CUADERNO FIRP S501-A

MODULO DE ENSEÑANZA EN FENOMENOS INTERFACIALES

en español

UNIDADES, PATRONES y CONVERSIONES

****

Jean-Louis Salager

LABORATORIO DE FORMULACION, INTERFASES REOLOGIA Y PROCESOS

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Mérida-Venezuela
Versión # 2 (1993)

TABLA DE CONTENIDO

1. SISTEMAS DE UNIDADES

1.1. MAGNITUDES MEDIBLES

Se llama **magnitud** todo lo que puede eventualmente variar, es decir aumentar o disminuir. Una fuerza, una longitud, una temperatura, una masa… son magnitudes.

Se dice que una magnitud es **cuantificable** si se puede definir de alguna forma una relación de orden de tipo inferior/superior, y por consecuencia una relación de igualdad.

Se dice que una magnitud es **medible** si se puede definir una relación de igualdad y una relación de adición; como consecuencia se le puede aplicar las cuatro operaciones a una magnitud medible, y una magnitud medible es por lo tanto cuantificable.

Por ejemplo el área es una magnitud medible. Se pueden igualar áreas, se pueden sumar áreas y se pueden clasificar áreas según un criterio de rango.

Al contrario la inteligencia es solo una magnitud eventualmente cuantificable. Se pueden comparar inteligencias, incluso igualar dos inteligencias de acuerdo a un cierto puntaje obtenido en una prueba; pero no se pueden sumar inteligencias, no se puede decir que una persona es dos veces más inteligente que otra porque su puntaje de prueba es aritméticamente el doble.

Si no son medibles, no se les puede aplicar a las magnitudes cuantificables los conceptos clásicos de estadística, sino los llamados de estadística no paramétrica. La diferencia es importante y el debate está todavía abierto en varios campos como la evaluación del rendimiento de un aprendizaje. En efecto la utilización de notas numéricas y las operaciones que se efectúan con las calificaciones numéricas o notas (promedio, ponderación) implican que son magnitudes medibles, y eso es controversial porque un 18 no es necesariamente dos veces mejor que un 9 ¡al menos no está claro que significa dos veces mejor!

A continuación se considerarán solamente las magnitudes medibles.

1.2. MAGNITUDES INTENSIVAS Y EXTENSIVAS

Existen dos tipos de magnitudes medibles: las intensivas y las extensivas.

Las primeras no dependen del tamaño del sistema involucrado y puede medirse su valor en forma puntual (espacio) e instantánea (tiempo). Representan la intensidad local de un cierto fenómeno. Ejemplos de magnitudes intensivas son la presión, la temperatura, una fuerza… Las magnitudes intensivas se miden siempre respecto a una referencia, es decir como diferencia o como vector.

Al contrario las magnitudes extensivas dependen del tamaño del sistema involucrado, y a menudo varían en forma proporcional al tamaño (si las magnitudes intensivas son constantes en todas partes del sistema). Las magnitudes extensivas no pueden representar una propiedad local sino en forma infinitesimal (por ejemplo derivada). No tienen referencia particular, sino la ausencia, ya que representa una cierta cantidad de algo: masa, longitud, volumen, cantidad de movimiento…

Maxwell notó que cada forma de energía puede descomponerse en dos factores: un factor de TENSION que tiene propiedades intensivas, y un factor de EXTENSIDAD que tiene propiedades extensivas. En forma diferencial se puede escribir:

d (Energía) = Tensión x d (Extensidad)

Energía	**Tensión**	**Extensidad**
Trabajo Mecánico	Fuerza	Longitud
Energía superficial	Tensión	Area
Trabajo Neumático	Presión	Volumen
Torsión	Cupla	Angulo
Energía Eléctrica	Potencial Eléctrico	Carga
Energía Magnética	Inducción Magnética	Momento Magnético
Energía Potencial	Altura por aceleración	Masa
Energía Cinética	Velocidad	Cantidad de Mov.
Energía Química	Potencial Químico	Número de Moles
Calor	Temperatura (abs)	Entropía)

La descomposición de la energía en dos factores corresponde a una realidad física. No es lo mismo levantar 1 Kg. de 0 a 10 m, que 10 Kg. de 0 a 1 m, aunque se gaste el mismo trabajo.

Los cambios energéticos son producto de una transferencia de extensidad entre dos focos de tensión, la cual tiende a reducir la diferencia de tensión, hasta llegar al estado de equilibrio en el cual todas las tensiones son iguales en todas partes. En los cambios energéticos se conservan todas las extensidades, con excepción de la entropía, la cual puede crecer (según el 2º principio de la termodinámica).

Las magnitudes intensivas y extensivas no se suman de igual forma. Las extensidades se suman algebráicamente en forma convencional, mientras que las intensidades deben sumarse como vectores diferencias, haciendo coincidir la extremidad del primero con el origen del segundo. Esto proviene del hecho de que una intensidad mide una diferencia de magnitud entre dos puntos o entre un punto y una referencia.

Finalmente se notará que la intensidad de corriente (eléctrica) es una variable extensiva a pesar de su nombre.

1.3 MEDIDA Y UNIDAD DE MEDIDA

Para medir una magnitud se busca cuántas veces esta magnitud está contenida en una magnitud de misma dimensión llamada **unidad.** Dicha relación se llama **medida** de la magnitud con la unidad correspondiente. Esta operación requiere el concepto de división e implica que se trate de una magnitud medible. Para medir una magnitud se debe por lo tanto:

••• Definir la magnitud unidad

••• Definir el criterio de comparación con la unidad

La aritmética elemental indica que:

••• La relación de dos magnitudes de misma especie M_1 y M_2 es igual a la relación de los números m_1, m_2 que las miden con la misma unidad.

$$M_1/M_2 = m_1 / m_2 \qquad \text{(misma unidad)}$$

••• La relación entre los números m_1, m_2 miden la misma magnitud con dos unidades diferentes $<U_1>^2$ $<U_2>$ es igual al inverso de la relación entre las unidades.

$$m_1/m_2 = <U_2> / <U_1> \qquad \text{(misma magnitud)}$$

En otras palabras, si la unidad es n veces más pequeña, la medida es n veces más grande.

1.4 SISTEMA DE UNIDADES

Se podría escoger una unidad arbitraria para cada magnitud. Es lo que se hizo siglos atrás para fines de negocios. Sin embargo, tal tipo de procedimiento es incoherente, y no resulta en lo que se llama un sistema de unidades.

Por ejemplo se sabe que con cualquier unidad, el volumen de un paralelepípedo recto es proporcional al área de su base A y a su altura H. La fórmula para el volumen de un paralelepípedo es por lo tanto:

$$V = K \times A \times H$$

donde K es una constante de proporcionalidad. Por ejemplo, si la unidad de volumen fuera un paralelepípedo de área 9 m^2 y de altura 2 m, el volumen unitario se escribiría:

$$1 = K \times 9 \times 2$$

por lo tanto K debería tener el valor 1/18 para que se cumpla la fórmula en este sistema de unidades. Es para evitar arrastrar este coeficiente K que se usa la fórmula con coeficiente unitario para definir la unidad de volumen.

$$V = A \times H$$

Se establece así una relación entre las unidades de área, de longitud (altura) y de volumen. Así no son arbitrarias las unidades y se dispone de un sistema.
Para tener un sistema coherente de unidad, se debe:

- Escoger las unidades de base (arbitrariamente)
- Usar las leyes físicas con coeficientes unitarios para definir las otras unidades, llamadas unidades derivadas.

NOTA Nº 1: Las unidades de base pueden ser arbitrarias pero deben ser independientes (ver dimensión)

NOTA Nº 2: Las unidades de base se escogen tales que las fórmulas empleadas para definir las unidades derivadas permitan mediciones precisas.

Por ejemplo, se puede definir la noción de masa a partir de la Ley de Newton y de la la Ley de la atracción universal.

$$\text{Fuerza} = \text{masa x aceleración} = \frac{\text{masa x longitud}}{(\text{tiempo})^2}$$

$$\text{Fuerza} = \text{coeficiente x} \quad \frac{(\text{masa}) \text{ x } (\text{masa})}{(\text{longitud})^2}$$

Igualando las dos fuerzas y dándole un valor numérico al coeficiente, se puede definir la unidad de masa en términos de longitud, tiempo y valor del coeficiente. Sin embargo es muy difícil realizar un experimento preciso sobre la atracción universal: por lo tanto se prefiere tomar una unidad arbitraria de masa y definir la unidad de fuerza con la primera ecuación, y el coeficiente con la segunda.

1.5 DIMENSION DE UNA MAGNITUD/UNIDAD

Para realizar cambios de unidad y para utilizar fórmulas numéricas es cómodo utilizar las fórmulas simbólicas llamadas **ecuación de dimensión**. Tomamos el ejemplo de la velocidad, la cual se define por la fórmula:

$$\text{Velocidad} = \text{longitud/tiempo} \quad v_1 = l_1/t_1$$

Esta fórmula establece que existe una relación numérica entre tres números v_1, l_1, t_1. En otro sistema de unidad para el cual se usen las mismas convenciones de definición de las unidades se obtendrá:

$$v_2 = l_2/t_2$$

de donde:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{l_1}{l_2} \text{ x } \frac{t_2}{t_1}$$

La relación v_1/v_2 de dos números que miden la misma magnitud es igual a la relación inversa de las unidades utilizadas $<V_2>/<V_1>$, de donde:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{<V_2>}{<V_1>} \qquad \frac{l_1}{l_2} = \frac{<L_2>}{<L_1>} \qquad \frac{t_2}{t_1} = \frac{<T_1>}{<T_2>}$$

Escribiendo la relación anterior después de sustituir las unidades se obtiene

$$\frac{<V_2>}{<V_1>} = \frac{<L_2>}{<L_1>} \Big/ \frac{<T_2>}{<T_1>}$$

lo que puede escribirse con el símbolo $[M] \equiv \langle M_2 \rangle / \langle M_1 \rangle$

$$[V] = [L]\,[T]^{-1} \text{ o simplemente } V = LT^{-1}$$

Esta relación se llama **ecuación de dimensión** para la velocidad. Es una ecuación entre unidades de magnitudes de misma especie, es decir una relación entre números.

Permite de una parte verificar la homogeneidad de las fórmulas; en efecto las fórmulas que dan cuenta de las leyes físicas no deben depender del sistema de unidades. Por lo tanto los dos miembros de una ecuación deben siempre tener la misma ecuación de dimensión, o dimensión (en abreviado).

Por otra parte la ecuación de dimensión permite realizar fácilmente los cálculos relativos a los cambios de unidad.

Finalmente la ecuación de dimensión de una unidad derivada es la misma que la de la ecuación entre valores numéricos que permite definir esta unidad. Es cómodo usar sólo dimensiones de unidades fundamentales para conocer la dimensión de una nueva unidad. Por ejemplo se sabe que:

Velocidad	=	longitud/tiempo	$V = LT^{-1}$
Aceleración	=	velocidad/tiempo	$g = VT^{-1} = LT^{-2}$
Fuerza	=	masa x aceleración	$F = MLT^{-2}$
Energía	=	fuerza x longitud	$W = FL = ML^2\,T^{-2}$

En un sistema coherente que use como unidades de masa, longitud y tiempo, respectivamente el gramo (g), el centímetro (cm) y el segundo (s) la unidad de energía será el g. cm^2/s^2 ó erg; en un sistema coherente que usa como unidades de masa, longitud y tiempo, respectivamente el kilogramo (kg), el metro (m) y el segundo (s) tal unidad será el kg. m^2/s^2 o Joule.

Para hallar la conversión en unidades del primer sistema en el segundo se usa la ecuación de dimensión: $W = ML^2T^{-2}$

$$\frac{\text{Joule}}{\text{erg}} = \frac{\text{kg}}{\text{g}} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{cm}^2} \;\Big/\; \frac{\text{s}^2}{\text{s}^2} = 10^7$$

La ecuación de dimensión puede eventualmente permitir determinar la homogeneidad de una fórmula; por ejemplo la frecuencia de vibración de una cuerda sometida a una fuerza de tensión es:

$$f = (1/2d) \quad (F/m)^{1/2}$$

donde f es la frecuencia (T^{-1}), d la longitud (L), F la fuerza de tensión (MLT^{-2}) y m la masa de la cuerda por unidad de longitud (ML^{-1}). Escribiendo la dimensión de ambos lados:

$$T^{-1} = L^{-1} \left(MLT^{-2} / ML^{-1}\right)^{1/2}$$

Se puede también utilizar la ecuación de dimensión para precisar una fórmula. Supongamos que en el caso anterior se sepa solamente que la frecuencia de una cuerda vibrante depende de su longitud d, de la fuerza de tensión F y de la masa por unidad de longitud m. Se escribe una fórmula con exponentes desconocidos a, b, c:

$$f = K\, d^a\, F^b\, m^c$$

donde K es una constante sin dimensión (número). Se escribe la igualdad de las dimensiones.

$$T^{-1} = L^a \quad (MLT^{-2})^b \quad (ML^{-1})^c \quad = \quad L^{a + b - c} \; M^{b+c} \; T^{-2b}$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión, obteniendo el sistema

$$\begin{array}{ll} 0 = a + b - c & \text{(exponentes de L)} \\ 0 = b + c & \text{(exponentes de M)} \\ -1 = -2\,b & \text{(exponentes de T)} \end{array}$$

Cuya solución es: $a = -1$, $b = 1/2$, $c = -1/2$. Por lo tanto:

$$f = (K/d) \quad (F/m)^{1/2}$$

falta sólo por determinar el valor de la constancia de proporcionalidad K.

1.6 PATRONES

Un **patrón** es una cantidad que permite definir en forma simple y precisa una unidad. La ciencia y la tecnología requieren la definición de patrones confiables y reproducibles con el fin de cuantificar las varias cantidades o magnitudes que caracterizan las unidades de base.

Antes de que se desarrollara la ciencia moderna se utilizaron sistemas de pesos y medidas para fines de comercio y negocios. Todos estos patrones y unidades se basaban sobre una propiedad de un artefacto. Los Griegos usaban como patrón de longitud el pie (de Apolo), los Fenicios el codo y los Romanos el paso. Poco a poco se tuvo que utilizar patrones mejor definidos. Así se crearon los estandares. Originalmente el metro era la diez millonésima parte del cuadrante terrestre, lo que no era ni muy preciso, ni fácil de medir.

Desde el año 1970, el único patrón basado sobre un artefacto es el kilogramo. Todos los demás se han definido a partir de fenómenos físicos absolutos, cuyo alcance ha sido permitido por los avances tecnológicos.

1.7 SISTEMAS UTILIZADOS

La historia vio desfilar varios sistemas de unidades, cada vez mejores y más sofisticados. Los cambios de sistemas se hacen en forma muy cuidadosa porque implican consecuencias sociales y económicas muy serias, en particular cuando el cambio es drástico como aquel del pase de unidades anglo-sajones a unidades métricas.

A pesar de que los científicos hayan reconocido hace más de un siglo las ventajas del sistema métrico, tal cambio ha sido muy lento y todavía no ha terminado de efectuarse incluso en paises muy industrializados como EUA o UK, y eso por dos razones; la primera es la inercia social al cambio, la cual puede durar varias generaciones; la segunda, que favorece la primera, es que la información disponible lo es en base a las antiguas unidades.

Se recordará que fue en 1886 que se legalizó el sistema métrico en los EUA, pero solo las unidades que se referían a fenómenos nuevos en aquella época (por ejemplo electricidad) pertenecen al sistema métrico. Las unidades de masa, longitud, y derivadas, es decir las de uso común en la vida corriente permanecen en este país relacionadas con el viejo sistema inglés.

En ciertos casos la costumbre es demasiado fuerte, en particular cuando la unidad por exótica que sea, permite visualizar una cantidad. Por ejemplo se evalúa el volumen de un yacimiento petrolero en “acre-foot” en los EUA, y podría ser en Venezuela en “hectárea-metro”; tiene sentido porque representa un volumen dándose la superficie y la altura, pero es inconsistente Incluso hay ciertas unidades muy empleadas como la psi (pound-force per square inch) que usan en su definición dos unidades diferentes de la misma magnitud (Véase sección 4.2.3).

Al lado del sistema basado sobre unidades anglo-sajones, existen los varios sistemas métricos, cuya base es una relación decimal en casi todos los casos. Los principales son el sistema CGS (centímetro-gramo-segundo) y el sistema MKSA (metro-kilogramo-segundo-amperio). Este último se ha transformado recientemente en el Sistema Internacional, en abreviación SI.

2. SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

El sistema internacional de unidades (SI) comprende tres tipos de unidades: 7 unidades de base, 2 unidades complementarias, y 15 unidades derivadas. (Véase Tabla 1).

Las unidades SI de cualquier otra magnitud se derivan por multiplicación y/o división de las unidades SI de base sin introducción de un factor de conversión, lo que es muy simple cuando se dispone de la información acerca de la dimensión de la unidad.

Las unidades SI se usan como un conjunto de 14 prefijos para formar múltiples o submúltiples decimales. (Véase Tabla 2). Tal práctica permite emplear en cada caso la unidad más apropiada para evitar el manejo de cifras demasiado grandes o demasiado pequeñas. Por ejemplo se expresará una capacidad en picofarad, una distancia en micrómetro o kilómetro según el caso, etc.

2.1. UNIDADES SI DE BASE

2.1.1. Metro (m), Dimensión longitud (L)

El metro se define como 1 650 763,73 veces la longitud de onda en el vacío de la radiación rojo - naranja que corresponde a la transición $2p_{10}$ - $5d_5$ del átomo de Kripton 86 $_{Kr}$.

2.1.2 Kilogramos (kg), Dimensión masa (M)

El kilogramo patrón es un cilindro de aleación de platino (90%) e iridio (10%) depositado en el Buró Internacional de Pesos y Medidas en Sevres-Francia; es el único patrón basado sobre un artefacto. Anteriormente se tomó como kilogramo la masa de un dm^3 de agua a su máxima densidad, pero mediciones precisas mostraron que un kilogramo de agua ocupan exactamente 1.0000 028 dm^3.

2.1.3 Segundo (s), Dimensión Tiempo (T)

El segundo se define como la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado de base del Cesio ^{133} Cs.

2.1.4 Amperio (A), Dimensión corriente eléctrica (A)

Se define el amperio como la corriente eléctrica constante, que cuando mantenida en dos conductores paralelos infinitos de diámetro despreciable y situados a un metro uno de otro en el vacío, produce entre estos conductores una fuerza de 2 10-7 N por metro de longitud. El Newton (N) se define como el kg.m/s^2.

Antes de 1948 se usaba el Amperio internacional (A_{int}) definido como la corriente que por electrólisis de una solución de nitrato de plata en agua deposita 0,001 118 g de plata por segundo. 1 A_{int} = 0,999 850 A.

2.1.5 Kelvin (K), Dimensión Temperatura (q)

Se define el Kelvin, unidad de Temperatura Termodinámica, como el 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. El término grado Kelvin (˚K) fue reemplazado en 1967 por Kelvin (K).

2.1.6 Mol, Dimensión mol (mol)

Un mol es la cantidad de sustancia, en unidad de masa específica, igual al peso molecular de esta sustancia. Por ejemplo g-mol, lb-mol.

2.1.7 Candela (cd), Dimensión intensidad luminosa (I)

Una candela es la intensidad luminosa de 1/600 000 m^2 de un cuerpo negro a la temperatura de congelación del platino (2042 K) bajo una presión de 101 325 N/m^2.

TABLA 1: UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

UNIDADES DE BASE

Cantidad	Dimensión	Nombre	Símbolo
Longitud	L	Metro	m
Masa	M	Kilogramo	kg
Tiempo	T	Segundo	s
Corriente Eléctrica	A	Amperio	A
Temperatura	q	Kelvin	K
Cantidad de Sustancia	mol	Mol	mol
Intensidad Luminosa	I	Candela	cd

UNIDADES COMPLEMENTARIAS

Angulo Plano	Radian		rad
Angulo Sólido	Stereoradian		sr

UNIDADES DERIVADAS

Cantidad	Dimensión	Nombre	Símbolo
Energía	(ML^2T^{-2})	Joule	J
Frecuencia	(T^{-1})	Hertz	H
Fuerza	(MLT^{-2})	Newton	N
Presión	$(ML^{-1}T^{-2})$	Pascal	Pa
Potencia	(ML^2T^{-3})	Watio	W
Capacidad Eléctrica	$(M^{-1}L^{-2}T^4A^2)$	Farad	F
Carga Eléctrica	(AT)	Coulombio	C
Conductancia Eléctrica	$(M^{-1}L^{-2}T^3A^2)$	Siemens	S
Inductancia Eléctrica	$(ML^2T^{-2}A^{-2})$	Henry	H
Potencial (dif.) Eléctrica	$(ML^2T^{-3}A^{-1})$	Voltio	V
Resistencia Eléctrica	$(ML^2T^{-3}A^{-2})$	Ohmio	Ω
Flujo Magnético	$(ML^2T^{-2}A^{-1})$	Weber	Wb
Inducción Magnética	$(MT^{-2}A^{-1})$	Tesla	T
Flujo Luminoso	(I)	Lumen	lm
Iuminación	(IL^{-2})	Lux	lx

TABLA 2: PREFIJOS PARA MULTIPLOS Y SUBMULTIPLOS

Múltiples y Submúltiples			Prefijo	Símbolo
1 000 000 000 000	=	10^{12}	Tera	T
1 000 000 000	=	10^{9}	Ciga	G
1 000 000	=	10^{6}	Mega	M
1 000	=	10^{3}	Kilo	k
100	=	10^{2}	Hecto	h
10	=	10	Deca	da
0,1	=	10^{-1}	Deci	d
0,01	=	10^{-2}	Centi	c
0,001	=	10^{-3}	Mili	m
0,000 001	=	10^{-6}	Micro	μ
0,000 000 001	=	10^{-9}	Nano	n
0,000 000 000 001	=	10^{-12}	Pico	p

REGLAS:

- Se pega el símbolo del prefijo junto a la unidad que modifica escribiéndose kg, cm, nm, mPa.s, MW, mm/ns.
- Se usa un sólo prefijo; no se escribe nmF sino pF.
- La elevación a una potencia involucra el prefijo: $cm^2 = (cm)^2$

2.1.8 Radian (rad) (Unidad complementaria)

Un ángulo plano de un radian delimita un arco de circunferencia igual al radio del círculo.

1 rad = 57,296° = 570° 17' 45". Circunferencia = 2 π rad

2.1.9 Steradian (sr) (Unidad complementaria)

Un ángulo sólido de 1 steradian sostiene desde el centro de una esfera de radio r un área igual a r^2. Esfera = 4 π sr

2.2 DIMENSION DE UNA UNIDAD DERIVADA

Se definen las unidades derivadas mediante la utilización de fórmulas que traducen las leyes físicas entre magnitudes. Como se vio en la sección 1.5, la ecuación de dimensión de la unidad derivada es la misma que la fórmula que permite definir la unidad. **En el sistema SI todas estas fórmulas poseen coeficientes unitarios.**

La dimensión de todas las unidades derivadas se expresa en función de las dimensiones de las unidades fundamentales: M, L, T, A, θ, mol, I (Véase Tabla 1).

Se vio en la Sección 1.5 que mediante una cadena de fórmulas con coeficientes unitarios se llega a la dimensión ML^2T0^{-2} para la magnitud energía. La unidad SI de energía se llama el Joule, pero es solo por comodidad que se le dio un nombre, ya que de acuerdo a la dimensión:

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ kg.m}^2\text{.s}^{-2}$$

Similarmente la unidad SI de potencial eléctrico (dimensión) $ML^2T^{-3}A^{-1}$) se llama voltio, pero no es más que el $\text{kg.m}^2\text{.s}^{-3}\text{.A}^{-1}$.

2.3 UNIDADES DERIVADAS DE LAS UNIDADES DE BASE

2.3.1 Energía: Joule (J), Dimensión ML^2T^{-2}

El Joule (J) es la unidad de todas las formas de energía (mecánica, térmica, eléctrica). En mecánica es igual al trabajo de una fuerza de 1 N sobre 1 m; en electricidad es la energía de 1 W.s; desde 1948 el Joule ha reemplazado la caloría como cantidad de calor.

Fórmula: energía = fuerza x longitud = potencia x tiempo

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ W.s} = 1/4{,}1868 \text{ calorías}$$

2.3.2 Frecuencia: Hertz (Hz), Dimensión T^{-1}

Un Hertz (Hz) es la frecuencia de un fenómeno cuyo período es 1 s.

1 Hz = 1 ciclo por segundo

2.3.3 Fuerza: Newton (N) Dimensión MLT^{-2}

El Newton (N) es la fuerza que produce sobre una masa de 1 kg. una aceleración de 1 $m.s^{-2}$. Como consecuencia de las definiciones de la unidad de carga (Coulombio) y potencial (voltio), es también la fuerza producida sobre una carga de 1 C por un campo eléctrico de 1 $V.m^{-1}$.

Fórmula: Fuerza = masa x aceleración
Fuerza = carga x campo eléctrico

$1\ N = 1\ kg.m.s^{-2} = 1\ C.V.\ m^{-1}$

2.3.4 Presión: Pascal (Pa) Dimensión $ML^{-1}T^{-2}$

Un Pacal (Pa) es la presión que resulta de una fuerza de 1 N aplicada sobre un área de 1 m^2.

Fórmula: Presión = Fuerza/Area $1\ Pa = 1\ N/m^2$

2.3.5 Potencia: Watt (W) Dimensión ML^2T^{-3}

Un Watt (W) es la unidad de todas las formas de potencia (mecánica, térmica, eléctrica). Es la disipación de una energía de 1 J por s. En electricidad se prefiere referirlo como 1 A por 1 V. (1 V.A), que es lo mismo.

Fórmulas: Potencia = Energía/Tiempo
= Intensidad de corriente x diferencia de potencial.

2.3.6 Capacidad eléctrica: Farad (F) Dimensión $M^{-1}L^{-2}T^4A^2$

Un Farad (F) es la capacidad de un condensador que adquiere una carga de 1 C cuando se carga con una diferencia de potencial de 1 V. El farad es una unidad demasiado grande para los condensadores reales; se usan los submúltiplos μF, nF y pF.

Formula: Capacidad = Carga/diferencia de potencial $1\ F = 1\ C/V$

2.3.7 Carga Eléctrica: Coulombio (C) Dimensión AT

Un Coulombio (C) es la cantidad de carga eléctrica transportada por una corriente de 1 A durante 1 s.

Fórmula: Carga = Intensidad x tiempo 1 C = 1 A.s

2.3.8 Conductancia eléctrica: Siemens (S) Dimensión $M^{-1}L^{-2}T^{3}A^{2}$

Un Siemens (S) es la conductancia de un elemento que posee una resistencia de 1 Ω. Esta unidad se llama también mho ó Ω^{-1}.

Fórmula: Intensidad = Conductancia x diferencia de potencia 1 S = 1 A/V

2.3.9 Inductancia Eléctrica: Henry (H) Dimensión $ML^{2}T^{-2}A^{-2}$

Un Henry (H) es la inductancia de una bucla cerrada que produce un flujo magnético de 1 Wb por cada amperio de corriente que lo atraviesa.

2.3.10 Potencial eléctrico: Voltio (V) Dimensión $ML^{2}T^{-3}A^{-1}$

Un Voltio (V) es la unidad de diferencia de potencial y de fuerza electromotriz. Un voltio es la diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor tal que una corriente de 1 A entre dos puntos de un conductor tal que una corriente de 1 A disipe una potencia de 1 W.

Formula: Potencia = Intensidad x diferencia de potencial

2.3.11 Resistencia Eléctrica: Ohmio (Ω) Dimensión $ML^{2}T^{-3}A^{-2}$

Un Ohmio (Ω) es la resistencia entre dos puntos de un conductor pasivo, tal que una diferencia de potencial de 1 V resulta en una corriente de 1 A.

Fórmula = Dif. de potencial = resistencia x Intensidad

2.3.12 Flujo Magnético: Weber (Wb) Dimensión $ML^2T^{-2}A^{-1}$

Un Weber (Wb) es el flujo magnético que pasa por un área de 1 m^2 perpendicular a un campo de inducción magnética de 1 Tesla (T).

Fórmula: $1Wb = 1\ T.m^2 = 1\ V.s$

2.3.13 Inducción Magnética: Tesla (T) Dimensión $MT^{-2}A^{-1}$

Un Tesla (T) es la densidad de flujo magnético (inducción magnética) de un campo uniforme que produce una cupla de 1 N.m sobre una espiral plana cerrada que transporta una corriente de 1 A y posee una sección recta de 1 m^2 perpendicular al campo.

Fórmula: $1\ T = 1\ N.m/(A.m^2)$

2.3.14 Flujo luminoso: lumen (lm) e Iluminación: lux (lx)

Un lumen (lm) es el flujo luminoso de una fuente puntual de intensidad luminosa de 1 cd en un cono de ángulo sólido 1 sr.

Un lux (lx) es la iluminación producida por un flujo luminoso de 1 lm sobre un área de 1 m^2.

$1\ lm = 1/4\ \pi\ cd$ $\qquad$ $1\ lux = 1\ lm/m^2$

3. SISTEMA CGS

3.1 UNIDAD CGS DE BASE

Longitud (L): centímetro (cm)	1 cm = 10^{-2} m (SI)
Masa (M): gramo (g)	1 g = 10^{-3} kg (SI)
Tiempo (T): segundo, misma unidad que en SI	

3.2 UNIDADES CGS MECANICAS DERIVADAS

Se usan las mismas fórmulas que en el sistema internacional

Velocidad (LT^{-1}):	cm/s
Aceleración (LT^{-2}):	cm/s^2 ó galileo
Fuerza (MLT^{-2}):	g.cm/s^2 ó dina
Energía (ML^2T^{-2}):	g.cm^2/s^2; dina.cm ó erg
Potencia (ML^2T^{-3}):	erg/s
Presión ($ML^{-1}T^{-2}$):	dina/cm^2

3.3 UNIDAD ADICIONAL DE BASE DEL SISTEMA CGS ELECTROSTATICO

Las unidades eléctricas se deducen de la aplicación de la fórmula de Coulomb que da la fuerza de repulsión electrostática f entre dos cargas q_1 y q_2 situadas en el vacío a distancia r.

$$f = (1/4\ \pi\ \varepsilon_o)\ q_1 q_2\ /\ r_2$$

Se definen las unidades CGS electrostáticas tomando como **permitividad** del vacío $\varepsilon_o = 1/4\ \pi$ como base; por lo tanto la fórmula de Coulomb se escribe:

$$f = q_1 q_2\ /\ r^2$$

lo que permite definir la unidad de carga en función de las unidades de fuerza y de distancia.

El Franklin es la carga eléctrica que colocada en el vacío a 1 cm de una carga idéntica la repele con una fuerza de 1 dina (g.cm s^{-2})

3.4 UNIDADES DERIVADAS DEL SISTEMA CGS ELECTROSTATICO

Las otras unidades del sistema CGS electrostático se deducen de la carga (Franklin) con las fórmulas usuales. No tienen nombre particular; se menciona UESCGS.

3.5 UNIDAD ADICIONAL DE BASE DEL SISTEMA CGS ELECTROMAGNETICO

Las unidades electromagnéticas se deducen de la aplicación de la fórmula de Biot y Savart (llamada a veces fórmula de Amperio) que da la diferencia dB del campo de inducción magnética producido en un punto en el vacío por un elemento de circuito de longitud d1 situado a distancia r y atravesado por una corriente i.

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \quad \frac{i \ dl}{r^2} \quad \text{sen } \theta$$

donde θ es el ángulo formado por el elemento dl y el vector r. En cuanto a la constante, μ_o se llama **permeabilidad** magnética del vacío.

Aplicando la ley de Biot a dos circuitos rectilíneos paralelos situados en el vacío a distancia “a” y atravesado por la misma intensidad “i”, se puede calcular la fuerza ejercida (repulsiva o atractiva según que las corrientes son de sentido opuesto o no) por unidad de longitud “l” (Ley de Laplace).

$$f = B \ i \ l = \frac{\mu_o}{2\pi} \quad \frac{i^2 \ l}{a}$$

Esta fórmula es la que se utilizó para definir el Amperio en el sistema SI, con $\mu_o = 4 \pi \ 10^{-7}$ H/m.

Se definen las unidades CGS electromagnéticas tomando como **permeabilidad** del vacío $\mu_o = 4 \pi$. La fórmula de Laplace se torna:

$$f = 2 \ i^2 \ \ l / a$$

3.6 UNIDADES DERIVADAS del SISTEMA CGS ELECTROMAGNETICO

La fórmula de Laplace define la unidad de corriente a partir de las unidades mecánicas, una vez que se ha tomado el valor de la permeabilidad del vacío $\mu_o = 4\pi$

Comparando con la definición del Amperio con la misma fórmula, se aplica la ecuación de dimensión.

$$2\ A^2 = 2\ .\ 10^{-7}\ N \quad y \quad 2\ (UEMCGS)^2 \ = \ 2\ dinas$$

$$\frac{A^2}{UEMCGS^2} = \frac{10^{-7}\ N}{dina} = 10^{-7} \quad MLT^{-2} = 10^{-7}\ \frac{kg}{g}\ \frac{m}{cm}\ \frac{s^{-2}}{s^{-2}} = 10^{-2}$$

Por lo tanto:

1 UEMCGS = 10 A = 1 daA (decaAmperio)

A partir de la unidad de intensidad se deducen las otras unidades eléctricas, con las fórmulas usuales. Dos unidades poseen un nombre particular, las otras se refieren como UEMCGS.

Flujo magnético ($ML^2T^{-2}A^{-1}$): Maxwell = 10^{-8} Wb
Inducción magnética ($MT^{-2}A^{-1}$): Gauss = 10^{-4} Tesla

3.7 RELACION ENTRE LOS SISTEMAS CGSES, CGSEM y SI

Se enlazan los diferentes sistemas mediante las fórmulas de Coulomb y de Laplace que se usan para definir las unidades.

$$f = \frac{1}{4\ \pi\varepsilon_o}\ \frac{q^2}{r^2} \qquad ; \qquad f = \frac{\mu_o}{2\pi}\ \frac{i^2 l}{a}$$

En cualquier sistema:

$$1\ (MLT^{-2}) \ = \ \frac{1}{4\ \pi\varepsilon_o}\ \frac{1\ (A.T)^2}{1\ L^2} \ = \frac{1}{4\ \pi e_o}\ (A.T.L^{-1})^{\ 2}$$

$$1\ (MLT^{-2}) = \frac{\mu_o}{2\pi} \quad \frac{1\ (A)^2\ 1\ L}{1\ L} \quad = \frac{\mu_o}{2\pi}\ (A)^{\ 2}$$

Tomando la relación entre las dos fuerzas se obtiene que el producto $\mu_o\ \varepsilon_o$ debe tener la dimensión del inverso del cuadrado de una velocidad.

El término $4\ \pi\ \varepsilon_o$ tiene la dimensión $M^{-1}L^{-3}T^4A^2$ de una capacidad eléctrica por unidad de longitud.

En SI: $4\ \pi\ \varepsilon_o = (1/9)\ 10^{-9}$ F/m

$$\varepsilon_o = (1/36\ \pi)\ 10^{-9} = 8{,}854185\ 10^{-12}\ \text{F/m}$$

El término $\mu_o/2\ \pi$ tiene la dimensión $MLT^{-2}A^{-2}$ de una inductancia por unidad de longitud.

En SI $\mu_o = 4\ \pi\ 10^{-7} = 1{,}256\ 64\ 10^{-6}$ H/m)

En cualquier sistema de unidad, se obtiene la relación

$$\mu_o\ \ \varepsilon_o\ c^2 = 1 \qquad\qquad \text{(sin dimensión)}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío expresada en la unidad del sistema correspondiente:

$$c = 2{,}997\ 925\quad 10^8\ \ \text{m/s}\ \ \neq\neq\ \ 3\ 10^8\ \text{m/s}$$

En sistema CGSES $\varepsilon_o = 1/4\ \pi$ UESCGS, por lo tanto:

$$\mu_o\ /4\pi = (1/9)\ 10^{-20}\ \text{UESCGS}$$

En sistema CGSEM $\mu_o\ = 4\ \pi$ UEMCGS, por lo tanto:

$$4\ \pi\ \varepsilon_o = (1/9)\ 10^{-20}\ \text{UEMCGS}$$

Usando cualquiera de las fórmulas se puede establecer la equivalencia de las unidades. Para la intensidad se usa la fórmula de Laplace, reemplazando $\mu_o/2\pi$ por el valor correspondiente al sistema de unidad:

SI	f (N)	=	$2\ 10^{-7}\ \ i^2\ (A)^2$
CGSES	f (dina)	=	$2/9\ \ 10^{-20}\ i^2\ (UES)^2$
CGSEM	f (dina)	=	$2\ i^2\ (UEM)^2$

Ya que 1 N = 10^5 dinas, f (N) = 10^{-5} f (dina). Para una misma fuerza, por ejemplo igual a 1 dina ó 10^{-5} N.

$$\begin{array}{l} \text{ES} \longrightarrow \\ \text{ES} \longrightarrow \end{array} \frac{2/9\ 10^{-20}\ \ i^2\ (\text{UES})^2}{2\ i^2\ (\text{UEM})^2} = 1$$

$$\begin{array}{l} \text{SI} \longrightarrow \\ \text{EM} \longrightarrow \end{array} \frac{2\ 10^{-7}\ i^2\ (\text{A})^2}{2\ i^2\ (\text{UEM})^2} = 10^{-5}$$

La relación entre dos unidades es inversa a las relaciones que miden la misma magnitud con estas unidades, de donde la relación entre las unidades de intensidad de corriente:

$$1\ \text{UEMCGS} = 10\ \text{A} = 3\ 10^{10}\ \ \text{UESCGS}$$

La correspondencia de las demás unidades se deduce inmediatamente de la aplicación de la ecuación de dimensión por ejemplo para el potencial ($ML^2T^{-3}A^{-1}$):

$$\frac{1\text{UEM}}{1\ \text{V}} = \frac{10^{-3}\ \text{kg}}{\text{g}}\ \frac{10^{-4}\ \text{m}^2}{\text{cm}^2}\ \frac{\text{s}^{-3}}{\text{s}^{-3}}\ \frac{10^{-1}\ \text{daA}^{-1}}{\text{A}^{-1}} = 10^{-8}$$

TABLA 3: UNIDADES SI, UEMCGS y UESCGS

Propiedad	**Dimensión**	**SI =**	**1 UEM =**	**1 UES =**
Intensidad	A	1 A	10 A	10/3 10^{-10} A
Carga	AT	1 C	10 C	10/3 10^{-10} C
Potencial	$ML^2T^{-3}A^{-1}$	1 V	10^{-8} V	300 V
Capacidad	$M^{-1}L^{-2}T^4A^2$	1 F	10^9 F	10^{-11}/9 F
Resistencia	$ML^2T^{-3}A^{-2}$	1	10^{-9} Ω	9.10^{-11} Ω
Inductancia	$ML^2T^{-2}\ A^{-2}$	1 H	10^{-9} H	9 10^{-11} H
Flujo Magnético	$ML^2T^{-2}\ A^{-1}$	1 Wb (Maxwell)	10^{-8} Wb	300 Wb
Inducción Mag.	$MT^{-2}A^{-1}$	1 T (Gauss)	10^{-4} T	3. 10^6 T

4. SISTEMAS ANGLO-SAJONES

No hay un sistema anglo sajón, sino tres, los cuales están fundamentados sobre unidades de base diferentes:

••• Inglés absoluto
Masa: libra (lb), longitud: pie (ft), tiempo: segundo (s)

••• Inglés ingenieril
Longitud: ft, tiempo: s, fuerza: libra fuerza (lbf)

••• Americano Ingenieril
Masa lb, longitud: ft, tiempo: s, fuerza: libra fuerza (lbf)

En el primero se siguen las mismas técnicas de generación de unidades que en los sistemas SI o CGS, usando fórmulas físicas y coeficiente unitario. En el segundo se deduce la unidad de masa y se obtiene una situación similar. En el tercero se debe introducir coeficientes en las fórmulas ya que hay cuatro unidades de base, de los cuales sólo tres son independientes.

4.1 SISTEMA INGLES ABSOLUTO

4.1.1 Unidades de base

Masa: libra masa avoirdupoids (lb) 1 lb = 0,453592 kg
Longitud: pie (ft) 1 ft = 0,3048 m
Tiempo: segundo (s)

4.1.2 Unidades derivadas

Velocidad (LT^{-1}): ft/s
Aceleración (LT^{-2}): ft/s^2
Aceleración de la gravedad (estandard) $g_s = 32{,}174$ ft/s^2
Fuerza (MLT^{-2}): poundal (pdl) 1 pdl = 1 lb. ft/s^2
Presión ($ML^{-1}T^{-2}$) debería ser el pdl/ft^2, pero esta unidad no se utiliza; más bien se usa lbf/ft^2 ó lbf/in^2 (psi).
Energía (ML^2T^{-2}): ft.pdl poco utilizado; se prefiere usar ft.lbf, y más que todo Btu, Hp.h, kW.h
Potencia (ML^2T^{-3}): ft.pdl/s, que no se utiliza; se prefiere usar el caballo vapor Hp, o la Btu/h.

4.2 SISTEMA INGLES INGENIERIL

4.2.1 Unidades de base

Longitud: pie (ft)

Tiempo : segundo (s)

Fuerza: libra fuerza (lbf) definida como el peso de una masa de una libra en el campo gravitacional terrestre (estandar)

$$1 \text{ lbf} = 1 \text{ lb x } g_s \text{ ft/s}^2 = 32{,}174 \text{ lb.ft/s}^2$$

4.2.2 Unidad de masa: slug

Aplicando la fórmula de Newton con coeficientes unitarios se defina la masa unitaria (Masa = fuerza/aceleración)

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lbf} / 1 \text{ ft.s}^{-2} = \text{lbf.s}^2/\text{ft} = 32{,}174 \text{ lb}$$

4.2.3 Unidades derivadas

Presión ($ML^{-1}T^{-2}$): lbf/ft^2 poco utilizada: se prefiere usar la pulgada (in) como unidad de longitud (1 ft^2 = 144 in^2), aunque esto produzca una unidad (pound force per square inch: psi) que contiene a la vez ft e in, lo que es poco coherente.

$$1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf/in}^2 = 144 \text{ lbf/ft}^2 = 1 \text{ lb.ft.in}^{-2}\text{.s}^{-2}$$

4.3 SISTEMA AMERICANO INGENIERIL

4.3.1 Unidad de base

Masa:	lb (avoirdupoids)	Longitud: ft
Tiempo:	s	Fuerza: lbf

Las cuatro unidades de base no son independientes, y no se puede cumplir la fórmula de Newton con un coeficiente unitario.

$$1 \text{ lbg} = g_c \text{ x } 1 \text{ lb x } 1 \text{ ft/s}^2$$

El coeficiente gc tiene por lo tanto el valor 32,174 que es numéricamente igual a la aceleración de la gravedad estandard g_s expresada en ft/s^2.

4.3.2 Unidades derivadas

Presión ($ML^{-1}T^{-2}$): lbf/ft^2 y su múltiple lbf/in^2 (psi)
Energía (ML^2T^{-2}): lbf.ft

4.4. OTRAS UNIDADES UTILIZADAS (Véase sección 5)

Masa : libra troy, onza avoirdupoids, onza troy, grain
Longitud : pulgada (in), yarda (y)
Volumen : pulgada cúbica (in3), onza fluida, pint, quart, galón, barril.
Presión : atmósfera, pulgada de mercurio, pie de agua
Energía : Btu (British thermal unit): la cantidad de energía requerida para elevar 1 lb de agua de 1˚ F. 1 Btu = 252 cal = 1055,06 J
Otras unidades exóticas de energía: ft^3.atm, lt.atm
Potencia : Horse power (Hp)
Hp (inglés) =m 42,42 Btu/min = 550 ft.lbf/s
Hp (métrico) = 542 ft.lbf/s = 7,5 kgf.m/s

5. UNIDADES COMUNES A TODOS LOS CAMPOS

5.1 UNIDADES DE BASE

5.1.1 Masa dimensión M

kg (SI), g (cgs), lb (avoirdupoids), tonelada métrica, ton US, grain (gr), onza (oz)

1 g = 10^{-3} kg
1 lb = 0,453592 kg
1 ton met = 1000 kg
1 ton US = 1016,047 kg
1 grain (gr) = 1/7000 lb = 6,480 10^{-5} kg
1 oz (troy) = 1 oz (apothecary) = 480 gr = 0,031103 kg
1 oz (avoirdupoids) = 0,02835 kg

5.1.2 Longitud dimensión L

m (SI), cm (cgs), in (as), ft (as), yd, km, mile, mile n.

1 cm = 0,01 m
1 km = 1000 m
1 in = 0,0254 m
1 ft = 0,3048 m = 12 in
1 yd = 0,9144 m = 36 in = 3 ft
1 milla = 1 609,34 m
1 milla náutica = 1 852,00 m

Otras unidades de longitud

1 Angstrom (Å) = 10^{-10} m

1 año luz = 9,46070 10^{15} m

1 unidad astronómica = 1,495 10^{11} m

1 parsec = 3,2616 año-luz = 3,085557 10^{16} m

5.1.3 Tiempo dimensión T

s en todos los sistemas, min, h, día, año

min = 60 s 1 h = 3600 s

1 día = 88400 s

1 año solar = 365,24219 días = 365 d 5 h 49 min

1 año sideral = 365,25636 días = 365 d 6 h 9 min

5.1.4 Temperatura Dimensión θ

K (SI), ˚C, ˚K, ˚F, ˚R

La escala Kelvin (K, ˚K) de temperatura termodinámica es absoluta; el cero de la escala corresponde al cero absoluto. La escala se define por la temperatura del punto triple del agua: 273,16 K. Ya no se usa el símbolo ˚K, ni la palabra grado Kelvin, sino K: Kelvin.

La escala Celcius está todavía utilizada como escala internacional de temperatura. 1˚ C = 1 K y la escala Celcius está desplazada de 273,15˚ C respecto a la escala Kelvin. Los puntos fijos de la escala internacional de temperatura son:

Punto triple del hidrógeno: - 259,34 ˚C

Punto de ebullición (eq) del hidrógeno: - 252,87 ˚C

Punto de ebullición del neón: - 246,048 ˚C

Punto triple del oxígeno: - 218,789 ˚C

Punto de ebullición del oxígeno: - 182,962 ˚C

Punto triple del agua: 0,01 ˚C

Punto de ebullición del agua: 100 ˚C

Punto de congelación del cinc: 419,58 ˚C

Punto de congelación de la plata: 961,93 ˚C

Punto de congelación del oro: 1064,43 ˚C

La escala Fahrenheit es tal que hay 180 ˚F entre el punto de congelación y el punto de ebullición del agua, los cuales se definen respectivamente por 32˚F y 212˚F. Así 1 ˚C = 5/9 ˚F.

Temp (˚C) = 5/9 (Temp. (˚F) - 32)

Temp (˚F) = 32 + 9/5 Temp (˚C)

La escala Rankine es una escala termodinámica obsoleta basada sobre el grado ˚F.

Temp (˚R) = Temp (˚F) + 459,67

5.2 UNIDADES DE PROPIEDADES FUNDAMENTALES

5.2.1 Area Dimensión L^2

m^2 (SI), cm^2 (cgs), in^2 y ft^2 (as), área, hectárea, km^2, $mile^2$, etc.

1 cm^2 = 10^{-4} m^2	1 in^2 = 6,4516 10^{-4} m^2
1 ft^2 = 9,2903 m^2	1 área = 100 m^2
1 hectárea = 10^4 m^2	1 km^2 = 10^6 m^2
1 yd^2 = 0,836127 m^2	1 acre = 4,04686 10^3 m^2
1 $milla^2$ = 2,58999 10^6 m^2	1 $Å^2$ = 10^{-20} m^2

5.2.2 Volumen Dimensión L^3

m^3 (SI), cm^3 ó cc (cgs), in^3 y ft^3 (as), litro (l), galón (gal), barril (bbl), onza (oz), acre-ft.

1 cm^3 = 10^{-6} m^3
1 in^3 = 1,63871 10^{-5} m^3
1 ft^3 = 0,028 3168 m^3
1 l = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3
1 gal (UK) = 4,54609 10^{-3} m^3
1 gal (US) = 3,78544 10^{-3} m^3
1 bbl (petróleo) = 42 gal (US) = 0,15899 m^3
1 acre-ft (yacimiento petrolero) = 1233,483 m^3
1 oz (US fluid) = 29,57 10^{-6} m^3
1 Pint (US liq) = 0,4732 10^{-3} m^3
1 Quart (US liq) = 0,9464 10^{-3} m^3

5.2.3 Velocidad Dimensión LT^{-1}

Fórmula: Velocidad = longitud/tiempo

m/s (SI), cm/s (cgs), ft/s (as), km/h, mile/h

1 km/h = 0,277778 m/s	1 m/s = 3,6 km/h
1 ft/s = 0,3048 m/s	1 m/s = 3,28084 ft/s
1 mile/h = 0,44704 m/s	1 m/s = 2,23694 mile/h

Velocidad de la luz en el vacío: c = 2,997925 10^8 m/s

5.2.4 Velocidad angular Dimensión T^{-1}

Fórmula: Velocidad angular (ω) = d(ángulo) / d (tiempo)

en todos los sistemas: rad/s

5.2.5 Aceleración Dimensión LT^{-2}

Fórmula: Aceleración = d (velocidad) / d (tiempo)

m/s^2 (SI), cm/s^2 (cgs), ft/s^2 (as)

1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2 1 ft/s^2 = 0,3048 m/s^2

Fórmula: Peso = masa x aceleración de la gravedad (g_s)

Aceleración de la gravedad estandar (referencia BIPM Paris)

gs = 9,80665 m/s^2 = 980,665 cm/s^2 = 32,174 ft/s^2

5.2.6. Aceleración angular Dimensión rad/s^2

Fórmula: aceleración = d (velocidad angular)/d (tiempo) en todos los sistemas: rad/s2

5.2.7 Masa específica o densidad Dimensión T^{-2}

Fórmula = densidad = masa/volumen

kg/m^3 (SI), g/cm^3 (cgs), lb/in^3 (as), lb/ft^3 (as)

1 lb/ft^3 = 16,0185 kg/m^3 1 lb/in^3 = 2,76799 10^4 kg/m^3

1 g/cm3 = 1000 kg/m^3

Densidad (max) agua = 1000 kg/m^3 = 1 g/cm^3 = 62,428 lb/ft^3

= 3,61273 10^{-2} lb/in^3

5.2.8 Fuerza Dimensión MLT^{-2}

Fórmula: fuerza = masa x aceleración

N (SI), dina (cgs), poundal: pdl (as), kgf, lbf

1 N = 1 kg. m/s^2

1 dina = 1 g.cm/s^2

1 pdl = 1 lb. ft/s^2

El kilogramo fuerza (kgf) y la libra fuerza (lbf) son unidades industriales de peso, según la fórmula:

Peso = masa fuerza = masa x aceleración gravedad

1 kgf = 9,80665 N

1 lbf = 32,174 pdl = 4,44822 N

Estos valores dependen por supuesto del valor de la aceleración de la gravedad que se tome (aquí valor estandar).

1 dina = 10^{-5} N 1 N = 10^5 dinas

1 pdl = 0,138255 N 1 N = 7,23300 pdl

5.2.9 Presión Dimensión $ML^{-1}T^{-2}$

Fórmula: presión = fuerza/área

Pascal: Pa = N/m^2 (SI), dina/cm^2 (cgs), lbf/in^2 = psi (as), kgf/cm^2, bar, torr, atm, mmHg.

1 dina/cm^2 = 0,1 Pa 1psi = 1 lbf/in^2 = 6,89476 10^3 Pa

Este valor del psi se basa sobre una presión atmosférica estandar de exactamente 14,696 psi equivalente a 1,01325 10^5 Pa, es decir a un factor de conversión g_s = 32,17415 ft/s^2.

1 lbf = 1 lb x 32,174 15 ft/s^2

= 32,17415 lb.ft/s^2 x 0,453592 kg/lb x 0,3048 m/ft

= 4,44823 kg.m/s^2 ó N

1 psi = 1 lbf/in^2 = 4,44823 N/in^2 x 1550 in^2/m^2

= 6894,76 N/m^2 ó Pa

Otras unidades utilizadas (relacionada con la presión atmosférica estandar promedio al nivel del mar).

1 atm = 1,01325 10^5 Pa = 14,696 psi

1 kgf/cm^2 = 0,980665 10^5 Pa = 0,967841 atm

1 bar = 10^5 Pa = 0,986923 atm

1 atm = 760 mm Hg = 29,921 in Hg = 10,3358 m H_20 = 33,91 ft H_20

1 torr = 1 mm Hg = 1/760 atm = 133,322 Pa

5.2.10 Energía, Calor o Trabajo Dimensión ML^2T^{-1}

Fórmula: energía = fuerza x distancia = presión x volumen

Joule: J (SI), erg (cgs), pdl.ft (as), cal, Btu, kW.h

1 J = 1 N.m   1 erg = 1 dina.cm = 10^{-7} J   1 pdl.ft = 0,04214 J (no utilizado)

Una definición (obsoleta) de la caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 1˚ C. En forma semejante el british Thermal Unit (Btu) se definió como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 libra de agua de 1˚F. Ambas definiciones dependen de la capacidad calorífica del agua, la cual varía con la temperatura. La definición actual de la caloría y del Btu se basa sobre un coeficiente de conversión el Joule.

1 cal = 4,1868 J	1 J = 0,238846 cal
1 Btu = 1055,06 J	1 J = 9,47813 10^{-4} Btu

La unidad kW.h corresponde a la cantidad de energía suministrada por una fuente de potencia de 1000 W durante 1 hora. Se usa para el consumo eléctrico doméstico.

1 W = 1 J/s   1 kW.h = 3,6 10^6 J   1 cm^3.atm = 0,1013 J

5.2.11 Potencia, Dimensión ML^2T^{-3}

Fórmula: Potencia = energía/tiempo

Watt: W (SI), erg/s (cgs), caballo vapor Hp, Btu/h, kgf.m/s

1 W = 1 J/s = 1 N.m/s

1 erg/s = 10^{-7} W	1 kgf.m/s = 9,80665 W
1 Hp (métrico) = 75 kgf.m/s = 735,5 W	
1 Hp (inglés) = 550 ft.lbf/s = 745,7 W	
1 Btu/s = 1055,06 W	1 Btu/h = 0,29307 W

6. UNIDADES EN MECANICA RACIONAL

6.1 MOMENTO DE UNA FUERZA, Dimensión ML^2T^{-2}

Fórmula: Momento = fuerza x longitud = energía

J = N.m (SI), dina.cm (cgs), kgf.m, lbf.ft

1 dina.cm = 10^7 J   1 kgf.m = 9,80665 J

1 lbf.ft = 1,35582 J

6.2 COEFICIENTE DE RIGIDEZ O CONSTANTE DE UN RESORTE, (N/M) DIMENSIÓN MT^{-2}

Fórmula: Fuerza = coeficiente x longitud

El coeficiente de rigidez tiene la misma dimensión que la tensión interfacial. Unidades: N/m (SI), dina/cm (cgs)

1 dina/cm = 10-3 N/m = 1 mPa.m

6.3. ENERGIA (VARIAS FORMAS), Dimensión ML^2T^{-2}

Fórmulas: Trabajo mecánico = fuerza x longitud
= tensión x área
= presión x volumen

Energía cinética = 1/2 masa x $(\text{velocidad})^2$

Energía potencial = masa x aceleración x longitud

Energía potencial elástica = 1/2 coef. rigidez x $(\text{longitud})^2$

1 J = 1 N.m   1 erg = 1 dina.cm = 10^{-7} J

1 kgf.m = 9,80665 J

6.4 CANTIDAD DE MOVIMIENTO, Dimensión MLT^{-1}

Fórmula: Cantidad de movimiento = masa x velocidad

Las unidades empleadas corresponden a una fuerza x seg.

1 dina . s = 10^{-5} N.s   1 kgf.s = 9,80665 N.s

6.5 VELOCIDAD ANGULAR (ω), Dimensión T^{-1}

Fórmula: Velocidad angular = desplazamiento angular/tiempo
Unidad rad/s

6.6 ACELERACION ANGULAR Dimensión T^{-2}

Fórmula: Aceleración angular = d (velocidad ang) /d (tiempo)
Unidad rad/s^2

6.7 VELOCIDAD LINEA TANGENCIAL, Dimensión LT^{-1}

Velocidad línea tangencial = d (longitud de arco)/dt
= longitud del radio x velocidad angular

6.8 ACELERACION TANGENCIAL/CENTRIPETA, Dimensión LT^{-2}

Aceleración tangencial = longitud radio x aceleración angular
Aceleración centrípeta = longitud radio x (velocidad angular)^2
= velocidad tangencial)^2 / longitud radio

6.9 MOMENTO DE INERCIA, Dimensión ML^2

Fórmula:
Energía = 1/2 momento de inercia x (velocidad angular)^2

El momento de inercia tiene como unidades la de una masa x área, o de energía x (tiempo)^2

kg.m^2 (SI), g.cm^2 (cgs) 1 g.cm^2 = 10^{-7} kg.m^2

7. UNIDADES EN FLUOMECANICA

7.1 VISCOSIDAD DINAMICA DE UN FLUIDO Dimensión $ML^{-1}T^{-1}$

La viscosidad dinámica mide el grado de resistencia al flujo de un fluido cuando está sometido a un esfuerzo. Se define por la fórmula de Newton:

Fuerza/área = Viscosidad x gradiente de velocidad

La unidad de viscosidad SI es el kg/(m.s) = N.s/m^2 = Pa.s, pero es poco utilizada. Se prefiere usar para fluidos poco viscosos la centiPoise (cP) que es un submúltiple de la Poise (P), la cual es la unidad CGS: 1 P = 1 g/(cm.s). A temperatura ambiente la viscosidad del agua es del orden de 1 cP. La centipoise se expresa simplemente en submúltiplo de unidades SI.

$$1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ N.s/m}^2 = 1 \text{ mN.s/m}^2 = 1 \text{ mPa.s} = 10{,}1912 \text{ kgf.s/m}^2$$

7.2 VISCOSIDAD CINEMATICA (m^2s^{-1}), Dimensión L^2T^{-1}

Es la relación entre la viscosidad y la masa específica o densidad. Se define como:

Viscosidad cinemática = viscosidad/densidad

La unidad de viscosidad cinemática en SI sería el m^2/s^{-1}; no es utilizada. Se prefiere usar como unidad el centiStokes (cSt) que es un submúltiplo del Stokes, el cual es la unidad del sistema cgs (1 St = 1 cm^2/s).

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$$

7.3 TENSION INTERFACIAL (N/m) Dimensión MT^{-2}

La tensión superficial o interfacial es una medida de la energía de una interfase por unidad de área.

Fórmula: Tensión = energía/área = fuerza/longitud

La unidad de tensión interfacial en SI sería el J/m^2 o el N/m. La unidad más utilizada es aquella del sistema cgs: la dina/cm. Existe una equivalencia simple con un submúltiplo SI.

$$1 \text{ dina/cm} = 10^{-3} \text{ N/m} = 1 \text{ mN/m} = 1 \text{ mPa.m}$$

7.4 PERMEABILIDAD DE UN MEDIO POROSO Dimensión L^2

La permeabilidad de un medio poroso mide la facilidad con la cual un fluido viscoso sometido a un gradiente de presión se desplaza en el medio poroso. La definición se basa sobre la ley de Darcy.

Velocidad superficial = permeabilidad . gradiente de presión/viscosidad

La unidad utilizada es el Darcy y proviene de la aplicación de la fórmula anterior, en la cual la velocidad superficial es el caudal volumétrico por unidad de área de sección recta de medio poroso. Un medio poroso de permeabilidad 1 Darcy, deja pasar un fluido de viscosidad 1 cP a velocidad superficial 1 cm/s bajo un gradiente de presión de 1 atm/cm.

$$1 \text{ Darcy} = 1 \text{ cP } (1 \text{ cm/s}) (1 \text{ cm/atm}) = 0{,}9869\ \mu\ m^2 \neq\neq 10^{-12}\ m^2$$

Un medio poroso de tipo arena no consolidada tiene una permeabilidad de algunos Darcys. Las piedras areniscas y las calizas típicas de los yacimientos petroleros poseen permeabilidades del orden de algunas decenas de miliDarcys.

7.5 MOVILIDAD DE UN FLUIDO EN UN MEDIO POROSO Dimensión $M^{-1} L^3 T$

Fórmula: Movilidad = permeabilidad/viscosidad

La unidad utilizada es el Darcy/cP

1 Darcy/cP = 1 cm^2 (atm.s) = 10^{-9} m^2 (Pa.s)

7.6 COMPRESIBILIDAD DE UN FLUIDO Dimensión $M^{-1}LT^2$

Fórmula: Compresibilidad: (1/volumen) x d (volumen) / d (fuerza)

La dimensión es el inverso de una presión, y puede expresarse en cualquier unidad recíproca de presión. Ver módulo de elasticidad volumétrico.

7.7 MODULO DE ELASTICIDAD VOLUMETRICO
Dimensión $ML^{-1}T^{-2}$

Se define como el inverso de la compresibilidad, y su dimensión es la de una presión. La unidad generalmente usada es el kgf/cm^2.s.

Módulo de elast. Vol. del agua = 22500 kgf/cm^2
Módulo de elast. Vol. del mercurio = 267000 kfg/cm^2

Para gases se puede demostrar que el módulo es igual a la presión (cambio isotérmico) o a la presión multiplicada por la relación de los calores específicos a P y V constantes. En todos casos, a presión atmosférica el módulo de elasticidad de un gas es del orden de 1 kgf/cm^2. O sea que el aire es 20000 veces más compresible que el agua y 200000 veces más compresible que el mercurio.

8. UNIDADES EN TERMODINAMICA Y FISICO-QUIMICA

8.1 CANTIDAD DE SUSTANCIA (mol y relacionado)

Un mol es un cierto número de moléculas. En e sistema cgs el mol representa N_A moléculas donde N_A es el número de Avogadro (6,0228 10^{23}). Esta unidad se llama mol o gramo-mol (g-mol).

En el sistema americano se usa la libr-mol (lb-mol) que representa 6,0228 x 453,59 x 10^{23} moléculas.

$$1 \text{ lb-mol} = 453{,}59 \text{ g-mol}$$

Otra forma equivalente de definir g-mol y lb-mol es a partir de los pesos moleculares.

$$\text{g-mol} = \text{masa en g/peso molecular}$$

$$\text{lb-mol} = \text{masa en lb/peso molecular}$$

El término peso molecular se ha usado indiferentemente por masa molecular. En realidad es un abuso de lenguaje y lo correcto es hablar de masa molecular en lugar de peso molecular. La escala actual está basada sobre el valor (arbitrario) 12 para el isótopo 12 del carbón

$$12 \text{ g de } ^{12}C \text{ contiene 1 g-mol ó } N_A \text{ átomos}$$

Debido a que la mayoría de las sustancias contienen varios isótopos las masas atómicas y moleculares no son números enteros; sin embargo para muchos elementos se toma como aproximación un número entero: H = 1, C = 12, 0 = 16, etc.

La masa atómica no depende de la unidad, por ejemplo para el ^{12}C (en unidad de masa atómica).

$$12 \text{ u.m.a} = \frac{12 \text{ g de } ^{12}C}{1 \text{ g-mol de C}} = \frac{12 \text{ lb de } ^{12}C}{1 \text{ lb-mol de C}}$$

8.2 ENERGIA (ML2T-2) Y PROPIEDADES RELACIONADAS

8.2.1 Calor y Trabajo

La relación de Einstein $E = mc^2$ establece la equivalencia entre energía y materia. Esta relación es válida en SI con E (J), m (kg), c (m/s). El primer principio de la termodinámica establece la equivalencia entre dos formas de energía: trabajo y calor.

1 cal = 4,1868 J = 3,968 10^{-3} Btu
1 Btu = 252 cal = 1055,1 J

Otras unidades empleadas

1 cm^3.atm = 0,1013 J
1 l.atm = 101,3 J
1 ft^3.atm = 2840,1 J
1 PCU = 1 CHU = 5/9 Btu (Véase sección 8.3.3)

8.2.2 Potenciales Termodinámicos (en particular Entalpía)

Los potenciales termodinámicos U (energía interna), H (entalpía), F (energía libre de Helmoltz), G (energía libre de Gibbs) se expresan en unidades de energía, de energía por unidad de masa, o de energía por mol.

Las unidades usadas son:

J/kg, cal/g, Btu/lb y múltiples
cal/g-mol, Btu/lb-mol, y múltiples

Los calores latentes (entalpías) de cambio de estado se expresan generalmente en cal/g y kcal/g-mol, mientras que las entalpías y energías libres de formación y combustión se expresan además de las anteriores en Btu/lb.

8.2.3 Contenido calórico

Los combustibles pueden generar una cierta cantidad de calor al quemar. El contenido calórico o valor de calentamiento es la cantidad de calor producida por la combustión de una cierta cantidad de sustancia en una bomba calorimétrica bajo ciertas condiciones experimentales. Se expresa en unidades de energía por unidad de masa (sólidos, líquidos) o de volumen (líquidos, gases).

Btu/lb, Kcal/g, Btu/ft^3

8.2.4 Grupos kT y RT (ML^2T^{-2} mol^{-1})

Los grupos kT (escala molecular) y RT (escalar molar) aparecen en muchas fórmulas en denominador de una fracción cuyo numerador es una energía. Poseen la dimensión energía por mol.

Es fácil hallar el valor numérico de RT en cualquier unidad mediante la aplicación de la fórmula del gas ideal: PV = nRT, sabiendo que 1 g-mol (respectivamente 1 lb-mol) de gas ideal ocupa 22,4 litros (respectivamente 359 ft^3) a presión atmosférica y temperatura de la congelación del agua 273,15 K (respect. 491.67 ˚R) (Ver Sección 12).

8.3 CALORIMETRIA

Fórmulas:

Cantidad de calor = Capacidad calorífica x dif. temperatura
= Cap. calorífica específica másica x masa x dif. temp.
= Cap. calorífica específica molar x mol x dif. temp.

8.3.1 Capacidad calorífica ($ML^2T^{-2}\theta^{-1}$)

Se expresa en unidad de energía/temperatura: cal/°C, J/°C, Btu/°F. Ya que depende de la cantidad de sustancia no es una propiedad característica de la sustancia, sino del sistema.

8.3.2. Capacidad calorífica específica másica ($L^2T^{-2}\theta^{-1}$)

Esta magnitud, llamada también calor específico, se expresa en unidad de energía/masa.temp: cal/g.˚C, J/kg.K, Btu/lb.˚F. Tampoco se tabulan estos valores, prefiriendo la capacidad calorífica específica molar, con excepción de algunos experimentos de calorimetría involucrando el agua cuya capacidad calorífica específica másica es 1 cal/g.˚C (por definición de la caloría).

8.3.3 Capacidad calorífica específica molar ($ML^2T^{-2}\theta^{-1}mol^{-1}$)

Se expresa en unidad de energía/mol.temp. Recordamos las definiciones de la caloría y del Btu. La caloría (resp. Btu) es la cantidad de calor requerida para elevar de 1˚ C (resp. 1˚ F) la temperatura de 1 g (resp. 1 lb) de agua. 1 g de agua es es 1/18 g-mol; 1 lb de agua es 1/18 lb-mol. Llamada C_{sm} la capacidad calorífica molar:

$$1 \text{ cal} = C_{sm} \ \frac{\text{cal}}{\text{gmol ˚C}} \quad \frac{1/18 \text{ g-mol}}{\text{g}} \quad 1 \text{ g} \ \ 1˚\text{C}$$

$$1 \text{ Btu} = C_{sm} \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mol ˚F}} \quad \frac{1/18 \text{ lb-mol}}{\text{lb}} \quad 1 \text{ lb} \ \ 1˚\text{F}$$

Se ve que C_{sm} tiene el mismo valor numérico en ambos tipos de unidades, de donde el interés de la capacidad calorífica específica molar.

1 cal/g-mol.˚C	=	1 kcal/lkg-mol.˚C	=	1 Btu/lb-mol.˚F
	=	PCU/lb-mol.˚C	=	1 CHU/lb-mol.˚C

donde PCU (pound centigrade unit) o CHU (centigrade heat unit) son unidades anglosajonas de energía pero con grado ˚C

1 PCU = 1 CHU = 1 Btu x 5/9 ˚C/˚F = 0,55556 Btu

Note que la unidad en base a las unidades SI debería ser el J/kg-mol.K, la cual no se utiliza. La conversión es:

1 Cal/g-mol.˚C = 4186,8 J/kg-mol.K

8.4.3 Entropía ($ML^2T^{-2}\theta^{-1}$, $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ó $ML^2T^{-2}\theta^{-1}$ mol^{-1})

Fórmula: Cantidad de calor = entropía x temperatura.

La entropía tiene la misma dimensión que la capacidad calorífica; como la anterior tienen unidades diferentes según que se refiere a todo un sistema, a una unidad de masa o a un mol.

Unidades usadas J/kg.K, cal/g-mol.˚C, Btu/lb.˚F

9. UNIDADES EN FENOMENOS DE TRANSPORTE Y TRANSFERENCIA

9.1 ECUACIONES FENOMENOLOGICAS FLUJO-FUERZA

Las relaciones fenomenológicas de base de la termodinámica irreversible, llamadas relaciones de Onsager, indican que cada **flujo** J es una combinación lineal de **fuerzas** X.

$$J_i = \sum_{k=1}^{n} L_{ik} X_k \qquad (i = 1, 2 \ldots n)$$

Los flujos son derivadas temporales de magnitudes extensivas como corriente eléctrica, flujo de calor o de masa, expresados en general como densidades de flujo (flujo/área); mientras que las fuerzas son magnitudes intensivas de tipo tensión, expresadas en general como gradientes (diferencia de potencial/longitud)

En el caso más simple, un flujo depende sólo de una fuerza; es el caso de las ecuaciones fundamentales de transporte. En otros casos puede haber efectos cruzados (termodifusión, efecto Soret, efecto Peltier, etc.)

Lo que nos interesa aquí son las unidades de los coeficientes de conductancia L; las cuales dependen de la naturaleza de las magnitudes J y X.

9.2 ECUACIONES SIMPLES

9.2.1 Ley de Ohmio - Conductividad eléctrica-electrolítica

$$\frac{\text{Flujo de carga}}{\text{Area}} = \text{Conductividad} \times \frac{\text{Diferencia de potencial}}{\text{Longitud}}$$

Relaciona la densidad de corriente (flujo de carga por unidad de área del conductor) con el gradiente del potencial (campo eléctrico).

Unidad de conductividad eléctrica ($M^{-1} L^{-3}T^3A^2$): S/m.

9.2.2 Ley de Ohmio - Conductancia eléctrica

Flujo de carga = conductancia x dif. de potencial

(AT/T) amperio ($ML^2T^{-3}A^{-1}$) voltio

Unidad de conductancia eléctrica ($M^{-1}L^{-2}T^3A^2$): S (Siemens)

9.2.3 Transferencia de carga

$$\frac{\text{Flujo de carga}}{\text{Area}} = \text{Conductividad} \ \frac{\text{Area}}{\text{Volumen}} \ \text{Diferencia de potencial}$$

El coeficiente de transferencia de carga tiene una dimensión de conductividad por unidad de longitud, o de conductancia por unidad de área ($M^{-1}L^{-4}T^3A^2$), en SI el S/m^2.

9.2.4 Ley de Fourier - conductividad térmica (k)

$$\frac{\text{Flujo de calor}}{\text{Area}} = \text{conductividad térmica x gradiente de temperatura}$$

(ML^2T^{-2}/TL^2) θL^{-1}

La unidad de conductividad térmica corresponde a una energía por unidad de longitud, por unidad de tiempo, por unidad de temperatura: $ML^2T^{-2}/LT\theta = MLT^{-3}\theta^{-1}$

Unidad SI	=	1 $J.m^{-1}. K^{-1}$ no utilizada
1 Btu/hr. ft.˚F	=	1,731 $J.m^{-1}. s^{-1}. K^{-1}$
1 Btu/hr. ft^2 (˚F/in)	=	0,1442 $J.m^{-1} . s^{-1}. K^{-1}$
1 cal/s.m.˚C	=	418,61 $J.m^{-1}. s^{-1}. K^{-1}$
1 W/cm. ˚C	=	100 $J.m^{-1} s^{-1}. k^{-1}$

9.2.5 Transferencia de calor = Coeficiente de transferencia de calor (h)

$$\frac{\text{Flujo de calor}}{\text{Area}} = \text{Coef. Transf. calor x dif. de temperatura}$$

La unidad de transferencia de calor corresponde a una energía por unidad de tiempo, por unidad de temperatura: $MT^{-3}\theta^{-1}$

Unidad SI = $1\ J.\ m^{-2}.s^{-1}.\ K^{-1}$

1 Btu/hr. ft^2.°F = $5{,}679\ J.m^{-2}.\ s^{-1}.\ K^{-1}$

Este coeficiente de transferencia de calor se usa cualquiera sea el modo de transferencia: conducción, convección, radiación.

En muchos problemas se usa el número adimensional de Nusselt $N_{Nu} = h\ L/k$ donde L es una longitud característica.

9.2.6. Ley de Fick - Difusión Molecular

$$\frac{\text{Flujo Molar}}{\text{Area}} = \text{Difusividad x gradiente de concentración}$$

$mol.\ T^{-1}.\ L^{-2}$ $(mol.L^{-3}/L)$

Esta expresión de la primera Ley de Fick define el coeficiente de difusión llamado difusividad molar volumétrica D de dimensión $L^2.T^{-1}$.

Unidad más usada: $cm^2.\ s^{-1}$ $1\ ft^2.hr^{-1} = 0{,}258\ cm^2.\ s^{-1}$

A veces se encuentra la ecuación de Fick en la forma

$$\frac{\text{Flujo molar}}{\text{Area}} = \text{Difusividad molar x gradiente de fracción molar}$$

Esto define la difusividad molar Dm que posee la dimensión mol. $L^{-3}.\ L^2T^{-1}$ = mol.$L^{-1}T^{-1}$, con unidad g-mol/cm. s ó lb-mol/ft.hr.

9.2.7 Transferencia de masa. Coeficiente de transferencia de masa

$$\frac{\text{Flujo molar}}{\text{Area}} = \text{Coef. transferencia } (k_m) \text{ x Dif. de concentración}$$

$mol.T^{-1}.L^{-2}$ $mol.L^{-3}$

El coeficiente de transferencia de masa k_m tiene como dimensión LT^{-1}. Unidades usuales ft/s y cm/s.

En muchos problemas se usa el número adimensional de Sherwood N_{Sh} = kL/D donde L es una longitud característica. Se notará la semejanza con el transporte y la transferencia de calor.

9.2.8 Ley de Newton = Viscosidad

$$\frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} = \text{Viscosidad x gradiente de velocidad}$$

Una fuerza (MLT^{-2}) es un flujo de cantidad de movimiento o momento (masa x velocidad, dimensión MLT^{-1}).

qLa viscosidad es por lo tanto la conductividad de cantidad de movimiento, perpendicularmente a la dirección de flujo. Tiene la dimensión $ML^{-1}T^{-1}$, y se expresa en centiPoise, un submúltiplo de la unidad cgs. (Véase sección 7.1).

$$1 \text{ cP} = 0{,}01 \text{ g.cm}^{-1}.\ \text{s}^{-1}$$

9.2.9 Transferencia de cantidad de movimiento

La transferencia de cantidad de movimiento se hace con conservación de la energía cinética.

Energía cinética = 1/2 cantidad de movimiento x velocidad

Refiriéndose a un volumen dado se obtiene una relación semejante a las dos transferencias anteriores (calor y masa).

$$\frac{\text{Energía}}{\text{Volumen}} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} = \frac{\text{Flujo de cantidad de movimiento}}{\text{Area}}$$

$$= 1/2 \ \frac{\text{Cantidad de movimiento}}{\text{volumen}} \quad \text{x velocidad}$$

El coeficiente de transferencia de cantidad de movimiento es una densidad x velocidad ($ML^{-2}T^{-1}$)

Como para los flujos de calor y de masa, la relación entre el coef. de transferencia x longitud característica (L) y el coef. de conductividad (viscosidad) es un número adimensional, llamado número de Reynolds $N_{Re} = L\,\rho\,\nu\,/\,\eta$

10. CONSTANTES MAS IMPORTANTES

10.1 CONSTANTES FUNDAMENTALES

Número de Avogadro:	NA =	$6{,}02283\ 10^{23}\ mol^{-1}$
Constante de Plank:	h =	$6{,}626\ 10^{34}$ J.s
Constante de Boltzmann:	k =	$1{,}381\ 10^{-23}\ J.K^{-1}$
Aceleración de la gravedad estandar:	gs =	$9{,}80665\ m.s^{-2}$
Velocidad de la luz en el vacío:	c =	$2{,}997925\ 10^{8}\ m.s^{-1}$
Carga elemental (electrón/protón):	e =	$\pm 1{,}602192\ 10^{-19}$ C
Permitividad del vacío:	ε_o =	$(1/36\pi)\ 10^{-9} = 8{,}85418\ 10^{-2}\ F.m^{-1}$
	ε_o =	$1/4\ \pi$ UESCGS
Permeabilidad del vacío:	μ_o =	$4\ \pi\ 10^{-7} = 1{,}25664\ 10^{-6}\ H.m^{-1}$
	μ_o =	$4\ \pi$ UEMGS

10.2 CONSTANTES RELACIONADAS CON ENERGIA/MOL

Constante de Faraday: F = $N_A e$ = 96486 $C.g\text{-}mol^{-1}$

= 23060 $cal.V^{-1}\ g\text{-}mol^{-1}$

Constante de los gases: R = $N_A k$ (Nota 1˚ C = 1 K)

R =	8,3144	$J.g\text{-}mol^{-1}.K^{-1}$	=	1.9872	$cal.g\text{-}mol^{-1}.K^{-1}$
=	82,057	$atm.\ cm^3.\ g\text{-}mol^{-1}.\ K^{-1}$	=	0,08205	$atm.1.g\text{-}mol^{-1}.K^{-1}$
=	62,361	$mm\ Hg.1.g\text{-}mol^{-1}.K^{-1}$	=	0,08314	$bar.l.g\text{-}mol^{-1}.K^{-1}$
=	1,314	tm.ft3.g-mol-1.K-1	=	0,08478	kgf.cm-2.l.g-mol-1.K-1
=	1,9872	CHU ó $PCU.lb\text{-}mol^{-1}.K^{-1}$	=	1,9872	$Btu.lb.mol^{-1}.°R^{-1}$
=	10,73	$psi.\ ft^3.lb\text{-}mol^{-1}.\ °R^{-1}$	=	1545,0	$lbf.ft.lb\text{-}mol^{-1}.°R^{-1}$
=	0,7302	$atm.ft^3.lb\text{-}mol^{-1}.°R^{-1}$	=	$5{,}819\ 10^4$	$kW.h.lb\text{-}mol^{-1}.°R^{-}$
=	0,08205	$Kg.\ m^2\ K^{-1}\ s^{-2}\ g\text{-}mol^{-1}$			

Relación e/k = F/R = 11604,5 $K.V^{-1}$

INDICE GENERAL

INDICE DE UNIDADES

Texto: **Unidades, Patrones y Conversiones**
Autor: Jean-Louis Salager
Referencia: Cuaderno FIRP S501A
Versión # 2 (1993)
Editado y publicado por: Laboratorio FIRP Escuela de INGENIERIA QUIMICA
UNIVERSIDAD de Los ANDES Mérida 5101 VENEZUELA

Laboratorio FIRP, telef: ++58 (0)274 2402954 Fax: (0)274 2402947
Escuela de INGENIERIA QUIMICA,
e-mail: firp@ula.ve
UNIVERSIDAD de Los ANDES Mérida 5101 VENEZUELA
www.firp.ula.ve