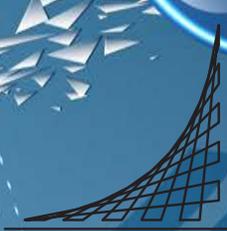




Conceptos de mecánica newtoniana. Una visión para ingeniería

Rodrigo Alonso Bermúdez Cortés
Jaime José Isaza Ceballos



ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

E D I T O R I A L

COLECCIÓN DIGITAL DE OBRAS BREVES

Colección Digital de Obras Breves
Conceptos de mecánica newtoniana. Una visión para ingeniería
Primera edición: 2018

© Rodrigo Alonso Bermúdez Cortés, 2018

rodrigo.bermudez@escuelaing.edu.co

© Jaime José Isaza Ceballos, 2018

jaime.isaza@escuelaing.edu.co

© Escuela Colombiana de Ingeniería

Ak 45 N.º 205-59

www.escuelaing.edu.co

Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería
Telefax 668 3600, ext. 397 • editor@escuelaing.edu.co

Dirección editorial

Cristina Salazar Perdomo

cristina.salazar@escuelaing.edu.co

Coordinación editorial

Jorge Cañas Sepúlveda

jorge.canas@escuelaing.edu.co

ISBN 978-958-8726-30-4

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio,
sin autorización escrita de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Hecho en Colombia - Made in Colombia

*A Carmen Elvira Bello Espinoza, Álvaro Nicolás Bermúdez Bello
y Paula Alexandra Bermúdez Bello, con todo mi afecto.
Rodrigo A. Bermúdez Cortés*

*A María Claudia Castro López, Andrea Isaza Castro
y Daniela Isaza Castro, quienes con su aliento
y apoyo contribuyeron para el logro de esta meta.
Jaime José Isaza Ceballos*



Contenido

Prólogo	11
---------------	----

Capítulo 1. Física y metrología

1.1	Física	13
1.2	Mediciones	13
1.3	Magnitudes físicas fundamentales	14
1.3.1	Longitud	14
1.3.2	Masa	14
1.3.3	Tiempo	14
1.3.4	Temperatura	14
1.3.5	Intensidad de corriente eléctrica	15
1.3.6	Cantidad de sustancia	15
1.3.7	Intensidad luminosa	15
1.4	Magnitudes físicas con unidades derivadas	16
1.5	Sistema métrico decimal	16
1.6	Medidas de ángulos	17
1.6.1	Ángulo plano	17
1.6.2	Ángulo sólido	17
1.7	Unidades aceptadas en el sistema internacional de unidades	18
1.8	Unidades de longitud usadas en astronomía	18
1.8.1	Unidad astronómica (ua)	18
1.8.2	Año luz (al)	18
1.8.3	Parsec (pc)	18
1.9	Sistema inglés y conversión de unidades	19
1.10	Escalas de temperatura	20
1.11	Otras unidades de medida	21
1.11.1	Nudo (kn)	21
1.11.2	Mach	21

Capítulo 2. Matemática vectorial

2.1	Sistemas de coordenadas	23
2.1.1	Coordenadas rectangulares cartesianas	23
2.1.2	Coordenadas esféricas	24
2.1.3	Coordenadas circulares cilíndricas	24
2.1.4	Coordenadas polares	24
2.2	Magnitudes físicas	25
2.2.1	Vectores	25

2.2.2	Coordenadas polares y rectangulares	26
2.2.3	Coordenadas polares esféricas y rectangulares	26
2.2.4	Coordenadas circulares cilíndricas y rectangulares	27
2.2.5	Ángulos directores y vectores unitarios	28
2.3	Suma de vectores	29
2.3.1	Método gráfico	29
2.3.1.1	Método del paralelogramo	29
2.3.1.2	Método del polígono.....	30
2.3.2	Método analítico	30
2.3.3	Vectores en función de vectores unitarios	31
2.3.4	Suma y diferencia de dos vectores, teorema del coseno.....	31
2.3	Productos	32
2.3.1	Producto de un escalar por un vector.....	32
2.3.2	Producto punto o escalar de dos vectores	33
2.3.2.1	Interpretación del producto punto	33
2.3.3	Producto cruz o producto vectorial	34
	Problemas	40

Capítulo 3. Conceptos de cinemática

3.1	Cinemática	43
3.1.1	Partícula	43
3.1.2	Sistema de referencia.....	43
3.1.3	Punto de referencia	43
3.1.4	Posición.....	43
3.1.5	Reposo y movimiento	44
3.1.6	Desplazamiento.....	44
3.1.7	Trayectoria.....	45
3.1.8	Recorrido	45
3.1.9	Velocidad media.....	46
3.1.10	Velocidad instantánea	46
3.1.11	Rapidez media.....	46
3.1.12	Rapidez instantánea	46
3.1.13	Aceleración media.....	47
3.1.14	Aceleración instantánea.....	47
	Problemas	55

Capítulo 4. Cinemática de una partícula

4.1	Movimiento rectilíneo.....	57
4.1.1	Movimiento rectilíneo uniforme.....	57
4.2	Movimiento con aceleración constante	58
4.2.1	Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.....	58
4.2.2	Lanzamiento vertical y caída libre.....	60
4.2.3	Movimiento parabólico.....	67
4.2.3.1	Alcance horizontal y alcance vertical	68
4.2.3.2	Ecuación de la trayectoria	69
4.2.3.3	Aceleración	70

4.2.3.4	Longitud de arco o recorrido	70
4.3	Movimiento circular.....	76
4.3.1	Movimiento circular uniforme.....	76
4.3.1.1	Periodo	77
4.3.1.2	Frecuencia	77
4.3.1.3	Posición angular	77
4.3.1.4	Velocidad angular.....	77
4.3.1.5	Vector posición.....	78
4.3.1.6	Vector velocidad.....	78
4.3.1.7	Aceleración	78
4.3.2	Movimiento circular uniformemente acelerado	79
4.3.2.1	Vector posición.....	80
4.3.2.2	Vector velocidad.....	80
4.3.2.3	Aceleración	80
4.3.2.3.1	Aceleración en función de las magnitudes angulares.....	80
4.3.3	Relación entre las magnitudes angulares y lineales en el movimiento circular.....	81
4.4	Movimiento relativo.....	83
4.4.1	Movimiento relativo entre dos sucesos descritos respecto a un mismo observador.....	83
4.4.2	Movimiento relativo de traslación simple o uniforme.....	84
	Problemas	88

Capítulo 5. Dinámica

5.1	Dinámica.....	97
5.1.1	Masa (m).....	97
5.1.2	Momentum, cantidad de movimiento o momentum lineal [P].....	97
5.1.3	Fuerza [F]	97
5.2	Leyes de Newton	98
5.2.1	Primera ley o ley de inercia.....	98
5.2.2	Segunda ley o principio fundamental de la dinámica.....	98
5.2.3	Tercera ley o principio de acción y reacción	99
5.2.4	Conservación de la cantidad de movimiento	100
5.3	Interacciones fundamentales de la naturaleza	100
5.3.1	Fuerza gravitatoria.....	100
5.3.1.1	Peso [w]	100
5.3.2	Fuerza electromagnética	102
5.3.2.1	Fuerza normal [N].....	102
5.3.2.2	Fuerza de rozamiento	103
5.3.2.3	Fuerza de viscosidad	103
5.3.2.4	Fuerza de arrastre	104
5.3.2.5	Fuerza elástica	104
5.3.3	Fuerza nuclear fuerte.....	105
5.3.4	Fuerza nuclear débil.....	105
5.4	Aplicaciones de las leyes de Newton	105
5.5	Segunda ley y movimiento curvilíneo	113
5.5.1	Curvas peraltadas	113
5.6	Marco de referencia inercial.....	117
5.7	Fuerzas ficticias	119
5.7.2	Fuerza de Coriolis	121

5.8	Leyes de Kepler.....	121
5.8.1	Primera ley	122
5.8.2	Segunda ley	122
5.8.3	Tercera ley	122
	Problemas	123

Capítulo 6. Trabajo y energía

6.1	Trabajo.....	131
6.2	Teorema del trabajo y la energía	132
6.3	Trabajo debido a una fuerza constante	132
6.4	Trabajo de la fuerza gravitatoria y energía potencial en un campo gravitatorio uniforme.....	133
6.5	Fuerzas conservativas y disipativas.....	133
6.6	Conservación de la energía	134
6.7	Trabajo de la fuerza gravitacional.....	134
6.8	Trabajo sobre una partícula en una trayectoria rectilínea debido a una fuerza variable	135
6.9	Trabajo sobre una partícula en una trayectoria curvilínea debido a una fuerza variable	136
6.10	Trabajo debido a la fuerza de rozamiento	138
6.11	Potencia media.....	138
6.11.1	Potencia instantánea	139
	Problemas	146

Capítulo 7. Colisiones

7.1	Centro de masa.....	153
7.1.1	Distribución discreta	153
7.1.2	Distribución continua homogénea	154
7.2	Teoremas de Pappus-Guldin.....	154
7.3	Velocidad y cantidad de movimiento del centro de masas	155
7.4	Aceleración del centro de masa	155
7.5	Colisiones.....	155
7.5.1	Colisiones unidimensionales.....	156
7.5.2	Colisiones bidimensionales.....	157
7.6	Aplicaciones del centro de masa	157
7.7	Aplicaciones de colisiones.....	163
	Problemas	169

Capítulo 8. Movimiento rotacional

8.1	Torque o momento de fuerza	175
8.1.1	Fuerzas concurrentes	176
8.1.2	Fuerzas coplanares	176
8.2	Equilibrio de cuerpo rígido.....	177
8.3	Centro de gravedad de un cuerpo rígido.....	177
8.4	Torque y aceleración angular	178
8.5	Momento de inercia	178
8.6	Teorema de Steiner.....	178

8.7	Cálculos de momentos de inercia.....	179
8.7.1	Partícula puntual	179
8.7.2	Momento de inercia de un aro o anillo delgado.....	179
8.7.3	Momento de inercia de una corona circular alrededor del eje principal.....	180
8.7.4	Momento de inercia de un cilindro de pared ancha respecto al eje principal.....	180
8.7.5	Momento de inercia de una corona circular alrededor de un eje que pasa por un diámetro	182
8.7.6	Momento de inercia de un cilindro de pared gruesa respecto al eje perpendicular al eje principal y que pasa por el centro de masa.....	183
8.8	Momentum angular, cantidad de movimiento angular o momento angular	185
8.8.1	Momentum angular de una partícula	186
8.8.1.1	Movimiento circular.....	186
8.8.1.2	Movimiento rectilíneo.....	187
8.8.2	Momentum angular de un cuerpo rígido	187
8.9	Torque y cantidad de movimiento angular	188
8.10	Conservación del <i>momentum</i> angular.....	188
8.11	Trabajo y energía	189
8.12	Potencia asociada al trabajo producido por un torque.....	189
	Problemas	198

Capítulo 9. Movimiento de rodadura

9.1	Rodamiento puro	207
9.2	Vectores posición y velocidad.....	208
9.3	Vector posición respecto al punto de contacto.....	208
9.4	Aceleración	209
9.5	Energía cinética	210
9.6	Deslizamiento y rodamiento	211
	Problemas	217
	Referencias.....	221



Prólogo

Los autores de este libro nos hemos dedicado a la enseñanza de la física mecánica durante varios años de nuestra vida, a lo largo de los cuales hemos encontrado que cada vez es más sentida la necesidad de implementar procedimientos que le ayuden al estudiante a aprender los conceptos básicos de la física con un mínimo de conocimiento del cálculo diferencial. Consideramos que el texto le permite comprender, afianzar y aplicar los conceptos de física mecánica que se requieren para el desarrollo de las asignaturas de ciencias propias de la ingeniería, al tiempo que le quitan el temor de enfrentarse a la física con unos conocimientos básicos del cálculo diferencial.

Adicionalmente, esta obra se podría utilizar como texto de consulta de la enseñanza secundaria, cuando los estudiantes de estos planteles inicien sus estudios de física.

En el transcurso de los últimos años hemos observado que los egresados de los colegios tienen un nivel muy básico de preparación en física y matemáticas, por lo que las universidades han tenido que establecer mecanismos para suplir estas deficiencias. Sin embargo, la modernización de los currículos, la necesidad de optimizar el número de créditos de los programas que se ofrecen y un sinnúmero de condiciones adicionales han hecho que los estudiantes de los programas que requieren formación en ciencias naturales (física, química y biología) tengan que iniciar en forma simultánea sus estudios de física y cálculo diferencial, lo cual ha representado algunos problemas en la enseñanza de la física.

El texto está diseñado de tal modo que el desconocimiento del cálculo no sea una excusa para el aprendizaje de la física. Los temas iniciales se desarrollan con un fuerte trabajo algebraico, y en la medida en que se avanza se van introduciendo los conceptos del cálculo diferencial necesarios, los cuales ya son conocidos por el estudiante en la mayoría de los casos, puesto que se van desarrollando simultáneamente.

Este libro está dirigido, entonces, a todos aquellos estudiantes de programas que requieran un conocimiento profundo de las ciencias naturales, en especial los programas de ingeniería.

El texto, que en general abarca el área de la física correspondiente a la mecánica clásica o newtoniana, está diseñado para cubrir gran parte del programa de la asignatura de física mecánica de la mayoría de las universidades del país.

La idea es publicar una nueva edición para complementar el libro con temas de movimiento armónico, principios de termodinámica y mecánica de fluidos, con el fin de cubrir la totalidad de los contenidos curriculares correspondientes a la física mecánica.

En los dos primeros capítulos se hace un resumen del manejo dimensional de las magnitudes físicas, y se le da un énfasis especial a la utilización del sistema internacional de unidades (SI); igualmente, se hace un resumen del álgebra vectorial requerida para el manejo de las operaciones de las magnitudes vectoriales que se involucran en el estudio de la física mecánica.

Además, al finalizar cada tema se presentan ejemplos completamente desarrollados, los cuales le permiten al estudiante analizar y aplicar en forma correcta los conceptos involucrados del tema correspondiente, en algunos casos aplicando diversos métodos de solución.

Por otra parte, en cada capítulo se presentan problemas que se han tomado o adaptado de eventos reales, de tal manera que el estudiante puede observar la aplicación evidente de la física. Los problemas se seleccionaron de acuerdo con el grado de dificultad, el cual varía de medio a alto, con el propósito de ofrecer a los estudiantes un reto adicional para su solución, ya que tienen como objetivo lograr que el estudiante tome parte activa en la solución, favoreciendo así el desarrollo de la capacidad de análisis y deducción.

Igualmente, se ofrece como característica metodológica el hecho de que las leyes y conceptos físicos se presentan integrados como parte de una ciencia y no como temas aislados. Uno de nuestros principales deseos es conseguir que los alumnos cambien el concepto del estudio de la física, que para la mayoría de ellos consiste en un conjunto de "fórmulas", del cual escogen la que creen que se debe aplicar en función de los datos de que disponen.

Por último, nuestro deseo es que los lectores nos envíen las críticas y sugerencias que estimen convenientes, con el objeto de mejorar la obra en una próxima edición.

LOS AUTORES

Capítulo 1

Física y metrología

1.1 Física

El universo está constituido por materia y energía; de este modo, la física es la ciencia que estudia, en todas las escalas y desde un punto de vista científico, la materia y la energía, las propiedades del espacio-tiempo, así como las interacciones materia-materia y materia-energía, estableciendo las leyes que explican los fenómenos naturales. La física no estudia los fenómenos que modifican la estructura molecular de los cuerpos o la naturaleza de éstos.

La física, para su estudio, se divide en dos grandes ramas: la física clásica y la física moderna.

La física clásica estudia los fenómenos en el ámbito macroscópico, donde tienen validez las leyes de Newton. En esta rama se incluyen la mecánica de sólidos o mecánica newtoniana, así como la mecánica de fluidos, el electromagnetismo, la óptica, la acústica y la termodinámica, entre otros.

La física moderna es la rama que estudia el comportamiento de la materia a escala microscópica, en los mundos atómico y subatómico; se incluyen en esta rama la mecánica cuántica, la materia condensada, la física nuclear, las partículas elementales, la estructura atómica, la astrofísica y la relatividad, entre otras, donde la forma de modelar los fenómenos no obedece a lo establecido en la mecánica clásica.

1.2 Mediciones

Las leyes de la física se expresan en función de cantidades físicas, clasificadas como vectoriales que poseen magnitud y dirección, tales como velocidad, aceleración, fuerza, cantidad de movimiento, etc., y escalares, que sólo poseen magnitud, como masa, tiempo, energía, etc. Una característica importante de estas magnitudes es que son medibles; es decir, que se les puede asignar un valor numérico mediante la comparación con un patrón estandarizado, establecido como unidad, al cual se le asigna una unidad de medida o de la relación entre mediciones de las magnitudes involucradas; algunas de ellas tienen la propiedad de ser *intensivas*, tales como la densidad, la temperatura de un cuerpo o de un sistema en estado de equilibrio, la rapidez de la luz, etc., que no dependen de la cantidad de sustancia, del volumen o de las magnitudes físicas involucradas, por lo que el valor es inalterable; por tal razón, no son propiedades aditivas. Otras, por el contrario, son *extensivas*, esto es, dependen de la cantidad de sustancia o del volumen, y su valor es proporcional al tamaño del sistema que describen. Estas magnitudes son aditivas, tales como la masa, el volumen o la energía interna de un sistema.

Con el propósito de universalizar un sistema único de medidas, que facilitara el intercambio cultural, científico y comercial, se creó en el año 1875 la Conferencia General de Pesas y Medidas,

máxima autoridad de la metrología científica, la cual adoptó universalmente, en el mismo año, el sistema métrico decimal, del cual se origina el sistema internacional de unidades (SI). En 1899 se definió el kilogramo y se adoptó el metro como patrón internacional. En 1948 se incluyó el amperio como unidad fundamental de intensidad corriente. En 1954 se estableció el sistema MKS (metro, kilogramo y segundo), incluyendo el kelvin como unidad de temperatura y la candela como unidad de intensidad luminosa.

A partir del año 1960 se llama sistema internacional de unidades al sistema basado en las seis unidades mencionadas, agregando en 1971 el mol, que mide la cantidad de materia.

1.3 Magnitudes físicas fundamentales

Se llama sistema internacional de unidades el sistema basado en las siete magnitudes denominadas magnitudes fundamentales, independientes —dimensionalmente hablando—, y de las cuales se derivan las demás magnitudes físicas.

Las magnitudes físicas que el SI define como fundamentales son longitud, masa, tiempo, temperatura, intensidad de corriente eléctrica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa.

A cada magnitud fundamental se asociaron las unidades mencionadas con anterioridad, que se llaman unidades fundamentales.

En el sistema internacional de unidades (SI) se definen operacionalmente las unidades físicas fundamentales, independientes dimensionalmente:

1.3.1 Longitud

En 1983 se definió el metro (m) como unidad patrón para la magnitud fundamental de longitud. Corresponde a la distancia que recorre la luz en el vacío en un tiempo de $1/299\,792\,458$ s.

1.3.2 Masa

La unidad de masa es el kilogramo (kg), la cual se define como la masa del kilogramo patrón, un cilindro compuesto de una aleación de platino-iridio que se guarda en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres, cerca de París. Actualmente, es la única que se define por un objeto patrón.

1.3.3 Tiempo

La unidad de tiempo, definida en 1967, es el segundo (s). El segundo es el tiempo requerido por $9\,192\,631\,770$ ciclos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

1.3.4 Temperatura

La unidad de temperatura en el SI es el kelvin (K), el cual se define como la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua, temperatura a la cual el agua, el hielo y el

vapor de agua pueden coexistir en equilibrio estable, lo que sucede a una temperatura de 273,1598 K (0,098 °C) a una presión determinada de vapor de agua.

1.3.5 Intensidad de corriente eléctrica

La unidad de corriente es el amperio (A), definido en 1948 como la intensidad de una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el vacío, produciría una fuerza igual a 2×10^{-7} N/m.

1.3.6 Cantidad de sustancia

La unidad del SI para la cantidad de sustancia es el mol (mol), que se adoptó en 1971. El mol se define como la cantidad de sustancia que tiene un número de entidades elementales como átomos hay en 12 g de C¹² (carbono 12). Ese número es equivalente a la constante de Avogadro, siendo ésta $6,022 \times 10^{23}$ u mol⁻¹, donde u representa la entidad, la cual puede ser átomos, moléculas, electrones, etc.

1.3.7 Intensidad luminosa

La respectiva unidad en el SI es la candela (cd). Una candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática con frecuencia de 540×10^{12} Hz, de forma que la intensidad de radiación emitida, en la dirección indicada, es de 1/683 W por estereorradián.

A renglón seguido se presentan las magnitudes físicas fundamentales del sistema internacional de unidades, con su unidad asociada, la abreviatura de ésta y la respectiva representación dimensional de la magnitud (tabla 1.1).

Tabla 1.1
Magnitudes físicas fundamentales

Magnitud	Unidad	Abreviatura	Rep. dimensional
Longitud	metro	m	L
Masa	kilogramo	kg	M
Tiempo	segundo	s	T
Temperatura	kelvin	K	Θ
Intensidad de corriente	amperio	A	I
Intensidad luminosa	candela	cd	J
Cantidad de sustancia	mol	mol	N

1.4 Magnitudes físicas con unidades derivadas

Algunas magnitudes físicas no fundamentales se definen mediante operaciones definidas en la matemática vectorial; sin embargo, sus respectivas unidades y representación dimensional resultan del producto de potencias de las unidades y respectivas representaciones dimensionales de las magnitudes físicas fundamentales, en las que el factor numérico es la unidad. En la mayoría de los casos se requieren dos o más magnitudes fundamentales.

A continuación se presentan algunas magnitudes físicas con su respectiva unidad, utilizadas en la mecánica clásica, con su símbolo y unidades asociadas, así como la representación dimensional de éstas. Algunas de dichas unidades reciben un nombre especial, tales como newton (N), joule (J), pascal (Pa), hercio (Hz), watt (W), etc. (tabla 1.2).

Tabla 1.2
Magnitudes físicas y unidades derivadas

Magnitud	Símbolo*	Unidad SI		Rep. dimensional
Velocidad	v	m/s		LT^{-1}
Rapidez	v	m/s		LT^{-1}
Aceleración	a	m/s^2		LT^{-2}
Momento	p	kg m/s		MLT^{-1}
Fuerza	F	N	$kg\ m/s^2$	MLT^{-2}
Trabajo y energía	W, E	J	$kg\ m^2/s^2$	ML^2T^{-2}
Potencia	P	W	J/s	ML^2T^{-3}
Velocidad angular	ω	rad/s		T^{-1}
Rapidez angular	ω	rad/s		T^{-1}
Aceleración angular	α	rad/s^2		T^{-2}
Frecuencia	v, f	Hz	1/s	T^{-1}
Momento de inercia	I	$kg\ m^2$		ML^2
Momento angular	L	$kg\ m^2/s$		$ML^2\ T^{-1}$
Torque	τ	Nm	$kg\ m^2/s^2$	ML^2T^{-2}
Densidad	ρ	kg/m^3		ML^{-3}
Presión	P	Pa	N/m^2	$ML^{-1}T^{-2}$

*Los símbolos en negrilla indican que se trata de magnitudes de tipo vectorial.

1.5 Sistema métrico decimal

El sistema métrico decimal o sistema métrico, basado en el metro, es un sistema en el cual los múltiplos y submúltiplos de una unidad de medida se expresan mediante potencias de diez.

El sistema internacional de unidades acepta el uso de múltiplos y submúltiplos que inicialmente se establecieron en el sistema métrico decimal, utilizando prefijos para nombrar los múltiplos y

submúltiplos de una unidad fundamental o derivada; de esta manera, el prefijo se antepone a la unidad, indicando el múltiplo o submúltiplo de ésta.

En la tabla siguiente se muestran los prefijos utilizados, indicando su símbolo y potencia de 10 relacionada a cada uno (tabla 1.3).

Tabla 1.3
Sistema decimal

Submúltiplos			Múltiplos		
Prefijo	Símbolo	Potencia	Prefijo	Símbolo	Potencia
deci	d	10^{-1}	deca	da	10^1
centi	c	10^{-2}	hecto	h	10^2
mili	m	10^{-3}	kilo	k	10^3
micro	μ	10^{-6}	mega	M	10^6
nano	n	10^{-9}	giga	G	10^9
pico	p	10^{-12}	tera	T	10^{12}
femto	f	10^{-15}	peta	P	10^{15}
atto	a	10^{-18}	exa	E	10^{18}
zepto	z	10^{-21}	zetta	Z	10^{21}
yocto	y	10^{-24}	yotta	Y	10^{24}

1.6 Medidas de ángulos

1.6.1 Ángulo plano

El radián (rad) es la unidad del ángulo plano en el sistema internacional. Representa el ángulo central correspondiente a un arco de longitud igual al radio de una circunferencia de radio r (figura 1.1), definiendo el ángulo en radianes como la relación entre la longitud del arco subtendido entre dos radios y el radio. El radián (rad) es, entonces, una magnitud física adimensional.

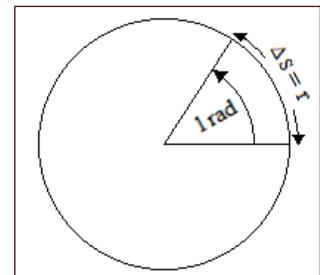


Figura 1.1

1.6.2 Ángulo sólido

Su unidad de medida en el sistema internacional es el estereorradián (sr). El estereorradián es el ángulo comprendido entre el centro de una esfera de radio r y la porción de un elemento de superficie de área igual a r^2 (figura 1.2). El ángulo sólido se define, entonces, como la relación entre el área de la porción del elemento de superficie y el cuadrado del radio, siendo también una magnitud física adimensional.

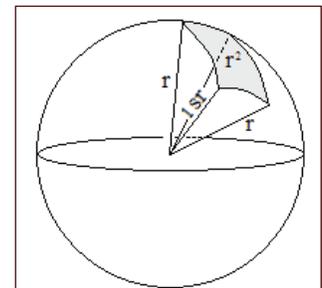


Figura 1.2

1.7 Unidades aceptadas en el sistema internacional de unidades

El sistema internacional de unidades acepta para las magnitudes físicas de volumen, tiempo, temperatura, masa y ángulo plano unidades que no forman parte del SI, pero que se usan normalmente. Estas unidades se indican a continuación:

Para volumen se acepta como unidad el litro (l o L), que definió inicialmente el sistema métrico decimal. Esta unidad es equivalente a 1 dm^3 , de modo que 1 m^3 equivale a 1 000 L.

Para tiempo se aceptan el minuto, la hora y el día, definiendo 1 minuto (min) como 60 s, 1 hora (h) como 60 min o 3 600 s y 1 día (d) como 1 440 min o 86 400 s.

Para temperatura se acepta el grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Para masa se acepta la tonelada métrica (t o Tm). 1 t es equivalente a 1 000 kg.

Finalmente, para ángulo plano se aceptan el grado de arco ($^{\circ}$), el minuto de arco ($'$) y el segundo de arco ($''$), teniendo en cuenta que $1'$ son $60''$ y que 1° son $60'$ o $3 600''$.

1.8 Unidades de longitud usadas en astronomía

Las distancias entre objetos en el universo son extremadamente enormes, de manera que no pueden imaginarse si se expresan en las unidades habituales terrestres. Con el fin de establecer una comprensión entre las distancias relativas entre objetos en el universo se fijaron unidades mayores, tales como la unidad astronómica, el año luz y el parsec, definidas a continuación.

1.8.1 Unidad astronómica (ua)

Es la distancia media entre el planeta Tierra y el Sol, equivalente a 8,32 min luz, siendo la rapidez de la luz $299\,792\,458 \text{ m/s}$, equivalente a $149\,597\,870\,700 \text{ m}$.

1.8.2 Año luz (al)

Es la distancia que recorre la luz o un fotón en un año o 365,25 días.

1.8.3 Parsec (pc)

Su nombre se deriva del inglés *parallax of one arc second* (paralaje de un segundo de arco o arcosegundo). Es la distancia a la que una unidad astronómica subtende un ángulo de un segundo de arco.

Al observar la figura siguiente (figura 1.3), se encuentra que:

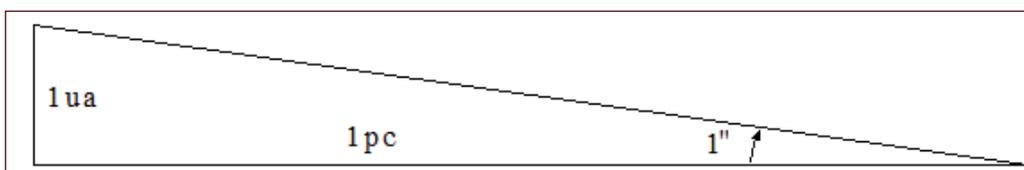


Figura 1.3

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ ua}}{\tan\left(\frac{1}{3600}\right)}$$

A continuación se indica la equivalencia de estas tres unidades astronómicas (tabla 1.4):

Tabla 1.4

Unidades de longitud usadas en astronomía

Unidad	Símbolo	Equivalencia	Notación científica (m)
Unidad astronómica	ua	149 597 870,7 km	$1,4959 \times 10^{11}$
Año luz	al	9 460 730 472.580,8 km	$9,4607 \times 10^{15}$
Parsec	pc	206 264 ua	$3,0857 \times 10^{16}$

1.9 Sistema inglés y conversión de unidades

Este sistema se utiliza ampliamente en Estados Unidos, aunque el resto del mundo industrializado, incluyendo Gran Bretaña, ha adoptado el SI. En la *antigüedad*, las medidas de longitud se basaban en dimensiones *antropomórficas*, por lo que la unidad patrón dependía de cada ser humano. Hoy se define la unidad de longitud en términos de la magnitud de la velocidad de la luz, como lo hace el sistema internacional de unidades.

El pie comenzó como la longitud real de un pie humano. La pulgada *era* originalmente el ancho del pulgar humano. Tres pies, una yarda, era la distancia de la punta de la nariz del hombre al extremo del brazo estirado. La milla era el equivalente a mil pasos.

En la siguiente tabla, aparecen las unidades más utilizadas del sistema inglés, así como su equivalencia en el sistema internacional (tabla 1.5).

Tabla 1.5

Unidades de longitud			
Unidad	Símbolo	Equivalencia en (ft)	Equivalencia en (m)
Legua		15 840	4 828,032
Milla terrestre	mi	5 280	1 609,344
Milla náutica	n mi		1 852
Furlong	fur	660	201,168
Yarda	yd	3	0,9144
Pie	ft	1	0,3048
Pulgada	in	1/12	0,0254
Unidades de masa			
Unidad	Símbolo	Equivalencia en (slug)	Equivalencia en (kg)
Slug	slug	1	14,5889
Libra masa	lb _m		0,453592
Unidad técnica de masa	utm	0,672198	9,806
Unidades de volumen			
Unidad	Símbolo	Equivalencia en (gl)	Equivalencia en (L)
Barril		42	158,9873
Galón	gal	1	3,7854
Cuarto	qt	0,25	0,946353
Onza líquida	fl oz		0,2957353

1.10 Escalas de temperatura

A renglón seguido se señalan las cuatro escalas de temperatura existentes y su respectiva conversión al sistema internacional y a la escala Celsius (tabla 1.6).

Tabla 1-6

Unidad	Abreviatura	Equivalencia (K)	Equivalencia (C)
Kelvin	K	1	$K - 273,15^\circ$
Celsius	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C} + 273,15$	$^\circ\text{C}$
Fahrenheit	$^\circ\text{F}$	$\frac{5}{9} (^\circ\text{F} + 459,67)$	$\frac{5}{9} (^\circ\text{F} - 32^\circ)$
Rankin	$^\circ\text{R}$	$\frac{5}{9} ^\circ\text{Ra}$	$\frac{5}{9} (^\circ\text{Ra} - 491,67^\circ)$

1.11 Otras unidades de medida

1.11.1 Nudo (*kn*)

Es una unidad de medida para la velocidad, utilizada en navegación tanto marítima como aérea, al igual que en meteorología, para medir la velocidad de los vientos. El nudo es equivalente a una milla náutica por hora ($1 \text{ kn} = 1,852 \text{ km/h}$).

1.11.2 Mach

Es una medida de la relación de la magnitud de la velocidad de un objeto a la de la rapidez del sonido en el medio en el cual se mueve el objeto. Este número es, por lo tanto, adimensional y no es constante, ya que la rapidez del sonido depende de las características físicas del medio, tales como la temperatura, densidad y presión. A una temperatura de 15°C , Mach 1 equivale a $340,3 \text{ m/s}$. Esta unidad relativa es utilizada en aerodinámica, para la modelación de aeronaves, y en el estudio de fluidos en la determinación de la compresibilidad.

