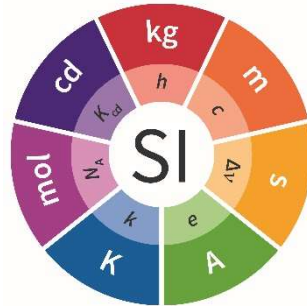


SI

Resumen conciso del Sistema Internacional de Unidades, SI

La metrología es la ciencia de la medida y su aplicación. La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de la medición, independientemente de la incertidumbre de medición y del campo de aplicación.



La Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en inglés) fue establecida por el Artículo 1 de la Convención del Metro, que se firmó el 20 de mayo de 1875. Su misión es proporcionar la base para un sistema único y coherente de mediciones utilizable en todo el mundo y opera bajo la autoridad del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). El sistema métrico decimal, que data de la época de la Revolución Francesa, se basó en 1799 en el metro y el kilogramo. En base a los acuerdos de la Convención del Metro, nuevos prototipos internacionales del metro y el kilogramo fueron fabricados y adoptados formalmente por la primera Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) en 1889. En 1960, la 11ª CGPM definió y estableció formalmente el Sistema Internacional de Unidades. (SI). Desde entonces, el SI se ha actualizado periódicamente para tener en cuenta los avances científicos y la necesidad de mediciones en nuevos campos. La última revisión importante fue adoptada por la 26ª CGPM (2018), que decidió basar el SI en los valores numéricos fijos de un conjunto de siete **constantes definitorias** a partir de las cuales se deducirían las definiciones de las siete unidades básicas del SI. Este documento es un resumen del **Folleto sobre el SI**, una publicación producida por el BIPM, que ofrece una explicación detallada del estado actual del SI.

El SI es el sistema de unidades en el que:

- la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ es 9 192 631 770 Hz,
- la velocidad de la luz en el vacío c es 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck h es $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- la carga elemental e es $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann k es $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constante de Avogadro N_A es $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd} , es 683 lm/W,

donde hercio, julio, culombio, lumen y vatio, con símbolos Hz, J, C, lm y W, respectivamente, se relacionan con las unidades segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela, con símbolos s, m, kg, A, K, mol y cd, respectivamente, de forma que $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ y $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$.

Estas definiciones especifican el valor numérico exacto de cada constante cuando su valor se expresa en la unidad SI correspondiente. Al fijar el valor numérico exacto, la unidad resulta definida, ya que el producto del **valor numérico** por la **unidad** debe ser igual al **valor** de la constante, que es invariante.

Las constantes definitorias se han elegido de modo que, cuando se toman conjuntamente, sus unidades cubren todas las unidades del SI. En general, no hay una correspondencia una a una entre las constantes definitorias y las unidades básicas del SI, excepto para la frecuencia de cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ y la constante de Avogadro N_A . Cualquier unidad SI es un producto de potencias de estas siete constantes y un factor adimensional.

Por ejemplo, de $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, puede derivarse el metro a partir de la velocidad de la luz c y la frecuencia del cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$,

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

El concepto de unidades básicas y derivadas se ha utilizado para definir el SI hasta 2018. Estas categorías, aunque ya no son esenciales en el SI, se mantienen en vista de su conveniencia y uso generalizado. Las definiciones de las unidades básicas, que se derivan de la definición del SI en función de las siete constantes elegidas, se dan en la Tabla 1.

Tabla 1 Las siete unidades básicas del SI

| Magnitud | Unidad SI |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| tiempo | El segundo , símbolo s, es la unidad SI de tiempo. Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s^{-1} . |
| longitud | El metro , símbolo m, es la unidad SI de longitud. Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío, c , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad m s^{-1} , donde el segundo se define en función de la frecuencia del Cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. |
| masa | El kilogramo , símbolo kg, es la unidad SI de masa. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck, h , en $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$, cuando se expresa en la unidad $\text{J}\cdot\text{s}$, igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, donde el metro y el segundo se definen en función de c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. |
| corriente eléctrica | El amperio , símbolo A, es la unidad SI de intensidad de corriente eléctrica. Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, e , en $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, cuando se expresa en la unidad C, igual a $\text{A}\cdot\text{s}$, donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. |
| temperatura termodinámica | El kelvin , símbolo K, es la unidad SI de temperatura termodinámica. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann, k , en $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, cuando se expresa en la unidad $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. |
| cantidad de sustancia | El mol , símbolo mol, es la unidad SI de cantidad de sustancia. Un mol contiene exactamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementales. Esta cifra es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, N_{A} , cuando se expresa en la unidad mol^{-1} , y se denomina número de Avogadro. La cantidad de sustancia, símbolo n , de un sistema, es una medida del número de entidades elementales especificadas. Una entidad elemental puede ser un átomo, una molécula, un ion, un electrón, o cualquier otra partícula o grupo especificado de partículas. |
| intensidad luminosa | La candela , símbolo cd, es la unidad SI de intensidad luminosa en una dirección dada. Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd} , en 683, cuando se expresa en la unidad $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, igual a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$, o a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. |

Todas las demás magnitudes pueden denominarse "magnitudes derivadas" y se miden utilizando unidades derivadas, las cuales se pueden escribir como productos de potencias de las unidades básicas. Veintidós unidades derivadas reciben nombres especiales; son las indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2 *Unidades derivadas SI con nombres especiales*

| Magnitud derivada | Nombre de la unidad derivada | Símbolo de la unidad | Expresión en función de otras unidades |
|---------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| ángulo plano | radián | rad | m/m |
| ángulo sólido | estereorradián | sr | m ² / m ² |
| frecuencia | hercio | Hz | s ⁻¹ |
| fuerza | newton | N | kg m s ⁻² |
| presión, tensión | pascal | Pa | kg m ⁻¹ s ⁻² |
| energía, trabajo, cantidad de calor | julio | J | kg m ² s ⁻² |
| potencia, flujo radiante | vatio | W | kg m ² s ⁻³ |
| carga eléctrica | culombio | C | A s |
| diferencia de potencial eléctrico | voltio | V | kg m ² s ⁻³ A ⁻¹ |
| capacitancia | faradio | F | kg ⁻¹ m ⁻² s ⁴ A ² |
| resistencia eléctrica | ohmio | Ω | kg m ² s ⁻³ A ⁻² |
| conductancia eléctrica | siemens | S | kg ⁻¹ m ⁻² s ³ A ² |
| flujo magnético | weber | Wb | kg m ² s ⁻² A ⁻¹ |
| densidad de flujo magnético | tesla | T | kg s ⁻² A ⁻¹ |
| inductancia | henrio | H | kg m ² s ⁻² A ⁻² |
| temperatura Celsius | grado Celsius | °C | K |
| flujo luminoso | lumen | lm | cd sr |
| iluminancia | lux | lx | cd sr m ⁻² |
| actividad referida a un radionucleido | becquerel | Bq | s ⁻¹ |
| dosis absorbida, kerma | gray | Gy | m ² s ⁻² |
| dosis equivalente | sievert | Sv | m ² s ⁻² |
| actividad catalítica | katal | kat | mol s ⁻¹ |

Aunque el hercio y el becquerel son ambos iguales al inverso del segundo, el hercio se usa solo para fenómenos periódicos, y el becquerel solo para procesos estocásticos en desintegración radioactiva.

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius, °C, que es igual en magnitud al kelvin, K, la unidad de temperatura termodinámica. La magnitud temperatura Celsius t está relacionada con la temperatura termodinámica T por la ecuación $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$.

El sievert también se utiliza para las magnitudes "dosis direccional equivalente" y "dosis personal equivalente".

Hay muchas más magnitudes que unidades. Para cada magnitud, solo hay una unidad SI (aunque esta se puede expresar a menudo de diferentes formas usando nombres especiales), mientras que la misma unidad SI se puede usar para expresar los valores de varias magnitudes diferentes (por ejemplo, la unidad SI J/K puede utilizarse para expresar el valor tanto de la capacidad de calor como de la entropía). Por lo tanto, es importante no usar solo la unidad para especificar la magnitud. Esto es aplicable tanto a los textos científicos como a los instrumentos de medición (es decir, la lectura de un instrumento debe indicar tanto la magnitud en cuestión como la unidad).

Hay magnitudes con la unidad uno, 1, es decir, relaciones de dos magnitudes del mismo tipo. Por ejemplo, el índice de refracción es la relación de dos velocidades, y la permitividad relativa es la relación de la permitividad de un medio dieléctrico a la del espacio libre. También hay magnitudes con carácter de recuento, por ejemplo, el número de entidades celulares o biomoleculares. Estas magnitudes también tienen la unidad uno. La unidad uno es por naturaleza un elemento de cualquier sistema de unidades. Las magnitudes con la unidad uno pueden considerarse, por lo tanto, como trazables al SI. Sin embargo, al expresar los valores de magnitudes adimensionales, la unidad 1 no se escribe.

Múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI

Se ha adoptado un conjunto de prefijos para su uso con las unidades SI, con el fin de expresar los valores de magnitudes que son mucho más grandes, o mucho más pequeñas, que la unidad SI cuando se usa sin ningún prefijo. Se pueden utilizar con cualquier unidad SI. Los prefijos SI se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 *Prefijos del SI*

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

Cuando se usan los prefijos, el nombre del prefijo y el nombre de la unidad se combinan para formar una sola palabra. De manera similar, el símbolo del prefijo y el símbolo de la unidad se escriben sin ningún espacio para formar un solo símbolo, que puede elevarse a cualquier potencia. Por ejemplo, podemos escribir: kilómetro, km; microvoltio, μV ; o femtosegundo, fs.

Cuando las unidades SI se usan sin ningún prefijo, el conjunto resultante de unidades se denomina **coherente** en el siguiente sentido: cuando solo se usan unidades coherentes, las ecuaciones entre los valores numéricos de las magnitudes toman exactamente la misma forma que las ecuaciones entre las propias magnitudes. El uso de un conjunto coherente de unidades tiene ventajas técnicas, por ejemplo, en el cálculo algebraico (véase la publicación sobre el SI).

El kilogramo, kg, es problemático porque el nombre ya incluye un prefijo, por razones históricas. Los múltiplos y submúltiplos del kilogramo se escriben combinando prefijos con el gramo: así escribimos miligramo, mg, no microkilogramo, μkg .

Unidades fuera del SI

El SI es el único sistema de unidades reconocido universalmente, por lo que tiene una clara ventaja para establecer un diálogo internacional. El uso del SI, como un sistema normalizado de unidades, simplifica la enseñanza de la ciencia. Por estas razones, se recomienda el uso de unidades SI en todos los campos de la ciencia y la tecnología. Otras unidades, es decir, unidades que no son SI, generalmente se definen en función de unidades SI mediante factores de conversión.

No obstante, todavía se usan ampliamente algunas unidades que no son del SI. Algunas, como el minuto, la hora y el día, como unidades de tiempo, siempre se utilizarán porque forman parte de nuestra cultura. Otras se utilizan por razones históricas, para satisfacer las necesidades de grupos con intereses especiales o porque no existe una alternativa conveniente en el SI. Siempre seguirá siendo una prerrogativa del científico utilizar las unidades que considere más adecuadas para su propósito. Sin embargo, cuando se usan unidades que no son SI, siempre debe citarse la equivalencia con las del SI. En la Tabla 4 se incluye una selección de unidades no SI con sus factores de conversión al SI. Para obtener una lista más completa, consulte el folleto del SI.

Tabla 4 *Una selección de unidades no SI*

| Magnitud | Unidad | Símbolo | Relación con el SI |
|----------|-----------------------|---------|------------------------------------------|
| tiempo | minuto | min | 1 min = 60 s |
| tiempo | hora | h | 1 h = 3600 s |
| tiempo | día | d | 1 d = 86 400 s |
| volumen | litro | L o l | 1 L = 1 dm ³ |
| masa | tonelada | t | 1 t = 1000 kg |
| energía | electronvoltio (eV) J | eV | 1 eV = 1,602 176 634 $\times 10^{-19}$ J |

Cuando las unidades derivan del nombre de una persona, su símbolo debe comenzar con letra mayúscula (por ejemplo: amperio, A; kelvin, K; hercio, Hz; o culombio, C). En todos los demás casos, excepto el litro, comienzan con letra minúscula (por ejemplo: metro, m; segundo, s; o mol, mol). El símbolo del litro es una excepción; se puede utilizar una letra minúscula "l" o una "L" mayúscula; en este caso se permite el uso de mayúscula para evitar confusiones entre la letra minúscula l y el número uno, 1.

El lenguaje de la ciencia: usar el SI para expresar los valores de las magnitudes

El valor de una magnitud se escribe como el producto de un número y una unidad. El número que multiplica a la unidad es el valor numérico de la magnitud en esa unidad. Siempre debe haber un espacio entre el número y la unidad. El valor numérico depende de la elección de la unidad, de modo que el mismo valor de una magnitud puede tener diferentes valores numéricos cuando se expresa en unidades diferentes, como en los ejemplos que se proporcionan a continuación.

La velocidad de una bicicleta es aproximadamente

$$v = 5,0 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h.}$$

La longitud de onda de una de las líneas amarillas del doblete del sodio es

$$\lambda = 5,896 \times 10^{-7} \text{ m} = 589,6 \text{ nm.}$$

Los símbolos de las magnitudes se escriben en letra cursiva (inclinada) y generalmente son letras individuales del alfabeto latino o griego. Se pueden usar letras mayúsculas o minúsculas, y se puede agregar información adicional sobre la magnitud, como un subíndice, o información entre paréntesis.

Entidades con autoridad, como la Organización Internacional de Normalización (ISO) y las asociaciones internacionales de científicos, como la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP) y la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), han especificado los símbolos recomendados para muchas magnitudes. Ejemplos:

| | |
|---------|--------------------------------------------------|
| T | para la temperatura termodinámica |
| C_p | para la capacidad calorífica a presión constante |
| x_i | para la fracción molar de la especie i |
| μ_r | para la permeabilidad relativa. |

Los símbolos de las unidades se escriben utilizando caracteres romanos (rectos), independientemente del tipo de letra utilizada en el texto adyacente. Son entidades matemáticas y no abreviaturas; los símbolos de unidad nunca van seguidos de un punto final (excepto al final de una frase) ni se usa el plural. El uso correcto de los símbolos de las unidades es obligatorio, y se ilustra con ejemplos en el folleto del SI. Los símbolos de unidad pueden tener más de una sola letra. Se escriben en letras minúsculas, salvo que la unidad derive del nombre de una persona, en cuyo caso la primera letra es mayúscula. Sin embargo, cuando se escribe el nombre completo de una unidad, debe comenzar con letra minúscula (excepto al principio de una frase), para distinguir la unidad de la persona (por ejemplo, una temperatura de 293 kelvin)

Al escribir el valor de una magnitud como el producto de un valor numérico por una unidad, tanto el número como la unidad pueden tratarse mediante las reglas ordinarias del álgebra. Por ejemplo, la ecuación $T = 293 \text{ K}$ también puede escribirse como $T/\text{K} = 293$. Este procedimiento se denomina cálculo de magnitudes o álgebra de magnitudes. A menudo es útil usar la relación entre una magnitud y su unidad como encabezado de las columnas en una tabla, o para etiquetar los ejes de un gráfico, de modo que las entradas de la tabla o las etiquetas de las marcas en los ejes sean simplemente números. El ejemplo (Tabla 5) muestra una tabla de velocidad al cuadrado frente a presión, con las columnas etiquetadas de esta manera.

Tabla 5 *Ejemplo de encabezado de columna en una tabla de velocidad al cuadrado frente a presión*

| p/kPa | $v^2/(\text{m/s})^2$ |
|----------------|----------------------|
| 48,73 | 94 766 |
| 72,87 | 94 771 |
| 135,42 | 94 784 |

Al formar productos o cocientes de símbolos de unidades, se aplican las reglas normales del álgebra. Al formar productos de símbolos de unidades, se debe dejar un espacio entre unidades (o, alternativamente, se puede utilizar un punto centrado a media altura como símbolo de multiplicación). Se debe tener en cuenta la importancia del espacio: el producto de un metro por un segundo se escribe m s (con un espacio), ya que ms (sin espacio) significa milisegundo. Además, cuando se forman productos complejos de unidades, se deben usar corchetes o exponentes negativos para evitar ambigüedades. Por ejemplo, la constante molar de los gases R está dada por:

$$\begin{aligned} pV_m/T = R &= 8,314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ &= 8,314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K}). \end{aligned}$$

Al expresar los números, el separador decimal puede ser un punto o una coma, según las circunstancias. En documentos en inglés, lo habitual es el punto, pero en muchos otros idiomas y países, como España, lo habitual es la coma.

Cuando un número tiene muchos dígitos, es costumbre agrupar los dígitos de tres en tres en torno al separador decimal para facilitar la lectura. Esto no es esencial, pero se hace a menudo y generalmente es útil. Cuando se usa este formato, los grupos de tres dígitos deben estar separados solo por un espacio; sin utilizar punto ni coma. La incertidumbre del valor numérico de una magnitud a menudo se muestra adecuadamente dando la incertidumbre de los dígitos menos significativos, entre paréntesis, después del número. Por ejemplo: El valor de la masa del electrón en el listado CODATA 2014 de constantes fundamentales viene dado como

$$m_e = 9,109\,383\,56\,(11) \times 10^{-31} \text{ kg},$$

donde 11 es la incertidumbre típica de los dígitos finales del valor numérico.

Para obtener más información, consulte la página web del BIPM o la 9ª edición de **The International System of Units (SI)**, disponible en www.bipm.org. También puede acudir a la página web del CEM, www.cem.es, donde hallará la publicación **El Sistema Internacional de Unidades (SI)**, versión en español de la anterior.

Este resumen ha sido preparado por el Comité Consultivo de Unidades (CCU) del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), y publicado por el BIPM. Esta versión en español ha sido realizada por el Centro Español de Metrología, miembro de dicho Comité Consultivo.