

Atanasio Lleó - Lourdes Lleó

GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES

**Un estudio sistemático
de 565 magnitudes físicas**

**Cómo utilizar el Sistema Internacional
de Unidades SI en la Ciencia
y la Ingeniería, hoy obligatorio
en todo el mundo**



© Atanasio Lleó - Lourdes Lleó, 2008

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos

Internet: www.diazdesantos.es/ediciones (España)

E-mail: ediciones@diazdesantos.es

ISBN: 978-84-7978-767-7

Depósito legal: M. 34.773-2008

Dibujos y cubierta: A. Calvete

Fotocomposición: FER

Impresión: Edigrafos

Encuadernación: Rústica-Hilo

Elaboración informática de los originales: Pablo Lleó

Impreso en España

ACERCA DE LOS AUTORES



Atanasio Lleó, Doctor en Física y Licenciado en Química, ha sido experto de la UNESCO para la enseñanza de Física y Matemáticas, Profesor de Física en las Escuelas Técnicas Superiores de Arquitectura, Ingenieros Agrónomos, Ingenieros Aeronáuticos e Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Ha sido, además, Profesor de la Universidad Nacional de Asunción (Paraguay), Profesor de Física en la Universidad de Valencia, Profesor de Mecánica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UNED y, durante cuarenta años, Catedrático de Física Aplicada en la Escuela de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad Politécnica de Madrid. Es autor de 16 libros, entre los que destacan los titulados *Mecánica y Tensores Cartersianos y Aplicaciones*, así como doce trabajos de investigación en Física Nuclear y Física de Partículas, publicados en revistas de la especialidad.

Es actualmente Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de Madrid y dirige el curso de *Humanidades, Ingeniería y Arquitectura*. Pertenece a los CTN-7 y CTN-82 de AENOR.

Es de destacar que ha sido galardonado con el *Premio al Mejor Libro de Texto* de la Universidad por el libro titulado *Física para Ingenieros* (Ed. Mundi-Prensa, 2001).



Lourdes Lleó, Doctor Ingeniero Agrónomo (Sobresaliente *cum Laude*), Profesor Titular de Física Aplicada de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad Politécnica de Madrid, Master en Gestión de Calidad de la Escuela de Organización Industrial.

Ha sido Auditora de AENOR en Sistemas de Calidad, ha realizado la implantación de Sistemas de Calidad en Red Eléctrica Española y otras empresas.

Tiene publicados siete trabajos de investigación en Física e Ingeniería Agronómica financiados por la Unión Europea, presentados en Congresos internacionales y publicados en revistas de la especialidad. Es, además, autora de ocho libros de carácter didáctico, tales como los titulados: *Problemas y Cuestiones de Física* (Ed. Mundi-Prensa, 2002) y *Problemas de Física para Ingenieros* (Ed. EUIT Agrícola UPM, 2007).

PRÓLOGO

Es para mí un honor y una especial satisfacción atender a la petición del profesor Atanasio Lleó y la profesora Lourdes Lleó de prologar este manual de magnitudes físicas y sus unidades de medida, tanto por la trayectoria profesional de sus autores como por la relevancia de esta obra para la metrología, y que no puedo calificar de otra forma que como un libro «amigo», de manejo, consulta y estudio cómodos, eminentemente práctico y «excelente».

Para toda ciencia experimental, la medida constituye una operación fundamental que cuantifica las propiedades físicas de los cuerpos a través de las unidades de medida. Como dijo Mendeleev «la ciencia comienza donde empieza la medición, no siendo posible ciencia exacta en ausencia de mediciones»; y más recientemente un «gurú» de la calidad como Deming dijo «lo que no se pueda medir no se puede mejorar». La ciencia es completamente dependiente de las medidas y de la exactitud con que estas se realizan y se expresan. Las medidas son parte de nuestra vida. Para que nos hagamos una idea del impacto que tienen en la sociedad actual, se puede estimar que en Europa se mide con un coste equivalente mayor del 1% de nuestro PIB y con un retorno económico equivalente entre el 2% y el 7% del PIB. Así pues, las medidas son una necesidad científica, económica y social.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) fue uno de los grandes logros del siglo XX, y ha permitido unificar y dar coherencia a la gran variedad de subsistemas de unidades que entorpecían y dificultaban la transferencia de resultados de mediciones en la comunidad internacional. Hoy en día, en un mundo globalizado, se impone la unificación.

A pesar de las grandes ventajas que supone para la comunidad científica, y en general para la sociedad, la utilización del SI, aún hoy, en nuestro país, existen libros de texto y artículos científicos o de divulgación en los medios de comunicación que, o no lo aplican, o lo aplican incorrectamente. Una de las causas principales de esta realidad es la falta de rigor en la enseñanza de las unidades de medida y en su exigencia. Algunos de los profesionales de la enseñanza o incluso libros de texto no aplican el Sistema Internacionales de Unidades (SI) declarado sistema oficial en España y en casi la totalidad de los países del mundo.

Siendo consciente de la existencia de esta laguna, la Comisión de Laboratorios Asociados del Consejo Superior de Metrología (CSM), dentro del informe «La metrología científica en España y en su entorno Europeo», presentado en mayo de 2007, recoge como una de las acciones prioritarias a desarrollar «Colaborar con el Ministerio de Educación y Ciencia y las CC AA para que se mejoren los textos de enseñanza en relación con los conceptos básicos de Metrología y unidades del SI». La publicación de este libro es oportuna y en línea con las actuaciones propuestas.

X PRÓLOGO

En la obra que nos ocupa se describen de una forma práctica, ordenada y resumida, más de medio millar de magnitudes físicas, indicándose sus fórmulas más representativas, sus dimensiones, así como sus unidades de medida en el Sistema Internacional de Unidades (SI) y equivalencias de otras unidades al mismo. También, para cada magnitud se recogen aquellas constantes y valores que le son afines y se informa sobre las unidades antiguas más utilizadas.

Este «vademécum» de magnitudes y unidades redactado de forma clara, concisa y amigable, apoyado en referencias y fuentes fiables, ayudará a comprender el significado de muchas magnitudes y facilitará el empleo del SI a científicos, tecnólogos, profesionales de la enseñanza, alumnos y en general a todos aquellos interesados con las medidas. Se trata de una obra seminal en nuestro país sobre magnitudes y unidades de medida, que seguramente se convertirá para muchos en un libro de consulta habitual.

José Ángel Robles Carbonell
Subdirector Científico y de RRII
Centro Español de Metrología
Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

PRESENTACIÓN

El objetivo de este libro es eminentemente práctico: aclarar el significado de las diversas magnitudes y facilitar el empleo del Sistema Internacional de Unidades, SI, en la Física y en los diversos campos de la Ciencia y la Ingeniería (incluso en la actividad ordinaria). No hemos querido renunciar, sin embargo, a resaltar algunos breves apuntes históricos y humanísticos.

Hemos considerado que un libro como el que aquí presentamos puede contribuir a eliminar errores, así como a simplificar el trabajo a todo científico, ingeniero o cualquier persona que haya de manejar datos o instrumentos, de manera que las unidades con que se encuentre no le ocasionen problemas ni le induzcan a confusiones. No debería jamás ocurrir que, al aplicar un elaborado proceso tecnológico, se produzcan errores a causa simplemente de un empleo indebido de las unidades (algo que alguna vez ya se ha producido, como luego veremos).

Hoy, afortunadamente, hay acuerdo general en lo que respecta a las unidades (el uso del SI), tanto en el campo científico como en el tecnológico, con todas las ventajas que ello aporta. Aunque no debemos olvidar que en algunos casos concretos aún se usan unidades que no pertenecen al SI, y existen, además, gran número de textos y trabajos que se realizaron cuando todavía se usaban otros sistemas de unidades.

En cuanto a los estudiantes, no es necesario resaltar que el disponer de un texto de estas características resulta hoy una necesidad casi absoluta. Es preciso eliminar toda sombra de duda respecto a las magnitudes físicas y sus unidades. Se trata de que el estudioso pueda centrar el esfuerzo en el conocimiento de las teorías y técnicas que son el verdadero objeto de su aprendizaje, sin que los problemas de las unidades distraigan su atención.

Para la elaboración del libro nos hemos basado en la octava edición del documento *Le Système international d'unités (SI)* (2006), elaborado por el Bureau International de Poids et Mesures (BIPM), perteneciente a la Organización Internacional de la Convención del Metro (hoy formada por 71 países), para cuya preparación se ha consultado a los principales organismos internacionales de las diversas materias. Además hemos tenido en cuenta las normas ISO-21 *Quantities and Units* (1993) y las normas españolas de AENOR UNE 82100 *Unidades de Medida. Recopilación de Normas UNE* (2002), así como los valores numéricos CODATA (2001) y otras fuentes que citamos en la Bibliografía.

Conviene remarcar que el libro no es un simple compendio de normas (las cuales, por otra parte, pueden consultarse fácilmente en los documentos reseñados). Lo que con su publicación se pretende es proporcionar una breve orientación sobre lo que significan las magnitudes y, al mismo tiempo, indicar las pautas acerca del manejo de las unidades físicas, tratando de evitar confusiones.

XII PRESENTACIÓN

Lo que consideramos más destacable de este libro es el trato detallado que hemos querido dar a las 565 magnitudes físicas estudiadas, exponiendo, para cada una de ellas, su definición, aclaraciones conceptuales, las fórmulas más importantes, las dimensiones, la unidad SI, otras unidades y la equivalencia con la unidad SI, así como, en muchos casos, los valores numéricos más frecuentes. Al revisar la bibliografía internacional se echaba en falta una publicación que abarcara toda esta información, por lo que decidimos emprender la realización de este trabajo.

El índice alfabético permite consultar en breve tiempo, por ejemplo, cuál es el significado de una determinada magnitud física, su unidad SI, o a qué magnitud pertenece una unidad cualquiera que aparezca en un trabajo y su relación con la correspondiente unidad SI, o de qué orden son los valores usuales, así como los valores de las constantes.

Si consiguiésemos facilitar el trabajo a quienes consulten este libro, el esfuerzo que ha supuesto su elaboración no habría sido en vano. Esta sería nuestra mejor recompensa.

Finalmente, queremos expresar nuestro agradecimiento a la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola, al Rectorado de la Universidad Politécnica de Madrid, al Centro Español de Metrología y a la Asociación Española de Normalización AENOR por su inestimable apoyo, que ha sido fundamental para la publicación de este libro.

LOS AUTORES.



Atanasio Lleó
e-mail: atanasio.lleo@upm.es



Lourdes Lleó
e-mail: lourdes.lleo@upm.es

Invitamos a nuestros amables lectores a que nos hagan llegar sus sugerencias acerca del contenido de este libro, que nos pueden ser de gran utilidad. Muchas gracias.

ÍNDICE

PRÓLOGO	IX
PRESENTACIÓN	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. UNIDADES EN LA ANTIGÜEDAD	5
3. BREVE HISTORIA DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)	11
3.1. La revolución francesa gesta el sistema métrico decimal	11
3.2. Los primeros avances del sistema métrico decimal	13
3.3. Nuevas definiciones del metro	14
3.4. La unidad de masa	14
3.5. La molécula gramo y el mol. La cantidad de sustancia	15
3.6. Definiciones de la unidad de tiempo	15
3.7. Primitivo desarrollo de las unidades eléctricas	16
3.8. La unificación de Giorgi	18
3.9. El nacimiento del Sistema Internacional de Unidades (SI)	19
3.10. Las unidades de temperatura	20
3.11. Las unidades de óptica fotométrica	20
3.12. Continuo perfeccionamiento del Sistema Internacional	21
4. UNIDADES BÁSICAS DEL SI	23
4.1. Unidad SI de longitud: metro (m)	24
4.2. Unidad SI de masa: kilogramo (kg)	24
4.3. Unidad SI de tiempo: segundo (s)	24
4.4. Unidad SI de temperatura: kelvin (K)	24
4.5. Unidad SI de intensidad de corriente eléctrica: amperio (A)	24
4.6. Unidad de cantidad de sustancia: mol (mol)	25
4.7. Unidad de intensidad luminosa: candela (cd)	25
5. UNIDADES DERIVADAS	27
5.1. Unidades angulares (unidades suplementarias)	27
5.2. Determinación de las unidades derivadas	28
5.3. Ejemplos de unidades derivadas	28
6. OBTENCIÓN DE UNIDADES POR LA DIMENSIONES	33
6.1. Las expresiones dimensionales	33
6.2. Las siete magnitudes elegidas como base del Sistema Internacional.....	34
6.3. Dimensiones y unidad SI de las siete magnitudes básicas	34
6.4. Dimensiones de las magnitudes derivadas	35
6.5. Ejemplos de obtención de unidades SI por medio de las dimensiones	36
7. PREFIJOS DECIMALES	41
7.1. Múltiplos y submúltiplos decimales	41
7.2. Ejemplos y normas para utilizar prefijos	42
7.3. Prefijos y unidades en informática	44

XIV ÍNDICE

8. NORMAS Y RECOMENDACIONES	45
8.1. Normas para expresar magnitudes	45
8.2. Normas para expresar unidades	48
8.3. Los valores numéricos	53
8.4. Cálculos realizados mediante fórmulas	57
8.5. La notación de los elementos químicos y los nucleidos	59
8.6. Los subíndices y superíndices	60
8.7. Diversas expresiones de magnitudes y unidades	61
8.8. Empleo de algunos términos en los nombres de magnitudes	62
8.9. Las tablas y gráficas	67
8.10. El alfabeto griego	68
9. MECÁNICA (PARTÍCULAS Y SÓLIDOS)	69
9.1. Longitud $l, x, y, z, s, a, b, c, h, D, r, R, \delta, \rho, q$	69
9.2. Área o superficie, A, S	82
9.3. Volumen V, v, τ	88
9.4. Ángulo $\theta, \varphi, \psi, \alpha, \beta, \gamma$	102
9.5. Radio de curvatura	103
9.6. Curvatura, κ	105
9.7. Ángulo sólido, Ω, ω	106
9.8. Tiempo, $t, (T), \tau$	107
9.9. Velocidad, v, c, u, w	110
9.10. Aceleración (y campo gravitatorio), a, g	113
9.11. Frecuencia (y frecuencia de rotación) (en fenómenos periódicos), $\nu, (f)(n)$	115
9.12. Velocidad angular. Frecuencia angular o pulsación, ω, Ω	117
9.13. Aceleración angular, α	119
9.14. Masa (masa gravitatoria) (masa de inercia), m	119
9.15. Fuerza, F, f	132
9.16. Peso, $P, (p, w)$	134
9.17. Energía. Trabajo. Calor $W, E, Q, (U, A, T)$	136
9.18. Potencia P	139
9.19. Presión p	141
9.20. Acción A	143
9.21. Densidad (densidad másica) r	144
9.22. Volumen específico (volumen másico) $\nu (u)$	146
9.23. Densidad superficial (másica) $\rho_s (\rho_A, \sigma)$	147
9.24. Densidad lineal (másica) $\rho_L (\lambda)$	148
9.25. Peso específico (ρ_e)	149
9.26. Peso específico superficial ρ_s	150
9.27. Peso específico lineal ρ_l	151
9.28. Densidad relativa (másica) d, ρ_r	151
9.29. Densidad de energía u, w	153
9.30. Momento estático (o momento de primer orden) M	154
9.31. Momentos de inercia. Productos de inercia I, J, P	155
9.32. Tensor de inercia, \vec{I}	156

9.33. Momento de fuerzas. Par de fuerzas (Torque) M	157
9.34. Cantidad de movimiento (momento lineal, momento, momentum) p	158
9.35. Momento cinético (momento de la cantidad de movimiento, momento angular) L (c)	159
9.36. Densidad de cantidad de movimiento ρ_p	161
9.37. Densidad de momento cinético ρ_L	162
9.38. Impulso (impulso de percusión) I, P, Π	163
9.39. Impulso angular (momento de percusión), H	164
9.40. Velocidad areolar S	165
9.41. Factor de rozamiento (coeficiente de rozamiento), (estático y dinámico), μ_s, μ	166
9.42. Coeficiente de resistencia a la rodadura ρ	167
9.43. Coeficiente de resistencia al pivotamiento, δ	169
9.44. Rendimiento mecánico, η	169
9.45. Campo gravitatorio (intensidad del) \vec{g}	170
9.46. Potencial gravitatorio, V (Φ)	171
9.47. Constante de la gravitación G	172
10. FÍSICA DE FLUIDOS Y NÚMEROS CARACTERÍSTICOS	
ADIMENSIONALES	175
10.1. Caudal (o caudal en volumen), q, q_v, Φ	175
10.2. Caudal en masa, q_m (G)	177
10.3. Viscosidad (o viscosidad dinámica), η	177
10.4. Viscosidad cinemática, ν	178
10.5. Viscosidad relativa, η_r	179
10.6. Fluidez, f	179
10.7. Tensión superficial, σ (γ)	180
10.8. Coeficiente de fricción lineal, b	181
10.9. Coeficiente de fricción angular, β	182
10.10. Coeficiente de fricción cuadrática, c	183
10.11. Pérdida lineal de carga, κ	183
10.12. Resistencia hidrodinámica (de un tubo), R_H	184
10.13. Número de Reynolds, Re	185
10.14. Número de Mach (o de Cauchy), Ma	186
10.15. Número de Euler (o de Newton), Eu	187
10.16. Número de Froude (o de Reech), Fr, Fr'	187
10.17. Número de Weber, We	188
10.18. Número o coeficiente de potencia, Po	188
10.19. Número o coeficiente de caudal, Qa	189
10.20. Número o coeficiente manométrico, Mn	189
10.21. Número de Knudsen, Kn	190
10.22. Número o factor de rugosidad, Ru	190
10.23. Número o factor de las ondas superficiales, Os	191
10.24. Número de Strouhal, Sr	191
10.25. Número de Grashof, Gr	192
10.26. Número de Grashof para transporte de masa, Gr^*	192

XVI ÍNDICE

10.27. Número de Nusselt, Nu	193
10.28. Número de Nusselt para transporte de masa, Nu^*	194
10.29. Número de Stanton (o número de Margoullis), St (Ms)	194
10.30. Número de Stanton para transporte de masa, St^*	195
10.31. Número de Péclet, Pe	195
10.32. Número de Péclet para transporte de masa, Pe^*	196
10.33. Número de Fourier, Fo	196
10.34. Número de Fourier para transporte de masa, Fo^*	197
10.35. Número de Pradtl, Pr	197
10.36. Número de Schmidt, Sc	198
10.37. Número de Lewis, Le	198
10.38. Número de Reynolds magnético, Rm	199
10.39. Número de Alfvén, Al	199
10.40. Número de Hartmann, Ha	200
10.41. Primer número de Cowling, Co_1	200
10.42. Número de Cowling (o segundo número de Cowling), Co , Co_2	201
11. FENÓMENOS PERIÓDICOS. ONDAS. ACÚSTICA	203
11.1. Periodo, T	203
11.2. Frecuencia. Frecuencia de rotación, ν , (f), (n)	204
11.3. Frecuencia angular (o frecuencia circular) (o pulsación), ω	205
11.4. Amplitud y elongación, A , x (o bien θ_0 , θ)	206
11.5. Constante armónica, k	207
11.6. Amplitud de velocidad, v_0 , v_m , U	208
11.7. Amplitud de aceleración, a_0 , a_m	208
11.8. Constante elástica (de un sistema que se deforma elásticamente), K , k ..	209
11.9. Coeficiente de resistencia viscosa, b	210
11.10. Coeficiente de amortiguamiento y constante de tiempo, δ , τ	211
11.11. Decremento logarítmico, Λ	212
11.12. Reactancia mecánica de un oscilador elástico, X	213
11.13. Impedancia mecánica Z , Z_m	214
11.14. Frecuencia angular propia (frecuencia de resonancia), ω_0	215
11.15. Frecuencia angular del oscilador amortiguado (pseudofrecuencia angular), ω	216
11.16. Coeficiente de anarmonicidad, s	217
11.17. Energía del oscilador elástico E , W	218
11.18. Potencia absorbida y potencia disipada (en un oscilador elástico forzado amortiguado), P_a , P_d	219
11.19. Constante de tiempo. Tiempo de relajación, τ	220
11.20. Factor de calidad, Q	221
11.21. Velocidad de propagación de una onda, c , v	222
11.22. Índice de refracción, n , n_{ij}	223
11.23. Número de Mach, Ma	224
11.24. Longitud de onda, λ	225
11.25. Número de ondas, σ	226
11.26. Número de ondas angular, k	226

11.27. Tono (y timbre) de un sonido, v, f	227
11.28. Relación e intervalo de frecuencias (intervalo musical), r, i	228
11.29. Desplazamiento acústico de partícula (elongación y amplitud), $\xi, (x), A$	230
11.30. Velocidad de partícula (y amplitud) (velocidad acústica), u, v, U	231
11.31. Aceleración en una onda. Aceleración acústica, a	232
11.32. Presión estática (presión de equilibrio), p_s	233
11.33. Presión y amplitud de presión. Presión acústica, p, p_a, P	233
11.34. Densidad de energía en una onda. Densidad de energía acústica, $w, (w_a), (e)$	234
11.35. Potencia (transportada, emitida o transferida por una onda). Flujo de energía, P, P_s	235
11.36. Intensidad de una onda. Intensidad acústica. Intensidad sonora, I, J	236
11.37. Nivel de campo (y diferencia de nivel de campo) (para desplazamiento, presión acústica, campo eléctrico, etc.), L_F, L_A, L_p, L_E	237
11.38. Nivel de presión acústica, L_p	239
11.39. Nivel de potencia e intensidad (y diferencias de nivel), L_w, L_I	241
11.40. Nivel de potencia e intensidad acústicas, L_w, L_I	243
11.41. Nivel de sonoridad, L_N	245
11.42. Sonoridad, N	247
11.43. Impedancia acústica, Z_a	248
11.44. Impedancia acústica específica, Z_s	248
11.45. Impedancia característica (de un medio), Z_c, Z	249
11.46. Tasa de flujo de volumen (o velocidad de volumen), q	251
11.47. Reflectancia. Factor de reflexión, r, ρ	252
11.48. Transmitancia. Factor de transmisión, τ	253
11.49. Factor de disipación, δ, ψ	254
11.50. Factor de absorción, α, a	255
11.51. Índice de reducción acústica (pérdida de transmisión acústica), R	256
11.52. Factor o coeficiente de reflexión para amplitudes, r_A	258
11.53. Factor o coeficiente de transmisión para amplitudes, τ_A	258
11.54. Velocidades de fase y de grupo, c_F, c_G, v_F, v_G	259
11.55. Coeficiente de fase, β	260
11.56. Área de absorción (equivalente a la superficie de una pared), A	261
11.57. Coeficiente de atenuación de un medio, α	261
11.58. Coeficiente de propagación, γ	262
11.59. Tiempo de reverberación, T	262
11.60. Longitudes de atenuación y semiatenuación, $x_a, x_{1/2}$	263
12. TERMODINÁMICA Y ELASTICIDAD	265
12.1. Presión. Presión efectiva. Tensión, p, p_e	265
12.2. Tensión normal, esfuerzo normal, $\sigma, \sigma_i, \tau_i, \tau_{ii}$	266
12.3. Esfuerzo cortante (de cizalladura), τ, τ_{ij}	266
12.4. Tensor esfuerzo o de tensiones, $\vec{\tau}$	267
12.5. Tensiones principales, τ_i, σ_i	268
12.6. Deformación lineal (o dilatación lineal), ϵ, ρ	269

XVIII ÍNDICE

12.7. Deformación angular, γ, ψ	269
12.8. Deformación de volumen (o dilatación cúbica), θ	270
12.9. El tensor deformación, ξ	270
12.10. Deformaciones principales, ξ_i	271
12.11. Módulo de elasticidad longitudinal (o módulo de Young), E	272
12.12. Coeficiente de Poisson (o número de Poisson), μ, ν	274
12.13. Módulo de torsión (o módulo de cizalla, o módulo de rigidez), G	275
12.14. Módulo de compresibilidad (o módulo de compresión) (a temperatura constante), K	276
12.15. Constante o coeficiente de un muelle elástico, k	277
12.16. Constante o coeficiente de una clase dada de muelle, J	277
12.17. Constante o coeficiente de torsión de un hilo o una barra, k	278
12.18. Fuerza deformadora y fuerza recuperadora de un muelle, F	279
12.19. Momento torsor y momento recuperador de un hilo o una barra, M	280
12.20. Fuerza cortante en una viga, F, Q	280
12.21. Momento flector en un viga, M	281
12.22. Coeficiente de restitución, ε	282
12.23. Momento estático geométrico de un área plana, M	283
12.24. Momento de inercia geométrico o momento cuadrático de una área plana, I_a, I	283
12.25. Momento cuadrático polar de una área plana, I_p	284
12.26. Temperatura, T, t, θ	285
12.27. Constante universal de los gases perfectos o constante molar de los gases perfectos, R	288
12.28. Constante particular de un gas perfecto (o constante específica), r	288
12.29. Parámetros de la ecuación de Van der Waals, a, b	289
12.30. Valores críticos y variables reducidas de Van der Waals, $p_c, v_c, T_c, \pi, \tau, \theta$	290
12.31. Constante de Boltzman, k	291
12.32. Energía interna, o energía termodinámica, U	292
12.33. Entalpía, H	292
12.34. Entropía, S	293
12.35. Energía libre o energía de Helmholtz F, A	294
12.36. Entalpía libre o energía de Gibbs, G	295
12.37. Energía interna específica, o energía termodinámica específica (másica), $u (e)$	295
12.38. Energía interna molar (o energía termodinámica molar), u_m, u	296
12.39. Entalpía específica (másica), h	297
12.40. Entalpía molar h_m, h	297
12.41. Entropía específica (entropía másica), s	298
12.42. Entropía molar, s_m, s	298
12.43. Energía libre (o energía de Helmholtz) específica (másica), f, a	299
12.44. Energía libre (o energía de Helmholtz) molar, f_m, f, a_m, a	300
12.45. Entalpía libre (o energía de Gibbs) específica (másica), g	300
12.46. Entalpía libre (o energía de Gibbs) molar, g_m, g	301
12.47. Volumen molar v_m, v	301

12.48. Función de Massieu, J	302
12.49. Función de Planck, Y	303
12.50. Termentropía o energía ligada, TS	303
12.51. Coeficiente de dilatación lineal (isobárico), α_l	304
12.52. Coeficiente de dilatación superficial (isobárico), α_A	305
12.53. Coeficiente de dilatación cúbica (isobárico), α_v , α , (γ)	305
12.54. Coeficiente relativo de presión (o coeficiente piezotérmico), α_p , β	306
12.55. Coeficiente de presión, β^F	307
12.56. Compresibilidad isotérmica (o coeficiente de compresibilidad isotérmica), κ_T , κ	307
12.57. Compresibilidad isentrópica (o coeficiente de compresibilidad adiabática), κ_S , (κ)	308
12.58. Módulo de compresibilidad isotérmica, K	309
12.59. Módulo de compresibilidad isentrópica (adiabática), χ	310
12.60. Capacidad calorífica, C	311
12.61. Capacidad calorífica másica o capacidad calorífica específica (calor específico), c	311
12.62. Capacidad calorífica específica a presión constante (calor específico a presión constante), c_p	312
12.63. Capacidad calorífica específica a volumen constante (calor específico a volumen constante), c_v	313
12.64. Capacidad calorífica específica a saturación (calor específico a saturación), c_{sat}	314
12.65. Capacidad calorífica molar, C_m	315
12.66. Capacidad calorífica molar a presión constante, C_p	315
12.67. Capacidad calorífica molar a volumen constante, C_v	316
12.68. Cociente de las capacidades caloríficas, γ	317
12.69. Coeficiente politrópico (exponente politrópico) k , n	318
12.70. Exponente isentrópico, κ	319
12.71. Calor. Cantidad de calor. Calores de transformación, Q , L , I	319
12.72. Calor de combustión (poder calorífico de un combustible o una sustancia de alimentación), P , Q , q (PCI , PCS)	321
12.73. Tasa de flujo térmico, Φ	323
12.74. Densidad de la tasa de flujo térmico, ϕ , q	324
12.75. Conductividad calorífica (o conductividad térmica), κ , λ , (k)	325
12.76. Coeficiente de transferencia de calor. Coeficiente de transferencia de calor superficial (coeficiente de transmisión térmica), h , K (k) (α) ..	326
12.77. Coeficiente de aislamiento térmico, M	327
12.78. Resistencia térmica, R	328
12.79. Conductancia térmica, G	329
12.80. Difusividad térmica, a	329
12.81. Longitud de onda térmica (en la conducción térmica por el interior de un material), λ	330
12.82. Velocidad de propagación de una onda térmica, u	332
12.83. Coeficiente de atenuación de una onda térmica, α	332

XX ÍNDICE

12.84. Rendimiento de un ciclo (o rendimiento termodinámico). Rendimiento de un motor térmico, η , r	334
12.85. Eficiencia de un ciclo frigorífico (o eficiencia frigorífica o rendimiento frigorífico), f , h_{FRI}	334
12.86. Rendimiento de una termobomba (o rendimiento de calefacción de un ciclo frigorífico), ε , η_{CAL}	335
12.87. Humedad absoluta, a	336
12.88. Presión parcial del vapor de agua, e , p_v	337
12.89. Humedad específica, q	338
12.90. Proporción de mezcla, ω	338
12.91. Masa molecular relativa ficticia del aire húmedo, M	339
12.92. Constante particular del aire húmedo, r	340
12.93. Humedad relativa, h	341
12.94. Temperatura del rocío, T_r	343
12.95. Temperatura de saturación adiabática (y temperatura del termómetro húmedo), T'	344
12.96. Temperatura virtual, T_v	345
13. ELECTRICIDAD. ELECTROMAGNETISMO	347
13.1. Carga eléctrica, Q , q	347
13.2. Corriente eléctrica (o intensidad de corriente eléctrica), I , i	349
13.3. Densidad de carga ρ , (μ)	350
13.4. Densidad superficial de carga σ , (ρ_S)	351
13.5. Densidad lineal de carga λ , (ρ_L)	352
13.6. Campo eléctrico. Intensidad de campo eléctrico, E	353
13.7. Potencial eléctrico y diferencia de potencial (tensión, voltaje) V , (φ) (u), ΔV	354
13.8. Permitividad del vacío (constante dieléctrica del vacío. Constante eléctrica), ε_0	356
13.9. Permitividad (de un medio material) ε	357
13.10. Permitividad relativa (de un medio) ε_r (ε')	359
13.11. Inducción eléctrica (o densidad de flujo eléctrico), D	360
13.12. Flujo del campo eléctrico Φ_E	362
13.13. Flujo eléctrico (o flujo de inducción eléctrica) Ψ	363
13.14. Circulación del campo eléctrico, C_E	364
13.15. Capacidad (capacidad eléctrica) C	366
13.16. Elastancia K	367
13.17. Resistencia (resistencia eléctrica), R	368
13.18. Conductancia (en corriente continua) G	369
13.19. Resistividad ρ	370
13.20. Conductividad σ , (γ)	372
13.21. Fuerza electromotriz (y fuerza contraelectromotriz), E , ε , ε'	373
13.22. Densidad de corriente, J (S , j)	374
13.23. Densidad lineal de corriente, A , K (α)	375
13.24. Potencia (potencial eléctrica) P	376
13.25. Momento dipolar eléctrico (momento dipolar) \vec{p}	377

13.26. Polarización (eléctrica) \vec{P}	379
13.27. Susceptibilidad eléctrica, χ, χ_e	380
13.28. Densidad de carga ficticia de polarización, ρ'	381
13.29. Densidad superficial de carga ficticia de polarización σ'	382
13.30. Polarización molar P_m	383
13.31. Momento cuadripolar, \vec{Q}, Q_{ij}	384
13.32. Densidad de energía electrostática $w (w_E, u_E)$	385
13.33. Movilidad (movilidad iónica), μ, μ_+, μ_-	386
13.34. Relación de movilidad b	387
13.35. Densidad de corriente de desplazamiento (corriente de desplazamiento), corriente de inducción eléctrica, $\partial D/\partial t$	388
13.36. Inducción magnética (o densidad de flujo magnético), \vec{B}	389
13.37. Campo magnético \vec{H}	391
13.38. Permeabilidad del vacío (permeabilidad magnética del vacío, constante magnética o permeabilidad absoluta), μ_o	393
13.39. Permeabilidad (permeabilidad magnética) (de un medio material), μ ...	394
13.40. Permeabilidad (magnética) relativa $\mu_r (\mu')$	396
13.41. Flujo magnético Φ	397
13.42. Inductancia propia. Autoinductancia (coeficiente de autoinducción) (autoinducción) (de un circuito o de un sistema eléctrico), L	398
13.43. Inductancia mutua (coeficientes de inducción mutua) L_{ij}, M_{ij}, M	400
13.44. Factor de acoplamiento $k (\kappa)$	401
13.45. Factor de dispersión σ	402
13.46. Potencial vector magnético, \vec{A}	402
13.47. Momento magnético \vec{m}	404
13.48. Imanación $\vec{M}, (\vec{H}_i)$	406
13.49. Polarización magnética (o inducción magnética intrínseca), \vec{J}, \vec{B}_i	407
13.50. Susceptibilidad magnética, κ, χ_m	408
13.51. Densidad de corriente ficticia de imanación $J_m, (J')$	410
13.52. Densidad lineal de corriente ficticia de imanación K_m, A_m	411
13.53. Polo magnético (carga o masa magnética) p	412
13.54. Densidad de energía electromagnética $w (w_B, u_B)$	414
13.55. Vector de Poynting $\vec{S}, (\vec{II})$	415
13.56. Diferencia de potencial magnético (tensión magnética) (potencial escalar magnético), U_m, U	417
13.57. Fuerza magnetomotriz F_m, F	418
13.58. Reluctancia $R_m, R (l)$	419
13.59. Permeancia $\Lambda (P)$	421
13.60. Número de pares de polos, p	422
13.61. Impedancia, en corriente alterna (impedancia compleja. Módulo de la impedancia), $\vec{Z}, Z, Z $	422
13.62. Reactancia X	424
13.63. Resistencia (en corriente alterna), R	425
13.64. Factor de calidad Q	426
13.65. Valores eficaces (de las magnitudes sinusoidales), V, I	426

XXII ÍNDICE

13.66. Diferencia de fase. Desfase φ	427
13.67. Admitancia (admitancia compleja y módulo), \vec{Y}, Y	428
13.68. Susceptancia B	429
13.69. Conductancia G	430
13.70. Potencia (en corriente alterna), P	430
13.71. Factor de potencia, $\cos \varphi = \lambda$	431
14. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. ÓPTICA	433
14.1. Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas c	433
14.2. Energía radiante (de una onda electromagnética), $W, Q (U, Q_e)$	434
14.3. Densidad de energía radiante, w, u	435
14.4. Densidad espectral de la energía radiante o concentración espectral de la densidad de energía radiante, $w_\lambda, u_\lambda, w_\nu, u_\nu$	436
14.5. Flujo radiante (o flujo de energía radiante), Φ, P, Φ_E (luminosidad o magnitud absoluta de una estrella u objeto cósmico, L)	437
14.6. Flujo radiante espectral (o concentración espectral del flujo radiante) $\Phi_\lambda, P_\lambda, \Phi_\nu, P_\nu$	439
14.7. Fluencia de energía radiante, Ψ	440
14.8. Tasa de fluencia de energía radiante (o irradiancia esférica), ψ, φ	440
14.9. Irradiancia esférica espectral (o tasa de fluencia espectral de energía radiante), $\psi_\lambda, \psi_\nu, \varphi_\lambda, \varphi_\nu$	441
14.10. Intensidad radiante (de una fuente o foco en una dirección dada) $I, (I_e)$..	442
14.11. Intensidad radiante espectral (de una fuente en una dirección dada), I_λ, I_ν	443
14.12. Radiancia (de una superficie emisora) $L (L_e)$	444
14.13. Radiancia espectral (de una superficie emisora) L_λ, L_ν	445
14.14. Exitancia radiante (o exitancia) (de una superficie que emite radiación), $M (M_e)$	446
14.15. Exitancia radiante espectral (de una superficie emisora) M_λ, M_ν	447
14.16. Exposición radiante (en una superficie que recibe radiación), H, H_e (y concentración espectral de exposición radiante, H_λ)	448
14.17. Irradiancia (en una superficie que recibe radiación), $E (E_e)$ (luminosidad y magnitud aparentes y absolutas de una estrella u objeto cósmico, I, L, m, M)	449
14.18. Irradiancia espectral (en una superficie que recibe radiación) $E_\lambda, (E_\nu)$..	453
14.19. Número de fotones $N_p, Q_p (Q)$	454
14.20. Densidad fotónica, w_p (y concentración espectral de densidad fotónica, $w_{p\lambda}$)	455
14.21. Flujo fotónico Φ_p (y concentración espectral de flujo fotónico $\Phi_{p\lambda}$)	456
14.22. Intensidad fotónica (de una fuente o foco en una dirección dada), $I_p (I)$ (y concentración espectral de intensidad fotónica $I_{p\lambda}$)	457
14.23. Radiancia fotónica (de una superficie emisora) $L_p (L)$ (y concentración espectral de radiancia fotónica $L_{p\lambda}$)	458
14.24. Exitancia fotónica (de una superficie emisora), $M_p (M)$ (y concentración espectral de exitancia fotónica $M_{p\lambda}$)	459

14.25. Exposición fotónica (en una superficie que recibe radiación) H_p (y concentración espectral de exposición fotónica $H_{p\lambda}$)	460
14.26. Irradiancia fotónica (recibida en una superficie) E_p (y concentración espectral de irradiancia fotónica $E_{p\lambda}$)	461
14.27. Constante de Stefan-Boltzmann σ	463
14.28. Constantes primera y segunda de radiación, c_1, c_2	464
14.29. Constante de Wien, b	465
14.30. Emisividad ε	466
14.31. Emisividad espectral $\varepsilon(\lambda)$	467
14.32. Emisividad espectral direccional $\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi)$	467
14.33. Absortancia (o factor de absorción) (de una superficie), a	468
14.34. Absortancia espectral $a(\lambda)$	469
14.35. Absortancia espectral direccional $a(\lambda, \theta, \varphi)$	470
14.36. Reflectancia (de una superficie que recibe radiación) ρ	471
14.37. Reflectancia espectral, $\rho(\lambda)$	473
14.38. Reflectancia espectral direccional $\rho(\lambda, \theta, \varphi)$	474
14.39. Transmitancia (factor de transmisión) τ	475
14.40. Transmitancia espectral, $\tau(\lambda)$	477
14.41. Coeficiente de radiancia (en la reflexión) β	477
14.42. Coeficiente de radiancia espectral (en la reflexión) $\beta(\lambda)$	478
14.43. Campo eléctrico en una onda electromagnética. Elongación y amplitud, E, E_m	479
14.44. Campo de inducción eléctrica en onda electromagnética. Elongación y amplitud, D, D_m	480
14.45. Inducción magnética en una onda electromagnética. Elongación y amplitud, B, B_m	481
14.46. Campo magnético de una onda electromagnética. Elongación y amplitud, H, H_m	482
14.47. Densidad de energía de una onda electromagnética monodireccional w, u	483
14.48. Intensidad de onda electromagnética monodireccional, I	485
14.49. Constante de Hubble H_o	487
14.50. Corrimiento al rojo (por ley de Hubble y efecto Doppler), z	488
14.51. Impedancia característica (de un medio para una onda electromagnética) Z	489
14.52. Coeficiente de atenuación lineal (coeficiente de extinción lineal), $\mu, (\mu_c)$	491
14.53. Espesor de semiatenuación (capa de hemirreducción) χ	492
14.54. Coeficiente de absorción lineal, a	492
14.55. Coeficiente de absorción (lineal) másico a_m	493
14.56. Coeficiente de absorción (lineal) molar, κ	494
14.57. Índice de refracción (absoluto) (de un medio para una onda electromagnética) n	494
14.58. Índice de refracción relativo (para dos medios) n_{ij}	495
14.59. Ángulo de incidencia i, θ_i	496
14.60. Ángulo de refracción, r, θ_r	497

XXIV ÍNDICE

14.61. Grado de polarización g	498
14.62. Camino óptico C	498
14.63. Ángulo límite θ_L, i_L	499
14.64. Ángulo de Brewster θ_B, i_B	500
14.65. Distancia focal (de una lente delgada o de un sistema óptico) f', f	501
14.66. Potencia de una lente (vergencia) P, D	502
14.67. Distancia objeto, p	503
14.68. Distancia imagen p'	503
14.69. Aumento lineal M	504
14.70. Aumento angular γ	504
14.71. Poder separador (poder de resolución o poder resolvente) h, θ_m	505
14.72. Ángulo de rotación óptica, α	506
14.73. Poder rotatorio óptico R	507
14.74. Poder rotatorio óptico molar, α_n	508
14.75. Poder rotatorio óptico específico, α_m	509
14.76. Cantidad de luz, $Q, (Q_v)$	509
14.77. Flujo luminoso $\Phi (\Phi_v)$	510
14.78. Intensidad luminosa (de un foco en una dirección dada), $I, (I_v)$	511
14.79. Eficacia luminosa K	512
14.80. Exitancia luminosa (en un punto de una superficie emisora), $M (M_v)$...	513
14.81. Luminancia (en un punto de una superficie, en una dirección dada), $L, (L_v)$	514
14.82. Iluminancia (en un punto de una superficie que recibe luz), $E, (E_v)$	515
14.83. Exposición luminosa (en una superficie que recibe luz), H	517
14.84. Cantidad de luz espectral (o concentración espectral de cantidad de luz), Q_λ, Q_v	517
14.85. Flujo luminoso espectral (o concentración espectral de flujo luminoso), Φ_λ, Φ_v	518
14.86. Intensidad luminosa espectral (o concentración espectral de intensidad luminosa), I_λ, I_v	519
14.87. Eficacia luminosa espectral (eficacia luminosa para longitud de onda dada) $K(\lambda), K(v)$	520
14.88. Eficacia luminosa espectral máxima K_m	521
14.89. Eficiencia luminosa V	522
14.90. Eficiencia luminosa espectral (eficiencia luminosa para una longitud de onda dada) $V(\lambda), V(v)$	522
14.91. Exitancia luminosa espectral, M_λ, M_v	523
14.92. Luminancia espectral, L_λ, L_v	524
14.93. Iluminancia espectral, E_λ, E_v	525
14.94. Exposición luminosa espectral, H_λ, H_v	526
15. QUÍMICA FÍSICA, FÍSICA ATÓMICA, FÍSICA MOLECULAR	527
15.1. Cantidad de sustancia, n	527
15.2. Masa molar (o masa atómica; o masa molecular), M	529
15.3. Número de moléculas (o entidades elementales) N	530
15.4. Constante de Avogadro (número de Avogadro) $N^A, (L)$	530

15.5.	Masa molecular relativa, M_r	531
15.6.	Masa atómica relativa, A_r	532
15.7.	Densidad de moléculas o de partículas (o densidad numérica de partículas) n	533
15.8.	Volumen molar, V_m	535
15.9.	Constante de masa atómica (unificada) m_u	535
15.10.	Número atómico, Z . Número másico, A . Número neutrónico, N	536
15.11.	Masa de un átomo (o de un nucleido X ; masa nucleídica), m_a , m (A_ZX)....	541
15.12.	Concentración molecular (de la sustancia B) C_B	541
15.13.	Concentración másica (de la sustancia B) ρ_B	542
15.14.	Fracción másica (de la sustancia B) w_B	543
15.15.	Concentración en cantidad de sustancia (de B) (concentración molar) (molaridad) c , c_B , c_m , (B)	543
15.16.	Fracción molar (de la sustancia B) x , x_B	544
15.17.	Número de equivalentes químicos n_e	544
15.18.	Concentración en equivalentes químicos (de la sustancia B), (normalidad), c_{nB}	545
15.19.	Fracción volumétrica (de la sustancia B), φ_B	546
15.20.	Relación molar del soluto B , r , r_B	546
15.21.	Molalidad del soluto B , b_B , m_B	547
15.22.	Presión parcial (del gas B en mezcla gaseosa) p_B	548
15.23.	Potencial químico (de la sustancia B), μ_B	549
15.24.	Actividad absoluta (de la sustancia B en una mezcla), λ_B	549
15.25.	Fugacidad (del gas B en una mezcla gaseosa) \tilde{p}_B (f_B)	550
15.26.	Actividad absoluta estándar del gas B (en una mezcla gaseosa), λ_B^θ	551
15.27.	Coefficiente (o factor) de actividad de la sustancia B (en una mezcla líquido o sólida), f_B	551
15.28.	Actividad absoluta estándar de la sustancia B (en una mezcla líquida o sólida) λ_B^θ	552
15.29.	Actividad relativa de la sustancia soluto B (en disolución líquida diluida), a_B , a_{mB}	552
15.30.	Actividad relativa (para concentración) de la sustancia soluto B (en disolución líquida diluida), $a_{c,B}$	553
15.31.	Coefficiente de actividad de la sustancia soluto B (en disolución líquida diluida) γ_B	554
15.32.	Coefficiente de actividad (para concentración de la sustancia soluto B (en disolución líquida diluida) γ'_B	554
15.33.	Actividad absoluta estándar de la sustancia soluto B (en disolución líquida diluida), λ_B^θ	555
15.34.	Actividad (relativa) del disolvente (para una disolución líquida diluida) a_A	556
15.35.	Presión osmótica, Π	556
15.36.	Coefficiente osmótico (de la sustancia disolvente A), φ	557
15.37.	Actividad absoluta estándar del disolvente (para una disolución líquida diluida), λ_A^θ	557

XXVI ÍNDICE

15.38. Número estequiométrico (de la sustancia B , en una reacción química), ν_B	558
15.39. Afinidad (de una reacción química), A	559
15.40. Avance de reacción (grado de avance de la reacción química), ξ	559
15.41. Velocidad de reacción, $\dot{\xi}$	560
15.42. Actividad catalítica a	560
15.43. Constante de equilibrio estándar de una reacción química K^θ (y otras constantes de equilibrio)	561
15.44. Grado de disociación (de la sustancia B), α_B	562
15.45. Grado de polimerización (de la sustancia B), π_B	563
15.46. Constantes crioscópica y ebulloscópica, K_c, K_e	563
15.47. Constante de Faraday F	564
15.48. Recorrido libre medio, ℓ, λ	565
15.49. Coeficiente de difusión, D	565
15.50. Relación de difusión térmica k_T	566
15.51. Coeficiente de difusión térmica D_T	567
15.52. Momento dipolar eléctrico de una molécula, $\vec{p}, \vec{\mu}$	567
15.53. Polarizabilidad (de un átomo o de una molécula) α	568
15.54. Número de carga de un ión. Electrovalencia, z	569
15.55. Fuerza iónica de una disolución, I	570
15.56. Potencial normal (absoluto) V_0	570
15.57. Acidez y basicidad (o alcalinidad), pH	572
15.58. Radio de Bohr, a_0	573
15.59. Energía y constante de Rydberg, R_y, R_∞	574
15.60. Momento magnético (de una partícula, de un núcleo, de un átomo) μ, m	576
15.61. Magnetón de Bohr μ_B	577
15.62. Magnetón nuclear μ_N	578
15.63. Número cuántico principal, n	578
15.64. Número cuántico del momento cinético orbital (número cuántico acimutal o secundario), $\ell_i, (\ell), L$	579
15.65. Número cuántico magnético $m_i, (m_l), M$	580
15.66. Número cuántico de espín $s_i, (s), S$ (número cuántico magnético de espín m_s)	582
15.67. Número cuántico del momento cinético total (número cuántico espín-orbital, j, J (y número cuántico magnético espín-orbital m_j) (de un electrón o un átomo, sin considerar el momento magnético nuclear)	583
15.68. Coeficiente giromagnético (o razón giromagnética) γ (y factor g , de una partícula, átomo o núcleo)	584
15.69. Frecuencia angular de Larmor ω_L	585
15.70. Frecuencia ciclotrónica y frecuencia angular ciclotrónica, ν_c, ω_c	586
15.71. Constante de estructura fina	587
16. FÍSICA NUCLEAR. RADIACIONES	589
16.1. Actividad. Radiactividad (de una muestra), A	589
16.2. Actividad másica, a	590

16.3.	Constante de desintegración (de un nucleido para una determinada transición nuclear), λ	591
16.4.	Periodo de semidesintegración (de un nucleido para una determinada transición nuclear), $T_{1/2}$, T	592
16.5.	Vida media (de un nucleido para una determinada transición nuclear), τ	593
16.6.	Anchura de un nivel, Γ	594
16.7.	Defecto de masa (y exceso de masa) (de un nucleido), B , Δ	595
16.8.	Defecto de masa por nucleón (energía de enlace or nucleón), \bar{B} , B_A	596
16.9.	Constante de masa atómica (unificada), m_u	598
16.10.	Defecto de masa relativo (y exceso de masa relativo), B_r , Δ_r	598
16.11.	Fracción de enlace (energía de enlace relativa por nucleón), b (y fracción de empaquetamiento, f)	599
16.12.	Energía de desintegración alfa, Q_α (y energía de desintegración alfa del estado fundamental, $Q_{\alpha,0}$)	600
16.13.	Energía de desintegración beta, Q_β (y energía de desintegración beta del estado fundamental, $Q_{\beta,0}$)	601
16.14.	Energía (cinética) máxima de la partícula beta, E_β	603
16.15.	Razón de conversión interna, α (y fracción de conversión interna, $\alpha/(\alpha + 1)$)	604
16.16.	Número cuántico de espín nuclear, I , J	605
16.17.	Energía de reacción (nuclear), Q	605
16.18.	Energía de resonancia (en una reacción nuclear), E_r , E_{res}	607
16.19.	Fluencia de partículas (fluencia de una clase de partículas), Φ	607
16.20.	Flujo de partículas (flujo de una clase de partículas), F (Φ)	608
16.21.	Tasa de fluencia de partículas (o densidad de flujo de partículas) (y sus funciones de distribución), φ	609
16.22.	Fluencia energética, Ψ	610
16.23.	Flujo de energía (o flujo energético o potencia) (de un haz de partículas), P	611
16.24.	Tasa de fluencia energética (o densidad de flujo de energía), ψ	612
16.25.	Sección eficaz, σ	612
16.26.	Densidad de corriente de partículas, J (S)	613
16.27.	Sección eficaz total, σ_T , σ_{tot}	614
16.28.	Sección eficaz angular, σ_Ω	615
16.29.	Sección eficaz espectral, σ_E	616
16.30.	Sección eficaz angular espectral, $\sigma_{\Omega E}$	617
16.31.	Sección eficaz macroscópica, Σ	617
16.32.	Sección eficaz total macroscópica, Σ_T , Σ_{tot}	618
16.33.	Recorrido libre medio, l , λ	619
16.34.	Coefficiente lineal de atenuación (de un haz de partículas o de una radiación electromagnética), μ , μ_l	620
16.35.	Coefficiente de atenuación para efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares, μ_{pe} , μ_{cos} , μ_{pa}	621
16.36.	Capa de hemirreducción (o longitud de semiatenuación), $d_{1/2}$, $x_{1/2}$	622

XXVIII ÍNDICE

16.37. Coeficiente másico de atenuación, μ_m	623
16.38. Coeficiente molar de atenuación, μ_c	624
16.39. Coeficiente atómico de atenuación, μ_a, μ_{at}	624
16.40. Coeficiente electrónico de atenuación, μ_e	625
16.41. Poder de frenado lineal total (poder de frenado, poder frenante), S, S_l ...	626
16.42. Poder de frenado atómico total, S_a	627
16.43. Poder de frenado másico total, S_m	628
16.44. Alcance lineal medio, R, R_l	628
16.45. Alcance másico medio, $R_p (R_m)$	629
16.46. Ionización lineal (producida por una partícula), N_{il}	630
16.47. Ionización total (producida por una partícula), N_i	630
16.48. Movilidad, μ	631
16.49. Densidad iónica, n^+, n^-	632
16.50. Coeficiente de recombinación, α	632
16.51. Energía impartida (y energía impartida media), $\epsilon, (\bar{\epsilon})$	633
16.52. Energía impartida específica (o másica), z	634
16.53. Pérdida media de energía por par iónico, W_i	635
16.54. Dosis absorbida, D	636
16.55. Dosis equivalente, H	636
16.56. Tasa de dosis absorbida, \dot{D}	637
16.57. Transferencia lineal de energía, $L (LET)$	638
16.58. KERMA (Kinetic Energy Released in Matter), K	639
16.59. Tasa de Kerma, \dot{K}	639
16.60. Coeficiente másico de transferencia de energía, K_{ψ}	640
16.61. Exposición, X	641
16.62. Tasa de exposición, \dot{X}	641
16.63. Densidad neutrónica, n	643
16.64. Rapidez del neutrón (y energía cinética del neutrón, E), v	643
16.65. Flujo neutrónico, $F (\Phi)$	644
16.66. Fluencia neutrónica, Φ	645
16.67. Tasa de fluencia neutrónica (o densidad de flujo neutrónico) y sus funciones de distribución, $\varphi, \varphi_E, \varphi_v$	646
16.68. Coeficiente de difusión (para la densidad neutrónica) D, D_n	647
16.69. Coeficiente de difusión para la tasa de fluencia neutrónica (o para la densidad de flujo neutrónico), $D_{\varphi} (D)$	648
16.70. Densidad total de una fuente de neutrones, S	648
16.71. Densidad de moderación, q	649
16.72. Probabilidad de escape a la resonancia, p	650
16.73. Letargia, u	650
16.74. Decremento logarítmico medio, ξ	651
16.75. Rendimiento neutrónico de fisión, ν	652
16.76. Rendimiento neutrónico de la absorción, η	652
16.77. Factor de fisión rápida, ϵ	653
16.78. Factor de utilización, f	653
16.79. Probabilidad de permanencia, Λ	654

	ÍNDICE	XXIX
16.80. Factor de multiplicación, k		654
16.81. Factor de multiplicación efectivo, k_{eff}		655
16.82. Factor de multiplicación de un medio infinito, k_{∞}		655
16.83. Reactividad (en un reactor), ρ		656
16.84. Constante de tiempo de un reactor, T		656
Apéndice. OBSERVACIONES ACERCA DEL SISTEMA CGS GAUSSIANO		
DEL ELECTROMAGNETISMO (QUE DEBE ABANDONARSE)		659
A.1. Los sistemas de unidades en electricidad		659
A.2. El sistema CGS de Gauss comparado con el SI. Resumen histórico		660
A.3. Las ecuaciones de Maxwell en el vacío		663
A.4. Ejemplos de comparación de fórmulas del SI con las del CGS de Gauss..		664
A.5. Equivalencia entre magnitudes en las fórmulas del CGS y del SI		665
A.6. Relación de fórmulas en SI y en CGS de Gauss		667
Bibliografía		687
Índice analítico		689

312 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES**12.61.2. Fórmulas**

$$c = \frac{C}{m} \qquad c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$$

(C = capacidad calorífica del sistema; m = masa; dQ = calor suministrado; dT = incremento de temperatura).

12.61.3. Dimensiones

$$[c] = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

12.61.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})} \quad (\text{julios por kelvin y por kilogramo})$$

12.61.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) = \text{cal}/(\text{g} \cdot \text{K}) = 4\,184 \text{ USI}$$

$$\text{UCGS} = \text{erg}/(\text{g} \cdot \text{K}) = 10^{-4} \text{ USI}$$

$$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = \text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) = 4,186\,8 \text{ USI (exactamente)}$$

12.61.6. Constantes y valores concretos

Para el agua líquida a $15\ ^\circ\text{C}$ es, aproximadamente:

$$c = 1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) = 4\,184 \text{ USI}$$

valor que resulta mayor que el de la mayoría de las sustancias (véanse las diferentes definiciones de caloría en la sección de energía).

12.62.	CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA A PRESIÓN CONSTANTE (CALOR ESPECÍFICO A PRESIÓN CONSTANTE), c_p
---------------	---

12.62.1. Observaciones y definición

«Es la capacidad calorífica específica de una sustancia para un proceso isobárico».

12.62.2. Fórmulas

$$c_p = \frac{1}{m} \frac{dQ_p}{dT_p} \qquad c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

(m = masa; dQ = calor suministrado; dT = incremento de temperatura; p = presión constante; h = entalpía específica).

12.62.3. Dimensiones

$$[c_p] = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

12.62.4. Unidad SI

$$\boxed{J/(K \cdot kg)} \quad (\text{julios por kelvin y por kilogramo})$$

12.62.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) = \text{cal}/(\text{g} \cdot \text{K}) = 4\,184 \text{ USI}$$

$$\text{UCGS} = \text{erg}/(\text{g} \cdot \text{K}) = 10^{-4} \text{ USI}$$

$$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = \text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) = 4,186\,8 \text{ USI (exactamente)}$$

12.62.6. Constantes y valores concretos

Sustancia	C_p (USI)
Agua a 0 °C	4 215
" 15 °C	4 184
" 30 °C	4 176
" 50 °C	4 178
" 80 °C	4 194
" 100 °C	4 213
Aire en condiciones normales	993
Hielo " " "	2 109
Al	916
Fe	456
Hg	138
Pb	130

12.63.	CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA A VOLUMEN CONSTANTE (CALOR ESPECÍFICO A VOLUMEN CONSTANTE), c_v
---------------	---

12.63.1. Observaciones y definición

«Es la capacidad calorífica específica de una sustancia para un proceso isócoro (volumen constante)».

12.63.2. Fórmulas

$$c_v = \frac{1}{m} \frac{dQ_v}{dT_v} \qquad c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

(m = masa; dQ = calor suministrado; dT = aumento de temperatura; v = volumen constante; u = energía interna específica).

314 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES**12.63.3. Dimensiones**

$$[c_v] = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

12.63.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})} \quad (\text{julios por kelvin y por kilogramo})$$

12.63.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal} / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) = \text{cal} / (\text{g} \cdot \text{K}) = 4\,184 \text{ USI}$$

$$\text{UCGS} = \text{erg} / (\text{g} \cdot \text{K}) = 10^{-4} \text{ USI}$$

$$\text{Btu} / (\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = \text{Btu} / (\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) = 4,186\,8 \text{ USI (exactamente)}$$

12.63.6. Constantes y valores concretos

$$\text{Aire en condiciones normales: } C_v = 706 \text{ USI}$$

12.64. CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA A SATURACIÓN (CALOR ESPECÍFICO A SATURACIÓN), c_{sat}
12.64.1. Observaciones y definición

«Es la capacidad calorífica específica en un proceso de saturación».

12.64.2. Fórmulas

$$c_{sat} = \frac{1}{m} \frac{dQ_{sat}}{dT_{sat}}$$

(m = masa; dQ = calor suministrado; dT = aumento de temperatura; sat indica saturación).

12.64.3. Dimensiones

$$[c_{sat}] = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

12.64.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})} \quad (\text{julios por kelvin y por kilogramo})$$

12.64.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal} / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) = \text{cal} / (\text{g} \cdot \text{K}) = 4\,184 \text{ USI}$$

$$\text{UCGS} = \text{erg} / (\text{g} \cdot \text{K}) = 10^{-4} \text{ USI}$$

$$\text{Btu} / (\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = \text{Btu} / (\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) = 4,186\,8 \text{ USI (exactamente)}$$

12.65.	CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR, C_m
---------------	---

12.65.1. Observaciones y definición

«Es el cociente entre la capacidad calorífica y la cantidad de sustancia». Se definió inicialmente como la cantidad de calor necesaria para aumentar un grado la temperatura de un mol de sustancia. Como es obvio, la definición está incompleta mientras no se especifique la clase de proceso. A veces se llama a esta magnitud calor específico molar.

12.65.2. Fórmulas

$$C_m = \frac{C}{n} \qquad C_m = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT}$$

(C = capacidad calorífica del sistema; n = cantidad de sustancia; dQ = calor suministrado; dT = incremento de temperatura).

12.65.3. Dimensiones

$$[C_m] = L^2 M T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$$

12.65.4. Unidad SI

$J/(K \cdot kg)$	(julios por kelvin mol)
------------------	-------------------------

12.65.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal} / (K \cdot \text{mol}) = 4,184 \text{ USI}$$

$$\text{Btu} / (^\circ\text{R} \cdot \text{mol}) = 1,898 \cdot 101 \cdot 10^3 \text{ USI}$$

$$\text{UCGS} = \text{erg} / (K \cdot \text{mol}) = 10^{-7} \text{ USI}$$

12.66.	CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR A PRESIÓN CONSTANTE, C_p
---------------	---

12.66.1. Observaciones y definición

«Es la capacidad calorífica molar en un proceso isobárico» (A veces se llamaba calor específico molar a presión constante.)

316 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES**12.66.2. Fórmulas**

$$C_p = \frac{1}{n} \frac{dQ_p}{dT_p} \qquad C_p = \left(\frac{\partial h_m}{\partial T} \right)_p$$

(n = cantidad de sustancia; dQ = calor suministrado; dT = incremento de temperatura; p = presión constante; h = entalpía molar).

12.66.3. Dimensiones

$$[C_p] = L^2 M T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$$

12.66.4. Unidad SI

$$\boxed{J/(K \cdot mol)} \quad (\text{julios por kelvin mol})$$

12.66.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal} / (K \cdot \text{mol}) = 4,184 \text{ USI}$$

$$\text{Btu} / (^\circ\text{R} \cdot \text{mol}) = 1,898 \text{ 101 } 10^3 \text{ USI}$$

$$\text{UCGS} = \text{erg} / (K \cdot \text{mol}) = 10^{-7} \text{ USI}$$

12.67. CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR A VOLUMEN CONSTANTE, C_v
12.67.1. Observaciones y definición

«Es la capacidad calorífica molar en un proceso isócoro (a volumen constante)». (A veces se llamaba a esta magnitud calor específico molar a volumen constante.)

12.67.2. Fórmulas

$$C_v = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT} \qquad C_v = \left(\frac{\partial u_m}{\partial T} \right)_v$$

(n = cantidad de sustancia; dQ = calor suministrado; dT = incremento de temperatura; v = volumen constante, u_m = energía interna molar).

12.67.3. Dimensiones

$$[C_v] = L^2 M T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$$

12.67.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})} \quad (\text{julios por kelvin mol})$$

12.67.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\begin{aligned} \text{cal} / (\text{K} \cdot \text{mol}) &= 4,184 \text{ USI} \\ \text{Btu} / (^\circ\text{R} \cdot \text{mol}) &= 1,898 \text{ 101 } 10^3 \text{ USI} \\ \text{UCGS} = \text{erg} / (\text{K} \cdot \text{mol}) &= 10^{-7} \text{ USI} \end{aligned}$$

12.68. COCIENTE DE LAS CAPACIDADES CALORÍFICAS, γ **12.68.1. Observaciones y definición**

Esta magnitud se denomina a veces exponente isentrópico o adiabático (útil en gases perfectos). «Es el cociente entre las capacidades caloríficas a presión y a volumen constante» (o bien la relación de las capacidades caloríficas específicas o molares, o también se dice relación de los calores específicos).

12.68.2. Fórmulas

El cociente o relación de las capacidades caloríficas es, por definición:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \qquad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

(c_p , c_v = capacidades caloríficas específicas a presión y volumen constante; C_p , C_v = capacidades caloríficas molares a presión y volumen constante).

En un proceso adiabático (isentrópico) de un gas perfecto es útil la ecuación:

$$p V^\gamma = \text{constante}$$

(p = presión; V = volumen o volumen molar). Por ello surgió la denominación de *exponente isentrópico* (sección 12.70).

12.68.3. Dimensiones

$$[\gamma] = 1$$

12.68.4. Unidad SI

$$\boxed{1}$$

318 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES**12.68.5. Constantes y valores concretos**

Según la teoría cinética, el valor de γ para gases perfectos monoatómicos es $5/3$; para gases diatómicos es $7/5$, y para gases triatómicos o de mayor número de átomos es $4/3$.

12.69. COEFICIENTE POLITRÓPICO (EXPONENTE POLITRÓPICO) k, n
12.69.1. Observaciones y definición

En un proceso politrópico permanece constante la capacidad calorífica (y el calor específico). Los procesos politrópicos engloban, como casos particulares, a los procesos adiabáticos, isotermos, isócoros, isobáricos, etc, con la única condición de que sea constante el calor específico. Se define el coeficiente o relación politrópica como el cociente dado por la siguiente fórmula.

12.69.2. Fórmulas

$$n = \frac{c_p - c}{c_v - c}$$

(c = capacidad calorífica; c_p = capacidad calorífica a presión constante; c_v = capacidad calorífica a volumen constante) (también pueden emplearse los respectivos calores específicos).

Para un proceso politrópico de un gas perfecto es útil la ecuación:

$$pV^n = \text{constante}$$

que en el caso de una transformación isentrópica de un gas perfecto resulta:

$$(\text{isentrópica}) \quad c = 0 \quad n = \frac{c_p}{c_v} = \gamma \quad pV^\gamma = \text{constante}$$

12.69.3. Dimensiones

$$[n] = 1$$

12.69.4. Unidad SI

1

12.70.	EXPONENTE ISENTRÓPICO, κ
---------------	---

12.70.1. Observaciones y definición

Es útil para el estudio termodinámico de cualquier sustancia. Para gases perfectos es igual a la relación de las capacidades caloríficas. La definición se da mediante la fórmula.

12.70.2. Fórmulas

Para cualquier sustancia, la definición es

$$\kappa = - \frac{V}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S$$

(V = volumen; p = presión; S = entropía constante).

Para un gas perfecto resulta el cociente de las capacidades caloríficas a presión y a volumen constante:

$$\kappa = \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

(véase la sección 12.68)

12.70.3. Dimensiones

$$[\kappa] = 1$$

12.70.4. Unidad SI

1

12.71.	CALOR. CANTIDAD DE CALOR. CALORES DE TRANSFORMACIÓN, Q, L, I
---------------	--

12.71.1. Observaciones y definición

El *calor* es una forma de energía. Es una energía en tránsito. Se transfiere de un sistema a otro o se transmite por el interior de un medio material, debido a diferencias o gradientes de temperatura. O viaja a través del espacio (ondas electromagnéticas).

Los *calores de transformación* se refieren a cambios de fase (*calor latente* fue la denominación usual), o son los *calores de reacción* en las reacciones químicas, o los *calores de combustión*, o también los *calores de disolución*. Se con-

320 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES

sidera hoy lo más conveniente expresar estos calores de transformación utilizando las diferencias de las funciones termodinámicas adecuadas.

12.71.2. Fórmulas

Los calores de transformación específicos (o másicos) son siempre el cociente entre la cantidad de calor y la masa de la sustancia de referencia:

$$l = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Los calores de transformación molares son siempre el cociente entre la cantidad de calor y la cantidad de sustancia de referencia.

$$l_m = \frac{\Delta Q}{\Delta n}$$

(ΔQ = cantidad de calor puesta en juego; Δm = masa de referencia que interviene en la transformación; Δn = cantidad de sustancia de referencia que interviene en la transformación).

Veamos, como ejemplo, las fórmulas:

$$Q_p = \Delta H_p \qquad L = \frac{dQ}{dm} = T ds$$

(Q_p = calor absorbido en la reacción o proceso isobárico; $Q_p = \Delta H_p$ = aumento de entalpía en el proceso isobárico; L = calor latente de cambio de fase; dQ = calor que interviene en el cambio de fase; dm = masa que cambia de fase; ds = variación de la entropía específica; T = temperatura).

12.71.3. Dimensiones

cantidad de calor	$[Q] = L^2 M T^{-2}$
calor de transformación específico	$[l] = L^2 T^{-2}$
calor de transformación molar	$[l_m] = L^2 M T^{-2} N^{-1}$

12.71.4. Unidad SI

cantidad de calor:	J	(julio o joule)
calor de transformación específico:	J/kg	(julios por kilogramo)
calor de transformación molar:	J/mol	(julios por mol)

12.71.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{cal} = 4,184 \text{ J}$$

$$\text{erg /g} = 10^{-4} \text{ J/kg}$$

$$\text{Btu /lb} = 2,326 \cdot 10^3 \text{ J/kg (exactamente)}$$

$$\text{Btu/mol} = 1,055\ 056 \cdot 10^3 \text{ J/mol}$$

(pueden verse además las unidades de energía en la sección correspondiente).

12.71.6. Constantes y valores concretos

Calor de fusión y temperatura de fusión a presión normal:

Metal	I_f (J/kg)	T_f (K)
Al	$3,77 \cdot 10^5$	932
Ca	2,18 "	1 120
Cu	1,26 "	1 366
Fe	2,72 "	1 812
Ag	0,84 "	1 234
Pt	1,13 "	2 047
Pb	0,26 "	600,5
U	0,84 "	1 406
W	1,84 "	3 650

Calor de vaporización del agua:

T (°C)	I_v (J/kg)
0	$2,493 \cdot 10^6$
20	2,447 "
50	2,379 "
80	2,308 "
100	2,257 "
120	2,200 "
150	2,107 "

12.72.	CALOR DE COMBUSTIÓN (PODER CALORÍFICO DE UN COMBUSTIBLE O UNA SUSTANCIA DE ALIMENTACIÓN), P, Q, q (PCI, PCS)
---------------	--

12.72.1. Observaciones y definición

La combustión, como reacción química, produce una cantidad de calor por cada unidad de masa del combustible que reacciona (se considera aquí el proceso isobárico, aunque también puede medirse en una «bomba calorimétrica» el calor de combustión a volumen constante).

322 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES

El *calor de combustión* o *poder calórico* se define como «la cantidad de calor producida por unidad de masa del combustible que reacciona». Es útil en el estudio de carbones, gases, petróleo y sus derivados, así como en los variadísimos productos utilizados en alimentación.

12.72.2. Fórmulas

Para la combustión de un determinado producto, a presión constante, se tiene (considerando positivo el calor desprendido, según la definición):

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \qquad \Delta Q = (\Delta H)_{p,T}$$

(ΔQ = calor producido en la combustión; Δm = masa del combustible que reacciona; ΔH = disminución de la entalpía en la reacción, a presión y temperatura constantes).

Si se considera el proceso de combustión a volumen constante, el calor de combustión se define igual, pero la magnitud que interviene es la energía interna.

$$P_v = \frac{\Delta Q_v}{\Delta m_v} \qquad \Delta Q_v = (\Delta U)_{v,T}$$

Para procesos industriales interesa muchas veces distinguir si el agua producida como producto de la combustión queda en fase gaseosa o líquida. Según esta consideración se emplea la denominación *calor de combustión inferior* (o *poder calorífico inferior*, *PCI*) cuando el agua producida queda en fase vapor totalmente, mientras que la denominación *calor de combustión superior* (o *poder calorífico superior* *PCS*) se usa para el caso de que el agua quede en fase líquida. (Obviamente la diferencia es igual al calor latente de vaporización del agua a la temperatura considerada). (También se puede dar el calor de combustión molar, que es el calor producido por cada mol de combustible.)

12.72.3. Dimensiones

$$[P] = L^2 T^{-2}$$

12.72.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{J/kg}} \quad (\text{julios por kilogramo})$$

12.72.5. Otras unidades y su equivalencia con la Unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg/g} = 10^{-4} \text{ USI}$$

$$\text{Btu/lb} = 2,326 \cdot 10^3 \text{ USI (exactamente)}$$

$$\text{cal/g} = \text{kcal/kg} = 4\,184 \text{ USI}$$

602 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES

rencia entre la energía en reposo (m_0c^2) que posee el núcleo primitivo antes de la desintegración

y la suma de las energías en reposo que poseen los productos del proceso nuclear (productos que han de ser: un electrón, un núcleo residual y un neutrino, este último sin masa apreciable, considerando además la posibilidad de que el núcleo pueda quedar excitado y emita, posteriormente, una o varias partículas gamma). Esta energía se reparte, en forma de energía cinética, entre todos los productos del proceso nuclear.

Según esto, se define la *energía de desintegración beta*, Q_β , como «la suma de la energía cinética máxima de la partícula beta, E_β , y la energía cinética del átomo de retroceso, en el sistema de referencia en el que el núcleo emisor estaba en reposo antes de desintegrarse». (En esta definición se considera la máxima energía cinética de la partícula beta emitida, y por tanto la emisión de un neutrino de energía nula o despreciable.) Si se emite un electrón positivo, hay que añadir a la suma mencionada en la anterior definición, la energía de producción de un par de electrones.

La *energía de desintegración beta del estado fundamental*, $Q_{\beta,0}$, incluye también la energía de los fotones emitidos después de la desintegración, si se emiten.

16.13.2. Fórmulas

$$Q_\beta = E_\beta + E_N$$

$$Q_{\beta,0} = E_\beta + E_N^* + E_\gamma$$

$$Q_\beta = E'_\beta + E_\nu + E_N$$

(E_β = energía cinética máxima de la partícula; E'_β = energía cinética de la partícula beta en una desintegración, en general; E_N = energía cinética del átomo de retroceso; E_N^* = id cuando el núcleo queda excitado; E_ν = energía del neutrino; E_γ = energía de los fotones emitidos).

16.13.3. Dimensiones

$$[Q_\beta] = L^2 M T^{-2}$$

16.13.4. Unidad SI

J

(Joule, julio)

16.13.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$\text{eV} = 1,602\,177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{MeV} = 1,602\,177 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1,782\,662 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

$$\text{cal} = 4,184 \text{ J}$$

16.13.6. Constantes y valores concretos

Energía de desintegración beta del nucleido ^{13}N :

$$Q_{\beta} \cong 1,2 \text{ MeV} = 1,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

16.14. ENERGÍA (CINÉTICA) MÁXIMA DE LA PARTÍCULA BETA, E_{β}
16.14.1. Observaciones y definición

«Es el extremo superior del espectro energético de un proceso de desintegración beta». Se entiende que es la energía cinética que posee el electrón (o positrón) emitido en el caso más favorable, es decir, cuando la energía que se lleva el antineutrino (o el neutrino) es nula o despreciable.

16.14.2. Fórmulas

(electrón no relativista) $E_{\beta} = \frac{1}{2} m_o v^2$

(electrón relativista) $E_{\beta} = (m - m_o) c^2$

(m_o = masa del electrón en reposo; v = velocidad máxima del electrón emitido; m = masa relativista del electrón que se mueve con velocidad v ; c = velocidad de la luz en el vacío).

16.14.3. Dimensiones

$$[E_{\beta}] = \text{L}^2 \text{ M T}^{-2}$$

16.14.4. Unidad SI

J

 (Joule, julio)

16.14.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$\text{eV} = 1,602 \ 177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{MeV} = 1,602 \ 177 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{cal} = 4,184 \text{ J}$$

y todas las unidades de energía.

604 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES

16.14.6. Constantes y valores concretos

Energía máxima del positrón en la desintegración del nitrógeno 13:

$${}^{13}\text{N} = {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$$

$$E_\beta \cong 1,2 \text{ MeV} = 1,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

16.15.	RAZÓN DE CONVERSIÓN INTERNA, α (Y FRACCIÓN DE CONVERSIÓN INTERNA, $\alpha/(\alpha + 1)$)
---------------	--

16.15.1. Observaciones y definición

Cuando un átomo experimenta el proceso de conversión interna, una partícula (un fotón) procedente del núcleo interacciona con un electrón cortical de la capa K (o de las otras capas, L, M...) de manera que el fotón desaparece y su energía se emplea en arrancar del átomo el electrón y comunicarle energía cinética.

Se define la *razón de conversión interna*, para una transición entre dos determinados estados energéticos, como «el cociente entre el número de electrones de conversión interna y el de fotones emitidos».

Análogamente, se define la *fracción de conversión interna* como el cociente entre la razón α y el binomio $\alpha + 1$.

16.15.2. Fórmulas

$$\text{(Razón)} \quad \alpha = \frac{N_e}{N_\gamma}$$

$$\text{(fracción)} \quad \alpha/(\alpha + 1)$$

(N_e = número de electrones emitidos en procesos de conversión interna; N_γ = número de partículas γ emitidas (fotones) en procesos de transición entre los mismos estados energéticos del núcleo).

Puede estudiarse la conversión interna para cada capa, K, L, M,... y se definen respectivamente α_K , α_L , α_M , ... y también las relaciones entre ellas, α_K/α_L , α_K/α_M ...

16.15.3. Dimensiones

$$[\alpha] = 1$$

16.15.4. Unidad SI

1

16.16. NÚMERO CUÁNTICO DE ESPÍN NUCLEAR, I, J

16.16.1. Observaciones y definición

El núcleo posee un momento cinético de espín (y también cada una de sus partículas), que depende de un número cuántico I , de la misma forma que los electrones en la corteza atómica.

16.16.2. Fórmulas

El momento cinético del núcleo (o de una de sus partículas) viene dado por

$$L = \sqrt{I(I+1)} \hbar$$

donde I es el número cuántico de espín nuclear (o simplemente el espín nuclear) ($\hbar =$ constante barrada de Planck).

El momento cinético total de un átomo completo es la suma vectorial de los momentos cinéticos orbitales y de espín de los electrones corticales y del núcleo, que resultan ser del mismo orden de magnitud. Sin embargo, los momentos magnéticos nucleares son de un orden muy inferior a los momentos magnéticos de los electrones corticales.

16.16.3. Dimensiones

$$[I] = 1$$

16.16.4. Unidad SI

$$1$$

16.17. ENERGÍA DE REACCIÓN (NUCLEAR), Q

16.17.1. Observaciones y definición

En una reacción nuclear, la suma de las masas en reposo de las partículas reaccionantes y de los productos de reacción es diferente. Esta diferencia es la que determina la energía que se pone en juego en el proceso. Si es mayor la masa de las partículas reaccionantes que la de los productos, habrá desprendimiento de energía, y si es al contrario habrá absorción (energía de reacción positiva y negativa, respectivamente). Esta energía se manifiesta como energía cinética de las partículas o energía de los fotones («energía fotónica», $E_\gamma = h \nu$).

606 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES

Se define la *energía de reacción* Q como «la diferencia entre la suma de las energías cinética y fotónica de los productos de reacción y la suma de las energías cinética y fotónica de las partículas reaccionantes»:

16.17.2. Fórmulas

$$Q = \sum E_2 - \sum E_1$$

Reacción exotérmica: $Q > 0$; (se desprende energía)

Reacción endotérmica: $Q < 0$; (se absorbe energía)

($\sum E_2$ = suma de las energías cinética y fotónica de los productos de reacción;
 $\sum E_1$ = suma de las energías cinética y fotónica de las partículas reaccionantes).

16.17.3. Dimensiones

$$[Q] = L^2 M T^{-2}$$

16.17.4. Unidad SI

$$\boxed{J} \quad (\text{joule o julio})$$

16.17.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$\text{eV} = 1,602\,177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{MeV} = 1,602\,177 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{cal} = 4,184 \text{ J}$$

y todas las de energía.

16.17.6. Constantes y valores concretos

Energía de la reacción $^{12}\text{C} + ^3\text{He} = ^{11}\text{C} + ^4\text{He}$

$$Q = 1,856 \text{ MeV} = 2,974 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Energía que se produce en la fisión completa de 1 kg de ^{235}U :

$$Q \cong 10^{14} \text{ J}$$

(esta energía equivale al calor de combustión de 3 000 toneladas de carbón medio).

16.18.	ENERGÍA DE RESONANCIA (en una reacción nuclear), E_r, E_{res}
---------------	---

16.18.1. Observaciones y definición

Es «la energía cinética de la partícula incidente que, expresada en el sistema de referencia de la partícula-blanco, corresponde a una resonancia de la reacción nuclear entre ambas».

16.18.2. Fórmulas

$$E_r, E_{res}$$

16.18.3. Dimensiones

$$[E_r] = L^2 M T^{-2}$$

16.18.4. Unidad SI

J	(joule o julio)
---	-----------------

16.18.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$\text{eV} = 1,602\,177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{MeV} = 1,602\,177 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{cal} = 4,184 \text{ J}$$

y todas las de energía.

16.19.	FLUENCIA DE PARTÍCULAS (FLUENCIA DE UNA CLASE DE PARTÍCULAS), Φ
---------------	--

16.19.1. Observaciones y definición

Cuando se considera un haz de partículas determinadas (protones, electrones, partículas ^4He , ^3He , etc.) interesa muchas veces considerar el número de partículas del haz que atraviesan la unidad de superficie (sin hacer intervenir el tiempo).

Así se define la *fluencia de partículas* en un punto del espacio como «el número de partículas que entran en una pequeña esfera centrada en el punto dado (en un intervalo de tiempo dado cualquiera) dividido por el área del círculo máximo de dicha esfera».

608 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES**16.19.2. Fórmulas**

$$\Phi = \frac{N}{\Delta S}$$

(N = número de partículas; ΔS = área del pequeño círculo).

16.19.3. Dimensiones

$$[\Phi] = L^{-2}$$

16.19.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{m}^{-2}} \quad (\text{partículas / metro cuadrado})$$

16.19.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{cm}^{-2} = 10^4 \text{ USI}$$

y todas las de longitud con exponente -2 .

16.20. FLUJO DE PARTÍCULAS (FLUJO DE UNA CLASE DE PARTÍCULAS), F (Φ)
16.20.1. Observaciones y definición

En un haz de partículas interesa a menudo estudiar el número de partículas que pasan por una sección del haz en la unidad de tiempo. Se puede definir el flujo como «el número de partículas que atraviesan la sección del haz en la unidad de tiempo». Para una fuente de neutrones el *flujo neutrónico* es «el número de neutrones que salen de la fuente en la unidad de tiempo (sin hacer referencia a la sección, en este caso)».

(Actualmente se recomienda usar la fluencia y tasa de fluencia de partículas, mejor que el flujo).

16.20.2. Fórmulas

Por definición es:

$$F = \frac{dN}{dt}$$

(N = número de partículas; t = tiempo).

16.20.3. Dimensiones

$$[F] = T^{-1}$$

16.20.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{s}^{-1}} \quad (\text{partículas por segundo})$$

16.20.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

Todas las de tiempo con exponente -1 .

16.21.	TASA DE FLUENCIA DE PARTÍCULAS (O DENSIDAD DE FLUJO DE PARTÍCULAS) (Y SUS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN), φ
---------------	---

16.21.1. Observaciones y definición

La palabra «tasa» se emplea en esta y otras ocasiones como concepto de rapidez, es decir, de derivada respecto al tiempo. De manera que la tasa de fluencia representa la fluencia por unidad de tiempo.

La definición de *tasa de fluencia* es así: «número de partículas (en un haz de protones, o de electrones, o de α , ...) que entran en una pequeña esfera centrada en un punto dado, en un pequeño intervalo de tiempo dado, dividido por el área de un círculo máximo de dicha esfera y por el citado intervalo de tiempo».

También se designa a veces como «densidad de flujo de partículas» (siendo entonces el flujo de partículas, el número de ellas por unidad de tiempo).

Mediante las fórmulas se definen las funciones de distribución.

16.21.2. Fórmulas

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} \qquad \varphi = \frac{1}{\Delta S} \frac{dN}{dt}$$

(Φ = fluencia de las partículas dadas; t = tiempo; ΔS = área de un pequeño círculo; N = número de partículas).

Las funciones de distribución se definen así:

$$\varphi = \int \varphi_v dv \qquad \varphi = \int \varphi_E dE$$

$$\varphi_v = \frac{d\varphi}{dv} \qquad \varphi_E = \frac{d\varphi}{dE}$$

(φ_v = tasa de fluencia para partículas de velocidad v ; φ_E = tasa de fluencia para partículas de energía E) (más rigurosamente, para intervalos dados infinitesimales dv , y dE).

610 GRAN MANUAL DE MAGNITUDES FÍSICAS Y SUS UNIDADES**16.21.3. Dimensiones**

$$[\varphi] = L^{-2} T^{-1}$$

16.21.4. Unidad SI

$$\boxed{m^{-2} s^{-1}} \quad (\text{partículas}/(m^2 \cdot s))$$

16.21.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$UCGS = cm^{-2} s^{-1} = 10^4 \text{ USI}$$

y todos los productos de unidades de superficie y tiempo con los exponentes dados.

16.21.6. Constantes y valores concretos

Tasa de fluencia de partículas cargadas que inciden sobre la superficie de la Tierra al nivel del mar (por los rayos cósmicos):

$$\varphi = 200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (\text{partículas cargadas por metro cuadrado y segundo})$$

Id. para los neutrinos (procedentes del Sol principalmente):

$$\varphi_\nu = 6 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{neutrinos por metro cuadrado y segundo})$$

16.22. FLUENCIA ENERGÉTICA, Ψ **16.22.1. Observaciones y definición**

Es una magnitud útil en el estudio de la energía de haces de partículas. Se define así: «en un punto del espacio, es la suma de todas las energías, excepto las de masa en reposo, de todas las partículas que entran en una pequeña esfera centrada en ese punto (en un intervalo de tiempo dado), dividida por el área del círculo máximo de dicha esfera».

16.22.2. Fórmulas

$$\Psi = \frac{\sum E_i}{\Delta S}$$

($\sum E_i$ = energía total de las partículas, excepto la de masa en reposo; ΔS = área del pequeño círculo máximo).

16.22.3. Dimensiones

$$[\Psi] = \text{M T}^{-2}$$

16.22.4. Unidad SI

$$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} = \boxed{\text{J/m}^2} \quad (\text{julios por metro cuadrado})$$

16.22.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg/cm}^2 = 10^{-3} \text{ USI}$$

y cualquier cociente entre una unidad de energía y una de superficie.

16.23. FLUJO DE ENERGÍA (O FLUJO ENERGÉTICO O POTENCIA) (de un haz de partículas), P
16.23.1. Observaciones y definición

Es útil, especialmente, en el estudio de la energía que transportan los haces de partículas. Se puede definir como «la energía total (excepto la de masa en reposo) que transportan las partículas que atraviesan una sección del haz en la unidad de tiempo», o bien «la potencia transportada por las partículas a través de una sección».

16.23.2. Fórmulas

El flujo de energía es:

$$P = \frac{dE}{dt}$$

(E = energía de las partículas; t = tiempo).

16.23.3. Dimensiones

$$[P] = \text{L}^2 \text{M T}^{-3}$$

16.23.4. Unidad SI

$$\boxed{\text{W}} \quad (\text{watt, vatio})$$

16.23.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg/s} = 10^{-7} \text{ W}$$

y todas las de potencia.

16.24.	TASA DE FLUENCIA ENERGÉTICA (O DENSIDAD DE FLUJO DE ENERGÍA), ψ
---------------	--

16.24.1. Observaciones y definición

«Tasa» representa la rapidez, es decir, la derivada respecto al tiempo. Por tanto, la definición de *tasa de fluencia energética* es: «fluencia energética dividida por el intervalo de tiempo» (cociente de diferenciales).

También se puede designar como *densidad de flujo de energía* (flujo de energía por unidad de superficie).

16.24.2. Fórmulas

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} \qquad \psi = \frac{dP}{dS}$$

(Ψ = fluencia energética; t = tiempo; P = potencia o flujo de energía; S = superficie).

16.24.3. Dimensiones

$$[\psi] = \text{M T}^{-3}$$

16.24.4. Unidad SI

$$\text{kg s}^{-3} = \text{J}/(\text{s m}^2) = \boxed{\text{W/m}^2} \quad (\text{watt/metro cuadrado})$$

16.24.5. Otras unidades y su equivalencia con la unidad SI (USI)

$$\text{UCGS} = \text{erg}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2) = 10^{-3} \text{ USI}$$

y cualquier cociente entre una unidad de potencia y una de superficie.

16.25.	SECCIÓN EFICAZ, σ
---------------	--

16.25.1. Observaciones y definición

Es una magnitud útil para indicar la probabilidad de una reacción nuclear.

La denominación *sección eficaz* fue dada inicialmente al imaginar que la probabilidad de interacción se relaciona con el tamaño de la sección de los núcleos blanco.

La definición aceptada es: «Para un blanco y reacción dados o para un proceso producido por partículas incidentes, cargadas o no, de tipo y energía especifi-