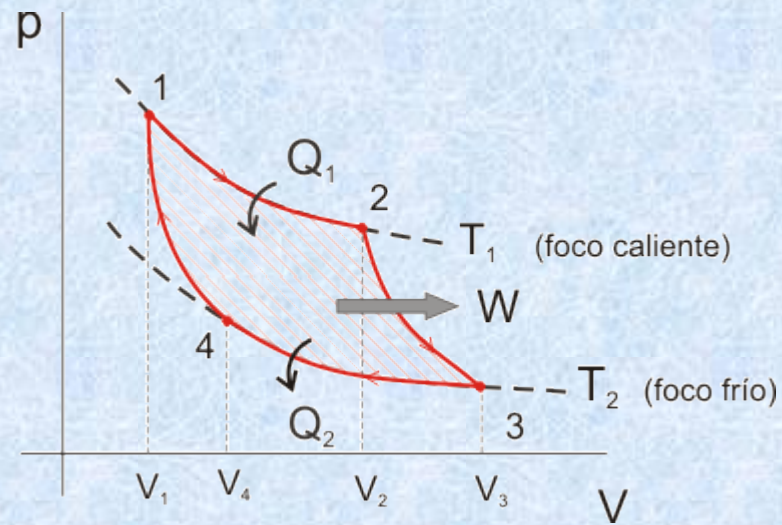
Unidad 2. Ciclos Termodinámicos. Transferencia de Energía

2.1. Ciclo de Carnot

2.2. Ciclo de Rankine

2.3. Ciclo de Brayton

2.4. Ciclo de Otto



Unidad 3. Transferencia de Calor

3.1. Ley de Fourier

3.2. Teoría de conductividad calorífica en gases, sólidos y líquidos

3.3. Convección forzada y libre

3.4. Transporte de energía por radiación

4. Transferencia de masa

Unidad 4. Transferencia de masa

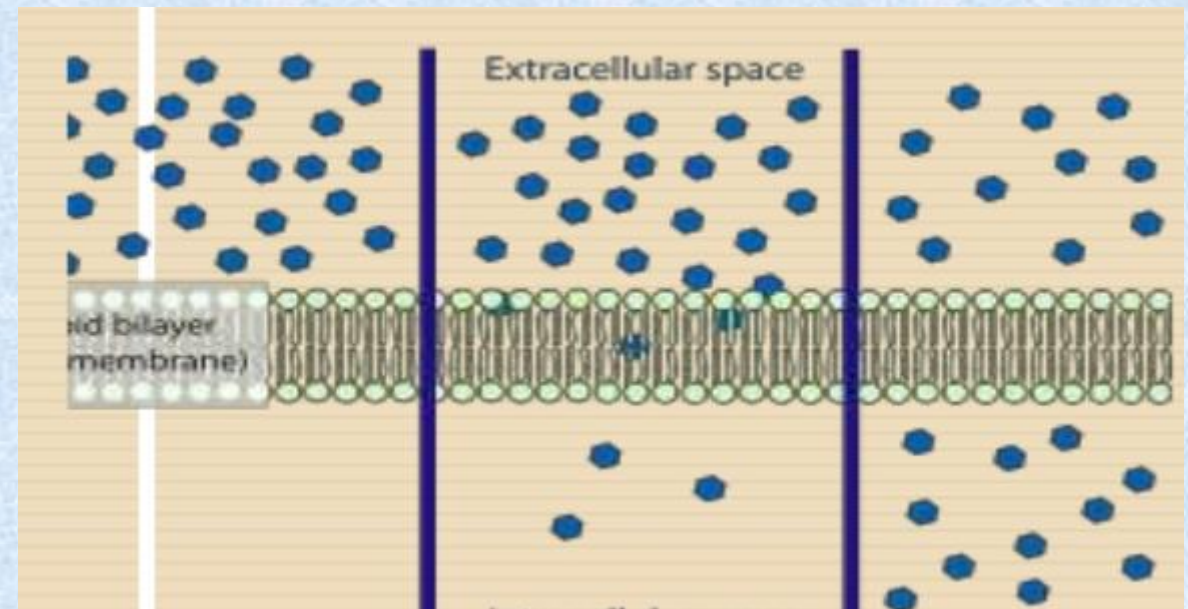
4.1. Ley de Fick

4.2. Mecanismos de transporte: La difusividad

4.3. La ecuación de continuidad

4.4. Ley de Newton de la viscosidad

4.5. Teoría de la capa límite



Unidad 5. Balances macroscópicos sistemas isotérmicos

5.1. Balance macroscópico de energía

5.2. Balance macroscópico de cantidad de movimiento

5.3. Balance macroscópico de energía mecánica: Ecuación de Bernoulli

5.4. Dinámica de fluidos: Ecuación de Euler

5.5. Inestabilidad Kelvin-Helmholtz

5.6. Convección Rayleigh-Bernard

5.7. Inestabilidad de Rayleigh-Taylor

UNIDAD 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Los fenómenos de transporte. Fuerzas impulsoras

- El estudio sistemático y unificado de la transferencia de ***cantidad de movimiento, energía y materia***. El transporte de estas cantidades guardan fuertes analogías, tanto físicas como matemáticas, de tal forma que el análisis matemático empleado es prácticamente el mismo.
- Los fenómenos de transporte pueden dividirse en dos tipos: transporte molecular y transporte convectivo. Estos, a su vez, pueden estudiarse en tres niveles distintos: nivel macroscópico, nivel microscópico y nivel molecular.

Termodinámica

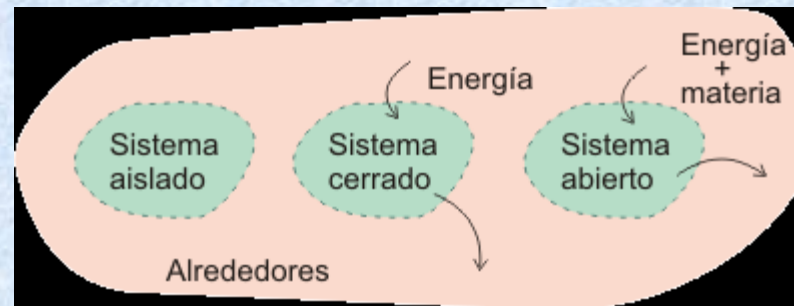
- Puede definirse como la ciencia de la energía.
- **ENERGÍA.** Capacidad para causar cambios
 - Eólica
 - Cinética
 - Potencial
 - Electromagnética
 - Mecánica
 - Solar
 - Nuclear

Leyes de la termodinámica

- LEY CERO. Existencia de estados de equilibrio.
 - Si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí.
 - Dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto.
- 1ª LEY. Principio de conservación de la energía
 - Para todo proceso adiabático entre dos estados especificados de un sistema cerrado, el trabajo neto realizado es el mismo sin importar la naturaleza del sistema cerrado ni los detalles del proceso.

SISTEMAS

- Un **sistema** se define como una cantidad de materia o una región en el espacio elegida para el análisis.
- La masa o región fuera del sistema son los **alrededores**.
- La superficie que separa al sistema de los alrededores se llama **frontera**.



Sistema cerrado

- También conocido como masa de control, la masa no puede cruzar la frontera, pero la frontera si puede cruzar la frontera.



Sistema Abierto

- También se conoce como volumen de control.
- Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera.



Sistema Aislado

- En estos sistemas, ni la energía ni la masa pueden cruzar la frontera.

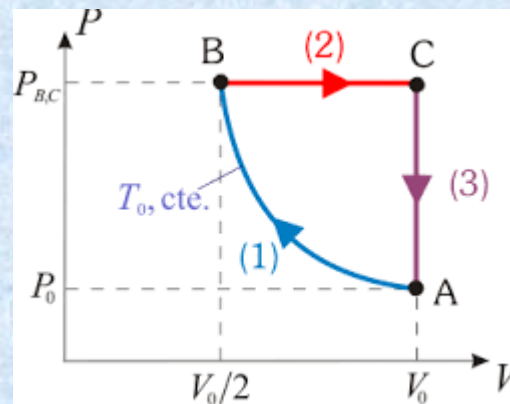


ESTADO Y EQUILIBRIO

- En un **estado** específico, todas las propiedades del sistema tienen valores fijos, e incluso si cambia el valor de una propiedad, el estado cambia a otro diferente.
- La termodinámica trata con estados de equilibrio . En un estado de equilibrio *no hay fuerzas desbalanceadas o fuerzas impulsoras*

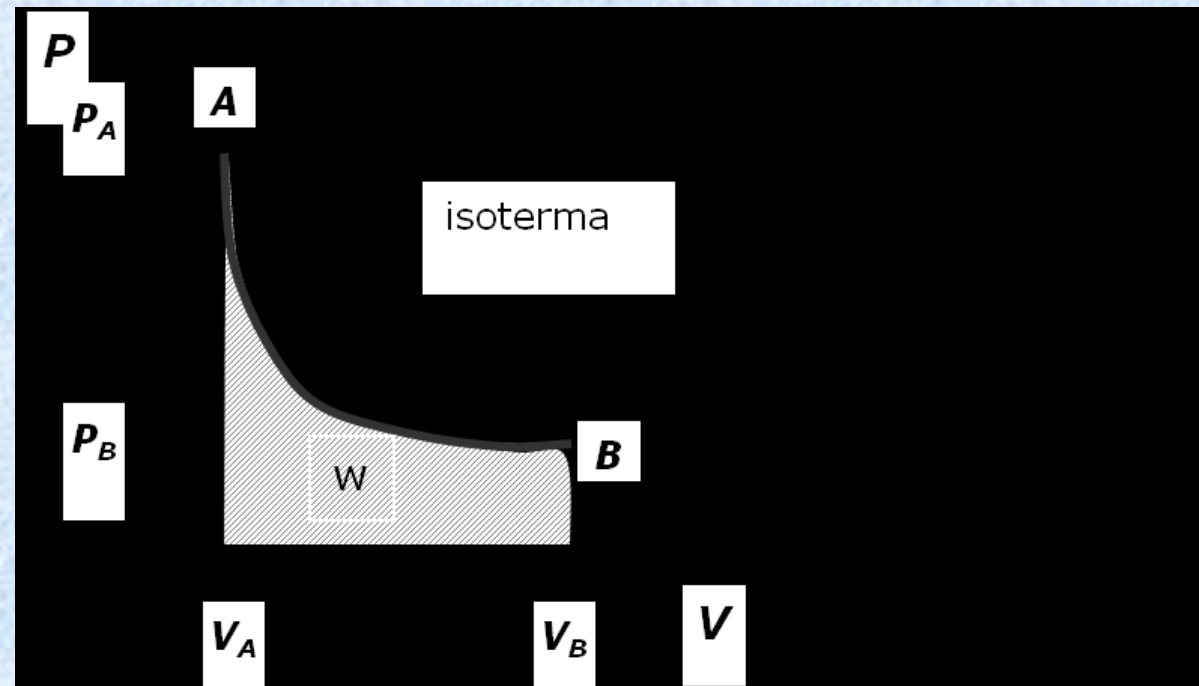
Procesos

- Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un proceso, y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es una trayectoria. Para describir completamente un proceso se deben especificar sus estados inicial y final, , así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores.



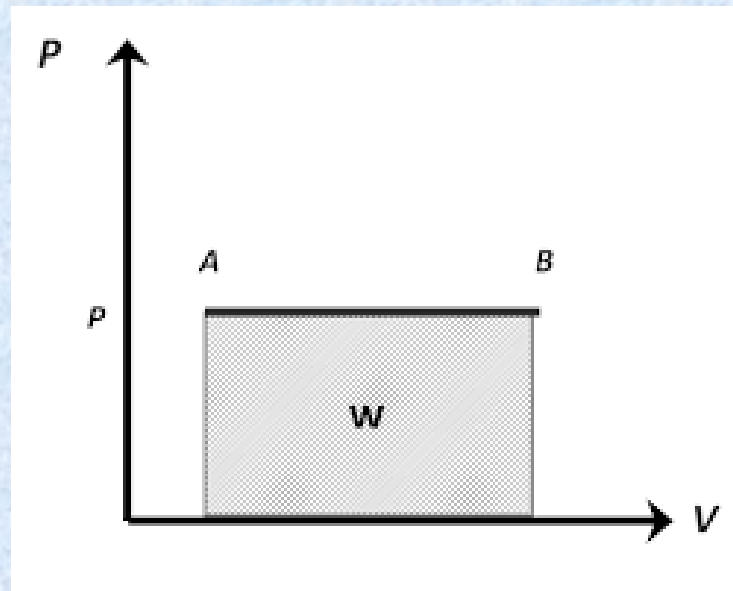
TIPOS ESPECIALES DE PROCESO

- PROCESO ISOTÉRMICO. Es aquel en el cual la temperatura permanece constante.



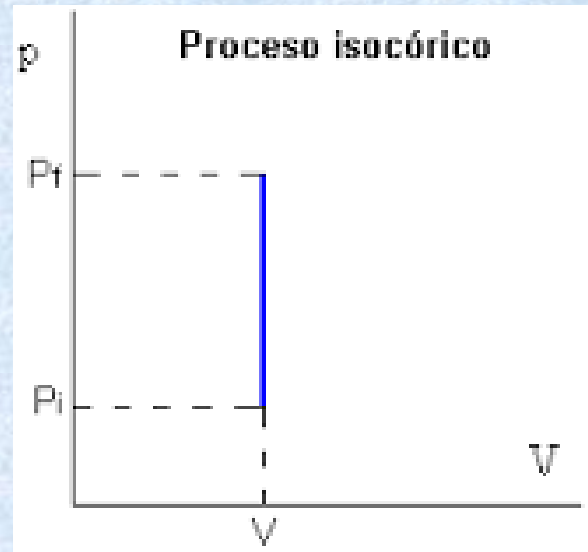
PROCESO ISOBÁRICO

- Es aquel en que la presión permanece constante



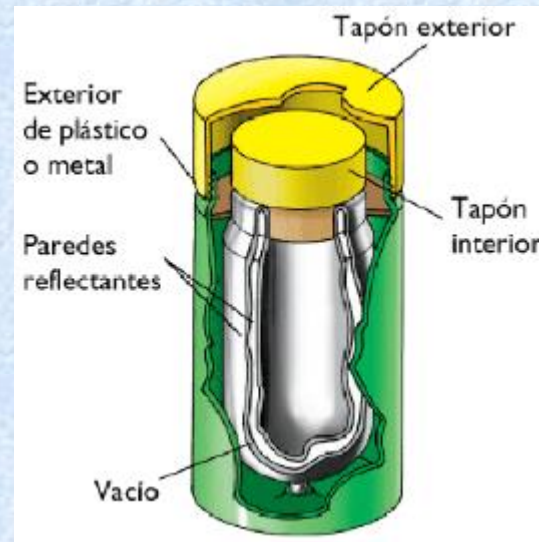
PROCESO ISOCÓRICO

- También conocido como proceso isométrico, es aquel en que el volumen permanece constante



PROCESO ADIABÁTICO

- Es aquel en el cual no hay transferencia de calor



SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

- Kelvin-Planck
 - Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo.
 - Ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia térmica de 100%.
- Clausius
 - Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.

Fuerzas impulsoras (sistemas de no equilibrio)

- PROCESOS IRREVERSIBLES. El paso del estado final al inicial es imposible sin efectuar ningún cambio a los cuerpos del entorno; esto es, el retorno precisa compensación



PROCESOS IRREVERSIBLES

- Los procesos irreversibles los podemos describir apropiadamente mediante dos cantidades:
- ***Afinidad o fuerza generalizada***, es la "fuerza" impulsora del proceso, F . No tiene porqué ser una fuerza real, sino sólo formal.
- **Flujo generalizado o velocidad**, es la variación temporal de un parámetro extensivo, X , con el que caracterizamos la respuesta del sistema a la "fuerza" aplicada, J .

PROCESO ESPONTANEOS

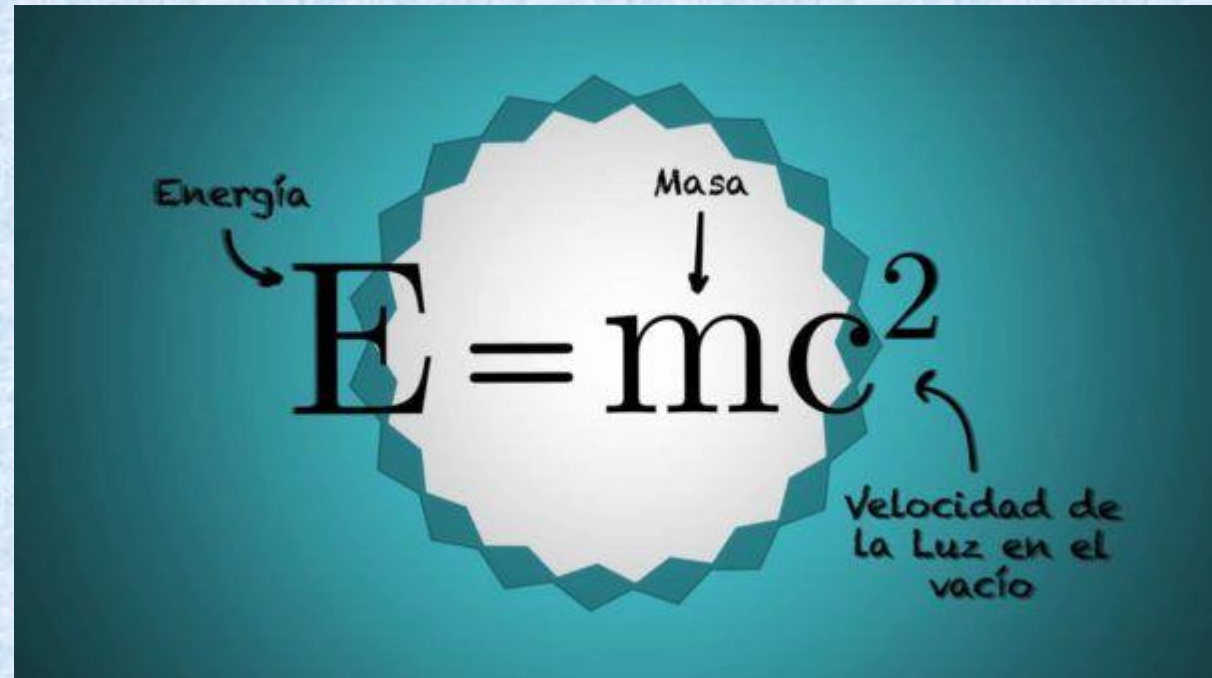
- Un proceso se dice que es espontáneo cuando tiene “fuerza” impulsora suficiente para transcurrir por sí mismo. Si no tiene esa “fuerza” impulsora propia, y tenemos que suministrarla nosotros a través de una energía, entonces decimos que es no espontáneo.
- Son procesos espontáneos: La bajada del agua de los ríos desde las montañas hasta el mar. La disolución de un terrón de azúcar en el café. La oxidación del hierro expuesto al medio ambiente.. El paso del calor de un cuerpo caliente a uno más frío. La rotura de un vaso de cristal cuando se cae al suelo. Todos estos procesos se producen por sí solos, sin intervención nuestra.
- Son procesos no espontáneos: El agua no sube del mar a las montañas. El hierro oxidado no se vuelve brillante. El calor no pasa de un cuerpo frío a uno con más temperatura. El vaso roto no vuelve a reconstruirse. Para realizar estos procesos no espontáneos tenemos que aplicar una energía por nuestra parte, pues por sí solos no se producen.
- Vemos que los procesos que ocurren espontáneamente en una dirección no ocurren espontáneamente en la opuesta.
- El que un proceso sea espontáneo no quiere decir que se produzca de forma rápida o inmediata, puede llevarle mucho tiempo efectuarse.

FUERZAS IMPULSORAS

- Es común a todas las operaciones el concepto de fuerza impulsora, según cual sea la propiedad transferida será la fuerza impulsora, así, en la transferencia de materia la fuerza impulsora es una diferencia de concentraciones, en la transmisión de energía la fuerza impulsora es una diferencia de temperatura y en el transporte de cantidad de movimiento la fuerza impulsora es una diferencia de velocidad entre dos zonas del fluido.

1.2. Las funciones de estado fundamentales: U, H, S

- La energía puede existir como:
 - Térmica
 - Mecánica
 - Cinética
 - Potencial
 - Eléctrica
 - Magnética
 - Química
 - Nuclear



The diagram shows the equation $E = mc^2$ centered within a white, jagged-edged circular shape. The word "Energía" is written above the letter "E" with a curved arrow pointing to it. The word "Masa" is written above the letter "m" with a straight arrow pointing down to it. The words "Velocidad de la Luz en el vacío" are written below the "c" with a curved arrow pointing to the "c". The entire diagram is set against a dark teal background.

$$E = mc^2$$

Energía Macroscópica y Microscópica

- Las formas macroscópicas de energía son las que posee el sistema con respecto a un marco de referencia exterior.
- Las formas microscópicas de energía son las que se relacionan con la estructura molecular de un sistema y el grado de actividad molecular y son independientes de los grados de referencia externos. La suma de todas las formas microscópicas de energía se denomina, **energía interna del sistema** y se denota por **U**.

Energía Interna

- Las moléculas de gas se mueven en el espacio con cierta velocidad, por tanto poseen energía interna, de translación, en el caso de las moléculas poliatómicas están giran respecto a un eje, de rotación, aunado a ello, los átomos de estas moléculas pueden vibrar respecto a su centro de masa.
- A nivel nuclear también existen translaciones del electrón alrededor del núcleo, y energías de giro, espín.
- La energía interna también se relaciona con fuerzas de enlace.

ENTALPÍA

- Es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H, cuya variación expresa una medida de la cantidad de la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.
- Es una función de estado ,donde la variación permite expresar la cantidad de calor puesto en juego durante una transformación isobárica
- Es numéricamente igual al calor intercambiado con el ambiente exterior al sistema en cuestión.

Entalpía

- En términos de la energía interna

$$H = U + PV$$

- Se trata de una propiedad extensiva de estado.
- En un proceso a presión constante el calor transferido desde el entorno es igual al aumento de entalpía del sistema.

CALORES ESPECÍFICOS

- Se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia, se puede medir a volumen constante o a presión constante.

$$C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P$$

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

- Son independientes del tipo de proceso

EJEMPLO:

- Para la plata, el calor específico a presión constante está dado por:

$$\frac{C_P}{J/molK} = 23.43 + 0.00628T$$

Calcule los cambios en la entalpía si se calientan 3 moles de plata desde 25 °C hasta su punto de fusión, 961 °C, bajo una presión de 1 atm.

ENTROPÍA

- Es una propiedad extensiva del sistema.
- El cambio de entropía puede determinarse como:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{1 \rightarrow 2} \frac{dQ}{T}$$

- Los ingenieros están realmente interesados en los cambios de entropía.
- Es una cantidad que describe hacia donde va el proceso.
- Es independiente de la trayectoria.
- Para procesos isotérmicos

$$\Delta S = \frac{Q}{T_0}$$

PRINCIPIO DE INCREMENTO DE LA ENTROPÍA

- El cambio de entropía de un sistema cerrado durante un proceso irreversible

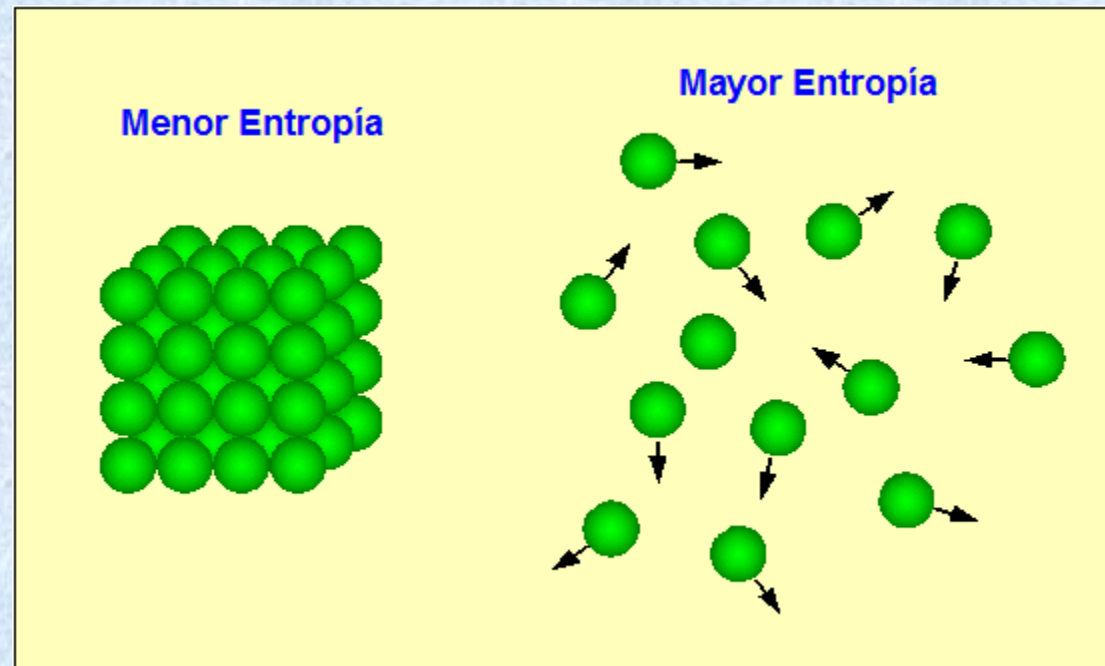
$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

- La generación de entropía siempre es una cantidad positiva o cero.
- Su valor depende del proceso.
- Para un sistema aislado

$$\Delta S \geq 0$$

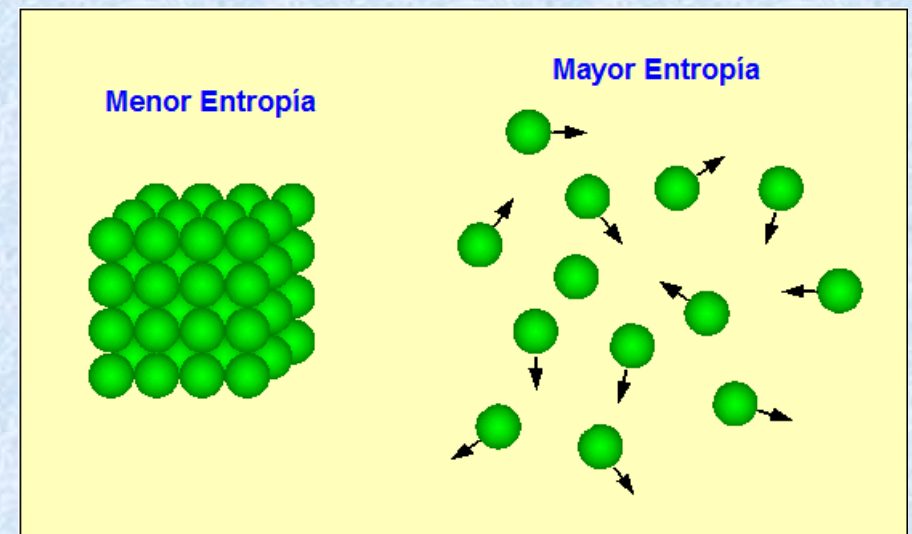
Comentarios sobre la entropía

- Los procesos solo pueden ocurrir en una cierta dirección, no en cualquiera.
- La entropía es una propiedad que no se conserva en procesos reales.



1.3 Energía libre de Gibbs

- En cada etapa de un proceso reversible el sistema solo se leja infinitesimalmente del equilibrio.
- En un sistema aislado $dU=0$, $dW=0$, $dQ=0$, o lo que es lo mismo $dS \geq 0$
- Un sistema aislado en equilibrio debe tener la misma temperatura en todas sus partes.



- Supóngase que se divide un sistema aislado en dos partes, α y β . Si una cantidad de calor positiva, dQ_{rev} se transfiere reversiblemente de una región a otra

$$dS_{\alpha} = -\frac{dQ_{rev}}{T_{\alpha}}$$

$$dS_{\beta} = \frac{dQ_{rev}}{T_{\beta}}$$

- El cambio total de entropía es

$$dS = dS_{\alpha} + dS_{\beta} = \left(\frac{1}{T_{\beta}} - \frac{1}{T_{\alpha}} \right) dQ_{rev}$$

Como los cambios de entropía siempre son positivos

$$\left(\frac{1}{T_{\beta}} - \frac{1}{T_{\alpha}} \right) > 0$$

$$T_{\alpha} > T_{\beta}$$

TRANSFORMACIONES A TEMPERATURA CONSTANTE

- Si el cambio es isotérmico

$$TdS = d(ST)$$

Por tanto de la primera y segunda ley de la termodinámica

$$-dU + d(TS) \geq dW$$

$$-d(U - TS) \geq dW$$

A la combinación de variables

$$A = U - TS$$

Se le denomina energía libre de Helmholtz del sistema

El máximo trabajo obtenido en una transformación isotérmica de estado es igual a la disminución de la energía de Helmholtz.

TRANSFORMACIONES A TEMPERATURA Y PRESIÓN CONSTANTES

$$- [dU + d(pV) - d(TS)] \geq dW$$

$$- d[U + pV - TS] \geq dW$$

$$[U + pV - TS] \equiv G$$

La disminución en la energía de Gibbs asociada con un cambio de estado a T y p constantes, es igual al trabajo máximo por encima del trabajo de expansión que se obtiene en la transformación

ΔG

- Si podemos calcular la variación de la energía libre de Gibbs para una transformación, el signo algebraico de ΔG nos indica si la transformación puede ocurrir o no en la dirección que imaginamos.
 - Si es negativa, la transformación puede ocurrir de forma espontánea
 - Si es cero, el sistema está en equilibrio
 - Si es positiva, la dirección natural es opuesta a la supuesta.

| ΔH | ΔS | ΔG | Espontaneidad |
|------------|------------|----------------|---------------------------------|
| < 0 | > 0 | < 0 | Siempre es espontánea |
| < 0 | < 0 | < 0 a T baja | Espontánea a temperaturas bajas |
| > 0 | < 0 | > 0 | Nunca es espontánea |
| > 0 | > 0 | < 0 a T alta | Espontánea a temperaturas altas |

FUERZAS IMPULSORAS DE LOS CAMBIOS NATURALES

- A temperatura constante

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

- La primera contribución es energética y la segunda entrópica.
- ΔH negativo, reacción exotérmica.
- En un cambio natural, el sistema tiende a lograr su entalpía mínima y su entropía mas elevada.

ECUACIONES FUNDAMENTALES

$$H = U + pV$$

$$A = U - TS$$

$$G = U + Pv - TS$$

Calculando diferenciales

$$dH = dU + pdV + Vdp$$

$$dA = dU - TdS - SdT$$

$$dG = dU + pdV + Vdp - TdS - SdT$$

sustituyendo

$$dU = TdS - pdV$$

$$dU = TdS - pdV$$

$$\begin{aligned}dH &= dU + pdV + Vdp \\ &= TdS - pdV + pdV + Vdp \\ &= Tds + Vdp\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}dA &= TdS - pdV - TdS - SdT \\ &= -SdT - pdV\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}dG &= dU + pdV + Vdp - TdS - SdT \\ &= TdS - pdV + pdV + Vdp - TdS - SdT \\ &= Vdp - SdT\end{aligned}$$

RELACIONES DE MAXWELL

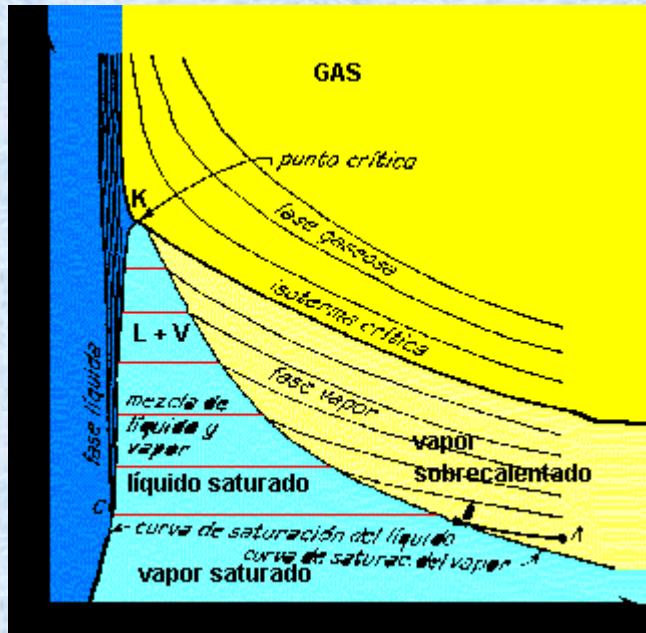
$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

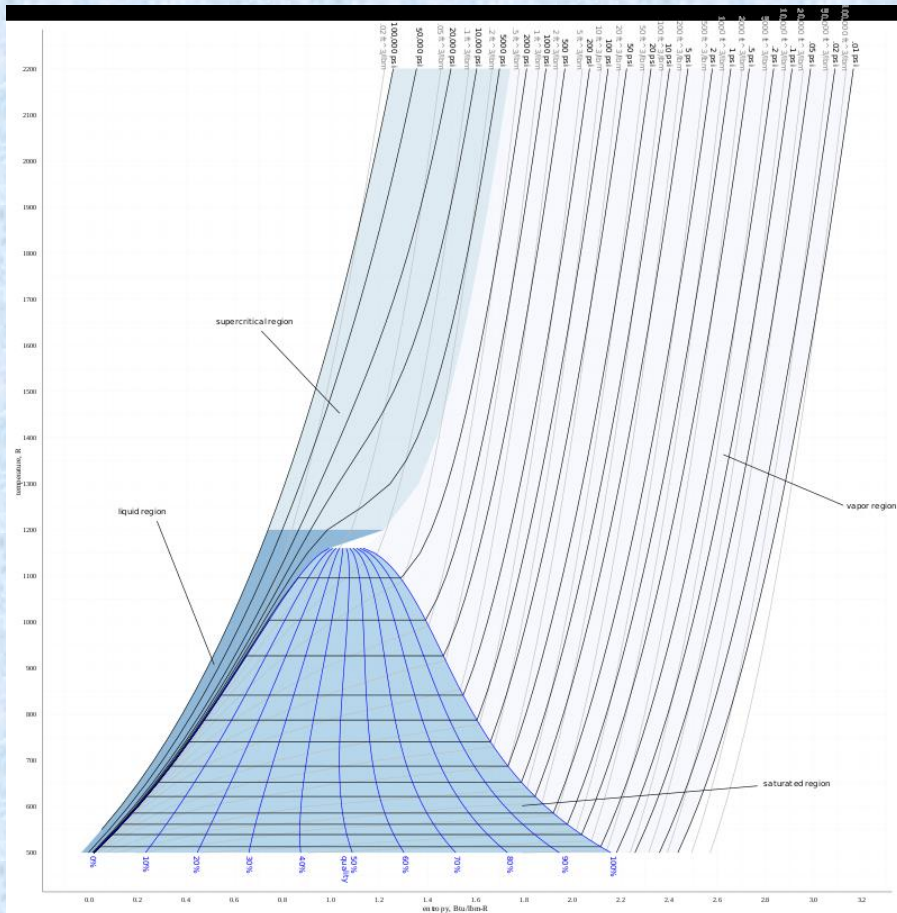
$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS



La curva de cambio de fase está en negro. Se define una campana celeste que es la zona donde se produce el cambio de fase. A la izquierda (en azul) está la zona de líquido saturado y a la derecha la zona de vapor sobrecalentado (color damasco). Las líneas que aparecen son isoterma. De ellas destaca la isoterma crítica. Cuando el vapor de agua está sobre esa **temperatura crítica (K)**, por mucho que se comprima el vapor, este no condensa. Esto define la zona amarilla de **Gas**. También se debe tener claro que en la fase líquida, las isoterma son casi verticales. Esto se debe a que el agua es fluido casi incompresible

DIAGRAMA T-S

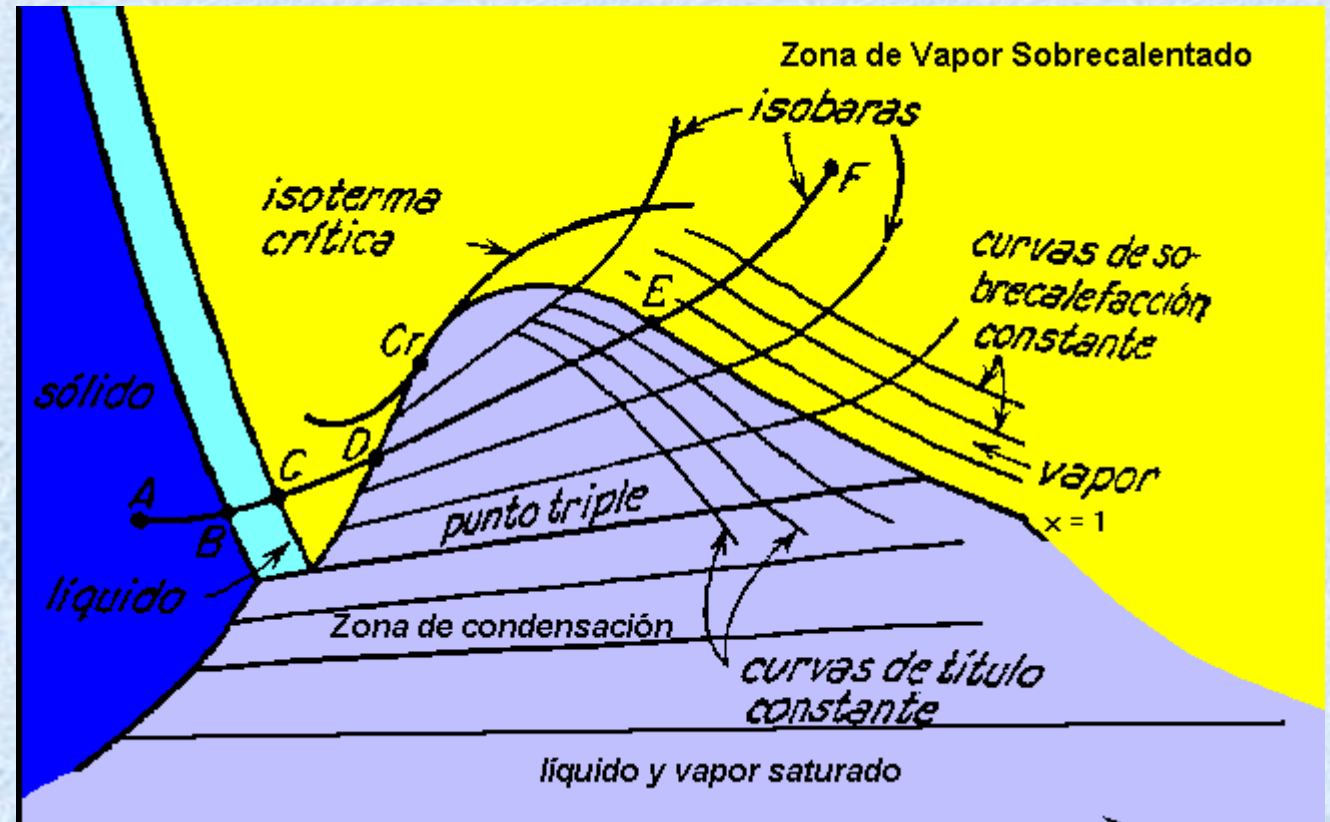


Un diagrama temperatura-entropía o diagrama T-S, se utiliza en la termodinámica para visualizar cambios de temperatura y entropía específica durante un proceso termodinámico o ciclo. Es una herramienta útil y común, particularmente porque ayuda a visualizar la transferencia de calor durante un proceso. Un diagrama temperatura-entropía o diagrama T-S, se utiliza en la termodinámica para visualizar cambios de temperatura y entropía específica durante un proceso termodinámico o ciclo. Para procesos reversibles (ideales), el área bajo la curva T-S de un proceso es el calor transferido al sistema durante ese proceso.

Un proceso isentrópico se representa como una línea vertical en un diagrama T-S, en donde un proceso isotérmico es una línea horizontal

DIAGRAMAS DE MOLLIER

- Aspectos generales:
- Al usar los ejes H-S se tiene la enorme ventaja de que es sencillo poder determinar los intercambios de calor y trabajo para casi cualquier evolución.



TAREA

- Utilizando la ecuación de estado de gas ideal, verifique que se cumple

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = -1$$

Que se conoce como relación cíclica

Y la regla de reciprocidad

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P}$$

1.6 Psicrometría Básica

Es la medición del contenido de humedad del aire.

Ampliando la definición a términos más técnicos, psicrometría es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano.

Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica.

Propiedades del aire

- El aire es una mezcla de gases incolora, indolora e insípida que rodea a la tierra.
- Su densidad varía, siendo mayor a nivel del mar, que en la cima de una alta montaña.
- Todo este peso de aire ejerce una presión de 101.325 kPa (1.033 kg/cm²) al nivel del mar, pero esta presión disminuye mientras más alto subimos.
- El aire, es siempre un gas altamente sobrecalentado, o más precisamente, es una mezcla de gases altamente sobrecalentados. Cuando calentamos o enfriamos aire seco, solamente estamos agregando o quitando calor sensible.

Propiedades del aire seco

| Nombre | Símbolo Químico | AIRE SECO | |
|--------------------|-----------------|-----------|--------------|
| | | % en Peso | % en Volumen |
| Nitrógeno | N ₂ | 75.47 | 78.03 |
| Oxígeno | O ₂ | 23.19 | 20.99 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 0.04 | 0.03 |
| Hidrógeno | H ₂ | 0.00 | 0.01 |
| Gases raros | --- | 1.30 | 0.94 |

PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA

- La humedad es un término utilizado para describir la presencia de vapor de agua en el aire
- Dentro de una casa, edificio o fábrica, el vapor de agua puede provenir de la cocina, baño, máquinas, personas, etc.
- El vapor de agua es producido por el agua, a cualquier temperatura (aún por el hielo). El agua no tiene que estar en ebullición, aunque si lo está, el vapor de agua es producido con mayor rapidez.



Humedad Relativa

- La humedad relativa (hr), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en porcentaje, tal como 50%, 75%, 30%, etc.
- De acuerdo a la ASHRAE, una definición más técnica de la hr, sería la relación de la fracción mol del vapor de agua presente en el aire, con la fracción mol del vapor de agua presente en el aire saturado, a la misma temperatura y presión.

Humedad Absoluta

Se refiere al peso del vapor de agua por unidad de volumen. Esta unidad de volumen, generalmente es un espacio de un metro cúbico . En este espacio, normalmente hay aire también, aunque no necesariamente. La humedad relativa está basada en la humedad absoluta, bajo las condiciones establecidas; es decir, la humedad relativa es una comparación con la humedad absoluta a la misma temperatura, si el vapor de agua está saturado.

Humedad específica y porcentaje de saturación

- **Humedad Específica**

- La humedad específica, o también llamada contenido de humedad, es el peso de vapor de agua en gramos por kilogramo de aire seco (o bien, granos por libra).
- La humedad específica, se refiere a la cantidad de humedad en peso, que se requiere para saturar un kilogramo de aire seco, a una temperatura de saturación (punto de rocío) determinada.
- La humedad específica es muy similar a la humedad absoluta, excepto que esta última, está basada en gramos por metro cúbico, y la humedad específica, está basada en gramos de humedad por kilogramo de aire seco.

- **Porcentaje de Saturación**

- El porcentaje de saturación (o porcentaje de humedad), es un término que algunas veces se confunde con la humedad relativa. El porcentaje de saturación, es 100 veces la relación del peso de vapor de agua con el peso del vapor de agua necesario para saturar un kilogramo de aire seco a la temperatura del bulbo seco.

Punto de rocío

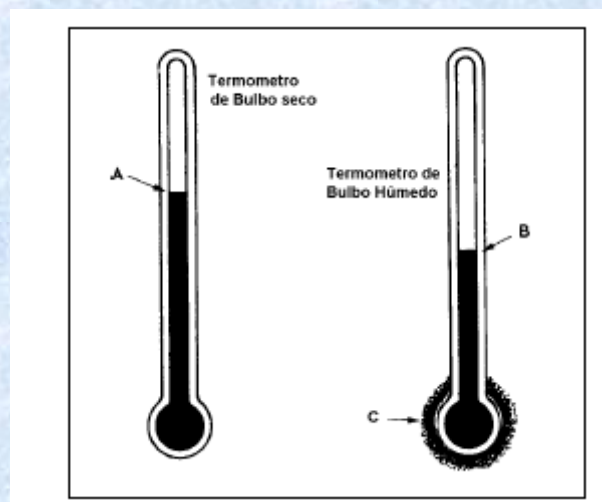
- El punto de rocío se define como: la temperatura debajo de la cual el vapor de agua en el aire, comienza a condensarse.
- También es el punto de 100% de humedad.
- Un método para determinar el punto de rocío con bastante precisión, es colocar un fluido volátil en un recipiente de metal brillante; después, se agita el fluido con un aspirador de aire. Un termómetro colocado dentro del fluido indicará la temperatura del fluido y del recipiente. Mientras se está agitando, debe observarse cuidadosamente la temperatura a la cual aparece una niebla por fuera del recipiente de metal. Esto indica la temperatura del punto de rocío.

Porcentaje de saturación

- Es un término que algunas veces se confunde con la humedad relativa. El porcentaje de saturación, es 100 veces la relación del peso de vapor de agua con el peso del vapor de agua necesario para saturar un kilogramo de aire seco a la temperatura del bulbo
- Cuando se habla de la temperatura de punto de rocío del aire, generalmente, se refiere a su temperatura promedio.
- Si a una pequeña porción de aire se le remueve calor (se calienta o se enfría), el contenido total de humedad y su temperatura promedio, eventualmente se verán afectadas, después que la circulación del aire lo haya mezclado completamente de nuevo.

Termómetro de bulbo seco

- En el acondicionamiento de aire, la temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de «bulbo seco» (bs), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca.
- Es la temperatura medida por termómetros ordinarios en casa.



Termómetro de bulbo húmedo

- Tiene una pequeña mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo.
- Si esta mecha se humedece con agua limpia, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura (temperatura) del termómetro.
- Si el aire estuviese saturado con humedad, la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco.
- Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha. Así que, la lectura de la temperatura del bulbo húmedo, varía de acuerdo a qué tan seco esté el aire.
- El bulbo húmedo deberá protegerse de superficies que radien calor

Psicrómetro

- El instrumento consiste de dos termómetros, el de bulbo seco y el de bulbo húmedo. Para operarlo, la mecha se satura sobre el bulbo húmedo con agua limpia, o de preferencia, con agua destilada y se gira.
- Para tomar las lecturas con el psicrómetro de onda, se recomiendan los siguientes pasos:
- **1.** Sumerja la mecha sobre el bulbo húmedo en el agua. Sólo una vez por cada determinación de la *hr*, pero nunca entre una lectura y otra. La evaporación progresiva de la humedad en la mecha, hasta que alcanza equilibrio con la humedad en el aire, es el factor que determina la lectura de bulbo húmedo.
- **2.** Gire el psicrómetro durante 30 segundos. Rápidamente tome las lecturas, primero en el termómetro de bulbo húmedo y luego en el de bulbo seco y anótelas. Gire de nuevo el psicrómetro, tomando lecturas a intervalos de 30 segundos durante cinco lecturas sucesivas, y anote las temperaturas en cada ocasión, o hasta que se haya obtenido la lectura más baja y que la última lectura revele una nivelación o curva de retorno. (Dos o más lecturas sucesivas casi idénticas).
- **3.** Utilice las tablas o la carta psicrométrica para obtener la *hr*. Normalmente, los psicrómetros de onda vienen acompañados de una regla deslizante con las dos escalas de temperaturas (bulbo húmedo y bulbo seco) y su *hr* correspondiente.

Carta psicrométrica

Es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, *hr*, volumen, presión, etc.

Se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire.

Aunque las tablas psicrométricas son más precisas, el uso de la carta psicrométrica puede ahorrarnos mucho tiempo y cálculos, en la mayoría de los casos donde no se requiere una extremada precisión.



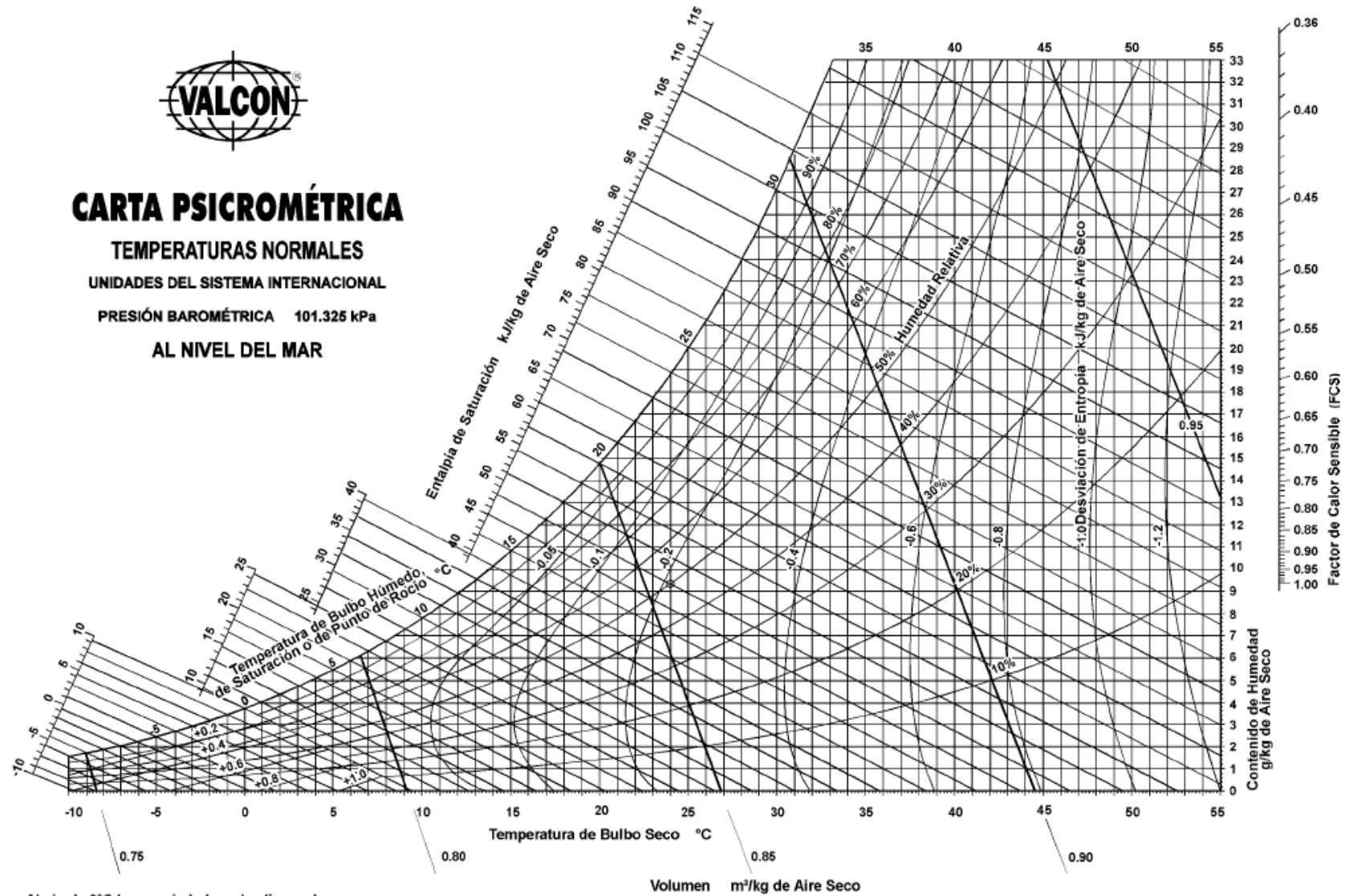
CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



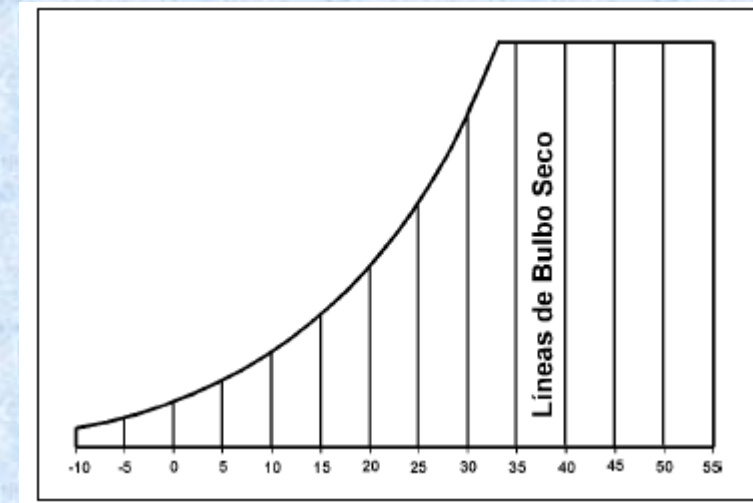
Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpia son para el hielo

¿Cómo se usa?

- En una carta psicrométrica se encuentran todas las propiedades del aire, de las cuales las de mayor importancia son las siguientes:
 1. Temperatura de bulbo seco (*bs*).
 2. Temperatura de bulbo húmedo (*bh*).
 3. Temperatura de punto de rocío (*pr*)
 4. Humedad relativa (*hr*).
 5. Humedad absoluta (*ha*).
 6. Entalpía (*h*).
 7. Volumen específico.

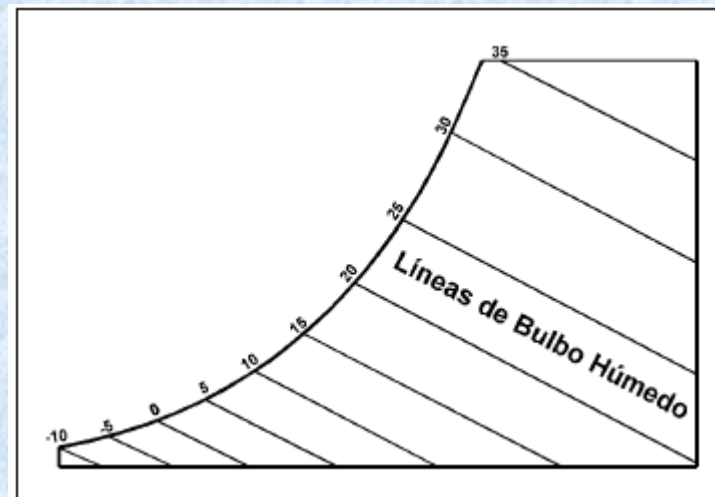
Temperatura de bulbo seco

- Es la temperatura medida con un termómetro ordinario.
- Esta escala es la horizontal (abcisa), en la parte baja de la carta, según se muestra en la figura.
- Las líneas que se extienden verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, se llaman líneas de temperatura de bulbo seco constantes, o simplemente «líneas de bulbo seco». Son constantes porque cualquier punto a lo largo de una de estas líneas, corresponde a la misma temperatura de bulbo seco indicada en la escala de la parte baja.



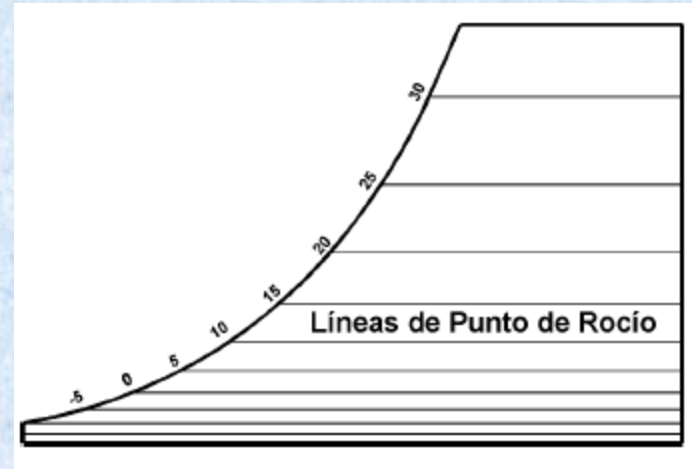
Temperatura de bulbo húmedo

- Corresponde a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo.
- La escala de temperaturas de bulbo húmedo, es la que se encuentra del lado superior izquierdo, en la parte curva de la carta psicrométrica.
- Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constantes o líneas de bulbo húmedo, corren diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en un ángulo de aproximadamente 30° de la horizontal. También se les dice constantes, porque todos los puntos a lo largo de una de estas líneas, están a la misma temperatura de bulbo húmedo.



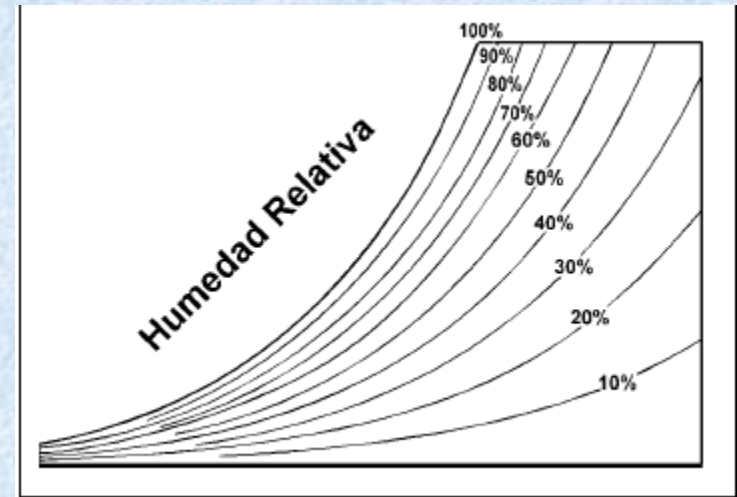
Temperatura de punto de rocío

- Esta es la temperatura a la cual se condensará la humedad sobre una superficie. La escala para las temperaturas de punto de rocío es idéntica que la escala para las temperaturas de bulbo húmedo; es decir, es la misma escala para ambas propiedades. Sin embargo, las líneas de la temperatura de punto de rocío, corren horizontalmente de izquierda a derecha.
- Cualquier punto sobre una línea de punto de rocío constante, corresponde a la temperatura de punto de rocío sobre la escala, en la línea curva de la carta.



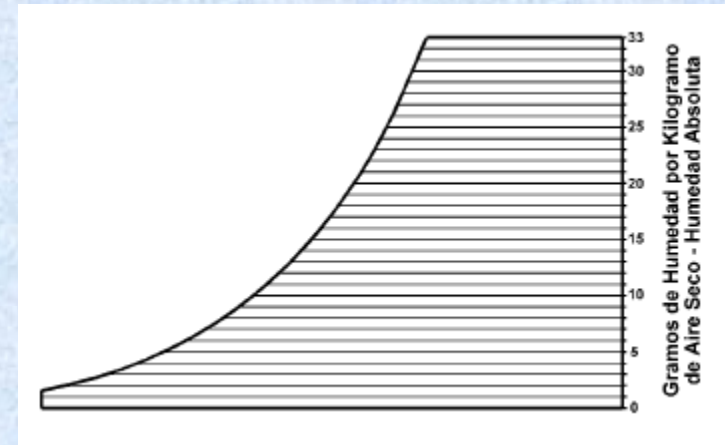
Humedad Relativa

- Las líneas de humedad relativa constante, son las líneas curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Se expresan siempre en por ciento, y este valor se indica sobre cada línea.
- La línea de 100% de *hr*, es la misma que la escala de temperaturas de bulbo húmedo y de punto de rocío.
- Las líneas de *hr* constante, disminuyen en valor al alejarse de la línea de saturación hacia abajo y hacia la derecha.



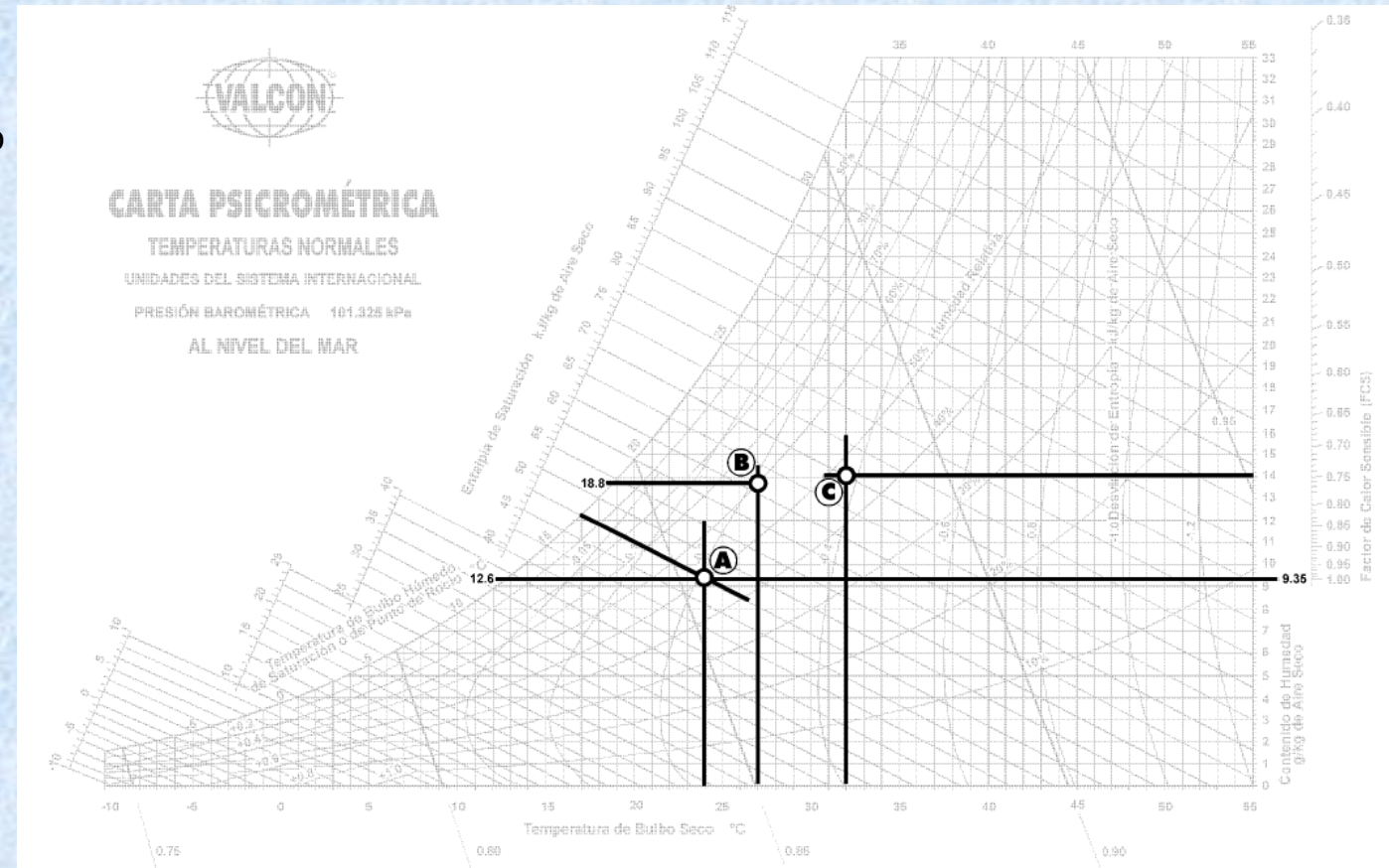
Humedad Absoluta

- La escala de la humedad absoluta, es la escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicrométrica.
- Los valores de esta propiedad se expresan en gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg), en el sistema internacional, y en granos por libra (gr/lb), en el sistema inglés.
- Las líneas de humedad absoluta, corren horizontalmente de derecha a izquierda, y son paralelas a las líneas de punto de rocío y coinciden con éstas. Así pues, podemos ver que la cantidad de humedad en el aire, depende del punto de rocío del aire.



Ejemplo

- Supongamos que con un psicrómetro se tomaron las lecturas de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, siendo éstas de 24°C y de 17°C , respectivamente. ¿Cuál será la humedad relativa? ¿cuál será el punto de rocío? ¿Cuál será la humedad absoluta?
- SOLUCIÓN
- Refiriéndonos a la carta psicrométrica encontramos la temperatura de bulbo seco (24°C) en la escala inferior, y la temperatura de bulbo húmedo (17°C) en la escala curva del lado izquierdo de la carta. Extendiendo estas dos líneas, se intersectan en el punto "A".
- A partir de este punto, se puede determinar toda la demás información. La humedad relativa es de 50%.
- Partiendo del punto "A" y desplazándonos hacia la izquierda en forma horizontal, la línea corta a la escala de temperatura de punto de rocío en 12.6°C .
- Partiendo nuevamente del punto "A", en forma horizontal, pero hacia la derecha de la carta, la línea intersecta en la escala de humedad absoluta en un valor de 9.35 g/kg de aire seco.



Ejercicios

- A una muestra de aire se le midió la humedad relativa, utilizando un higrómetro y ésta es de 60%. Si la temperatura de bulbo seco es de 27°C, ¿cuál será el punto de rocío?
- Encontrar la *hr* cuando la temperatura de bulbo seco es de 32°C, y el contenido de humedad (presión del vapor de agua) es de 14 g/kg de aire seco.

Referencias

- Wikipedía
- Çengel, Y. A.; Boles, M. A., TERMODINÁMICA (2008) México, McGraw Hill.
- Castellan, G. R., FISICOQUÍMICA (1998) México, Adison Wesley Longman.
- <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/...pdf/.../carta%20psicometrica.pdf>
- WIKIPEDIA
 - https://es.wikipedia.org/wiki/Fenómenos_de_transporte. 27 enero 2017
- Universidad Politécnica de Madrid
 - <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo1p/sistema.html>
- Universidad de Sevilla
 - [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Energ%C3%ADa_interna,_calor_y_trabajo_en_proceso_c%C3%ADclico,_F2_GIA_\(Jun,_2013\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Energ%C3%ADa_interna,_calor_y_trabajo_en_proceso_c%C3%ADclico,_F2_GIA_(Jun,_2013))
- PROEMPLEO INGENIEROS ES
 - <http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-624-Entropia--fuerza-impulsora-procesos-naturales.aspx>
- INGENIERÍA QUÍMICA
 - <http://www.industriaquimica.net/definicion-fuerza-impulsora.html>