IB
DIPLOMA

Física

John Allum - Cristopher Talbot

Vicens Vives

Contenido

Mayor nivel adicional (MNA)

Opciones

Disponible en la página web que acompaña a este libro: www.vicensvives.com/ibextras

Respuestas, glosario e índice

Las respuestas a las preguntas de autoevaluación y a las preguntas de examen de los capítulos 1-12 se encuentran en el libro; las respuestas correspondientes a las Opciones (capítulos 13-16) están disponibles en la página web que acompaña a este libro: www.vicensvives.com/ibextras.

1 Medidas e incertidumbre

IDEAS FUNDAMENTALES

- Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza como lenguaje mundial favorito de la ciencia y la tecnología, y refleja la mejor práctica actual de medida.
- El objetivo de los científicos es diseñar experimentos que proporcionen un «valor verdadero» de las medidas pero, debido a la precisión limitada de los aparatos de medida, normalmente los resultados se dan con un determinado grado de incertidumbre.
- Algunas magnitudes poseen dirección y módulo, mientras que otras solo poseen módulo; comprenderlo es fundamental para su correcta manipulación.

1.1 Medidas en física

Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza como lenguaje mundial favorito de la ciencia y la tecnología, y refleja la mejor práctica actual de medidas

Unidades fundamentales y derivadas del SI

Para comunicarnos necesitamos compartir un mismo lenguaje, y para compartir información numérica necesitamos utilizar unas **unidades de medida** comunes. Los científicos de todo el mundo utilizan un sistema de unidades acordado internacionalmente. Es el denominado **sistema SI** (del francés «Système International»). Las unidades del SI se utilizarán a lo largo de todo el curso.

Naturaleza de la ciencia

Terminología común

Durante gran parte de los últimos 200 años muchos eminentes científicos han intentado llegar a un acuerdo sobre un sistema métrico (decimal) de unidades que pudiera ser utilizado para las medidas en la ciencia y el comercio. El hecho de disponer de un sistema común de medidas representa una valiosa ayuda para la transferencia de información científica y para el comercio internacional. En un principio podría parecer que es lo más sensato, pero existen importantes razones culturales e históricas por las que algunos países, además de algunas sociedades e individuos, se han resistido a cambiar su sistema de unidades.

El SI se formalizó en 1960 y la séptima unidad (el mol) se añadió en 1971. Anteriormente, además de las unidades del SI se utilizaban de forma generalizada las de un sistema basado en centímetros, gramos y segundos (CGS), mientras en otros países se seguía utilizando el sistema imperial (no decimal), que empleaba los pies, las libras y los segundos. Para usos cotidianos, no científicos, los habitantes de muchos países prefieren seguir utilizando los distintos sistemas que se han venido empleando popularmente durante siglos. Se ha responsabilizado a la confusión entre los distintos sistemas de unidades del fracaso de la sonda Mars en 1999, además de numerosos incidentes de aviación.

Unidades fundamentales de medida

En el SI existen **siete unidades fundamentales (básicas)**: kilogramo, metro, segundo, amperio, mol, kelvin (y candela, que *no* forma parte de este curso). En la Tabla 1.1. se enumeran las magnitudes que representan, los nombres y los símbolos de estas unidades del SI.

Se las denomina «fundamentales» porque sus definiciones no corresponden a combinaciones de otras unidades (a diferencia de los metros por segundo, por ejemplo). No es necesario aprender su definición.

Tabla 1.1 *Unidades fundamentales*

Magnitud	Nombre	Símbolo	Definición
longitud	metro	m	la distancia que atraviesa la luz en el vacío en 1/299 792 458 segundos
masa	kilogramo	kg	la masa de un cilindro de platino iridiado que se conserva en el Organismo Internacional de Pesos y Medidas en Francia
tiempo	segundo	s	la duración de 9 192 631 770 oscilaciones de la radiación electromagnética emitida entre dos niveles específicos de energía de los átomos de cesio-133
intensidad de corriente eléctrica	amperio	A	la intensidad de corriente que, cuando fluye entre dos conductores paralelos separados un metro en el vacío, produce una fuerza de 2×10^{-7}N sobre cada metro de los conductores
temperatura	kelvin	K	1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua
cantidad de sustancia	mol	mol	una cantidad de sustancia que contiene tantas partículas como átomos hay en 12 g de carbono-12

Naturaleza de la ciencia

Perfeccionamiento de la instrumentación

La obtención de medidas rigurosas y precisas de los datos experimentales es una piedra angular de la ciencia, y estas medidas dependen además de la precisión de nuestro sistema de unidades. La definición de las unidades fundamentales depende de la habilidad de los científicos para realizar medidas muy precisas, algo que ha mejorado mucho desde que se establecieron y se utilizaron estas unidades por vez primera.

Los avances científicos pueden provenir de la investigación original en nuevas áreas, pero también están impulsados por el perfeccionamiento de las tecnologías y la capacidad para la realización de experimentos más rigurosos. La astronomía es un buen ejemplo ilustrativo: los experimentos controlados generalmente no son posibles, de modo que la creciente y rápida expansión de nuestro conocimiento del Universo se ha logrado en gran parte gracias a la mejora en los datos que podemos recibir con la ayuda de las últimas tecnologías (como los telescopios de alta resolución, por ejemplo).

Unidades de medida derivadas

Todas las demás unidades de la ciencia son combinaciones de las unidades fundamentales. Por ejemplo, la unidad de volumen es el m^3 y la unidad de la velocidad es el $m\,s^{-1}$. Las combinaciones de las unidades fundamentales se denominan **unidades derivadas**.

A veces a las unidades derivadas se les otorga su propio nombre (Tabla 1.2). Por ejemplo, la unidad para la fuerza es el $kg\,m\,s^{-2}$, al que se suele denominar newton, N. Todas las unidades derivadas se introducirán y se definirán a lo largo del curso cuando sea necesario.

Tabla 1.2 *Nombres de algunas unidades derivadas*

Unidad derivada	Magnitud	Combinación de unidades fundamentales
newton (N)	fuerza	$kg\,m\,s^{-2}$
pascal (Pa)	presión	$kg\,m^{-1}\,s^{-2}$
hercio (Hz)	frecuencia	s^{-1}
julio (J)	energía	$kg\,m^2\,s^{-2}$
vatio (W)	potencia	$kg\,m^2\,s^{-3}$
culombio (C)	carga	$A\,s$
voltio (V)	diferencia de potencial	$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-1}$
ohmio (Ω)	resistencia	$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-2}$
weber (Wb)	flujo magnético	$kg\,m^2\,s^{-2}\,A^{-1}$
tesla (T)	intensidad del campo magnético	$kg\,s^{-2}\,A^{-1}$
becquerel (Bq)	radiactividad	s^{-1}

Se espera que los alumnos de este curso escriban y reconozcan las unidades utilizando notación con superíndices; es decir, en la forma $m\,s^{-1}$ en lugar de m/s. Las unidades de la aceleración, por ejemplo, se expresan en la forma $m\,s^{-2}$.

En algunas ocasiones los físicos emplean unidades que no forman parte del SI. El electronvoltio, eV, por ejemplo, es una unidad de energía convenientemente pequeña que se utiliza frecuentemente en física atómica. Las unidades de este tipo se irán introduciendo a lo largo del curso cuando sea necesario. Los alumnos deberán saber convertir unas unidades en otras. Una de las conversiones más habituales es la del tiempo en años al tiempo en segundos.

Enlace con la teoría del conocimiento

Conceptos fundamentales

Como sucede con algunas unidades de medida, muchas de las ideas y de los principios que se emplean en física pueden describirse como «fundamentales». De hecho, se suele decir de la propia física que es una ciencia fundamental. Pero, ¿a qué nos referimos exactamente cuando decimos que algo es «fundamental»? Podríamos reemplazar este término por el término «elemental» o «básico», pero estos últimos no nos ayudan verdaderamente a comprender su verdadero significado.

Uno de los temas centrales de la física es la búsqueda de las partículas fundamentales, unas partículas que constituyen los pilares de construcción del universo y que no están constituidas, a su vez, por partículas más pequeñas y más simples. Otro tanto ocurre con las leyes y principios fundamentales: un principio físico no puede describirse como fundamental si puede explicarse mediante ideas «más simples». Muchos científicos también opinan que un principio no puede ser verdaderamente fundamental si no es relativamente simple de expresar (probablemente utilizando el lenguaje matemático). Si es demasiado complejo, tal vez es porque todavía no se ha descubierto la simplicidad subyacente.

Los principios fundamentales deben «cumplirse» en todo momento y lugar. Los principios fundamentales que consideramos actualmente han sido comprobados una y otra vez para verificar si son verdaderamente fundamentales. No obstante, *siempre* cabe la posibilidad de que, en el futuro, lo que se consideraba que era un principio fundamental acabe descubriéndose que se puede explicar mediante ideas más simples.

Consideremos dos leyes físicas muy conocidas. La *ley de Hooke* describe el estiramiento que se produce en algunos materiales como consecuencia de la acción de una fuerza sobre ellos. Se trata de una ley simple, pero no es una ley fundamental, porque no siempre es cierta. La *ley de la conservación de la energía* también es simple, pero en este caso sí se describe como fundamental, porque no se conocen excepciones.

Notación científica y multiplicadores

Notación científica

Cuando escribimos o comparamos números muy grandes o muy pequeños es conveniente utilizar la **notación científica** (también conocida como «*forma estándar*»).

En la notación científica cada número se expresa en la forma $a \times 10^b$, donde a es un número decimal mayor que 1 y menor que 10, y b es un número **entero** denominado **exponente**. Por ejemplo, en notación científica el número 434 se escribe $4{,}34 \times 10^2$; análogamente: 0,000 316 se escribe $3{,}16 \times 10^{-4}$.

La notación científica es útil para dejar claro el número de cifras significativas (véase la sección siguiente). También se utiliza para introducir y mostrar en pantalla números muy grandes o muy pequeños cuando se efectúan cálculos. La notación $\times 10^x$ o la letra *E* se suelen utilizar en los cálculos para representar «tantas veces diez elevado a…». Por ejemplo: 4,62*E*3 equivale a $4{,}62 \times 10^3$, es decir, 4620.

La generalización del uso de esta forma estándar de representación de los datos numéricos es de gran importancia para la comunicación de la información científica entre los distintos países.

Tabla 1.3 *Multiplicadores métricos (SI) estándar*

Prefijo	Abreviatura	Valor
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^{9}
mega	M	10^{6}
kilo	k	10^{3}
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}

Multiplicadores métricos estándar

En el lenguaje habitual empleamos los términos «miles» y «millones» para representar números grandes. Los equivalentes científicos son los prefijos kilo- y mega-. Por ejemplo, un kilovatio son mil vatios y un megajulio es un millón de julios. Análogamente, una milésima y una millonésima se representan científicamente mediante los prefijos mili- y micro-. En la Tabla 1.3. se muestra una lista de los prefijos estándar. Esta tabla figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Enlace con la teoría del conocimiento

Para una comunicación efectiva se necesita un lenguaje y una terminología comunes

¿Qué ha influido sobre el lenguaje común utilizado en la ciencia? ¿Hasta qué punto disponer de una aproximación estándar a la medición facilita el uso compartido del conocimiento en física?

Parece bastante evidente que la comunicación entre los científicos es mucho más fácil si comparten un lenguaje científico común (símbolos, unidades, notación científica estándar, etc., tal como se ha planteado en este capítulo). Pero, ¿son nuestros métodos modernos de comunicación científica y terminología los mejores posibles o pueden mejorarse? ¿Hasta dónde son un mero accidente histórico basado en los lenguajes y culturas específicas que dominaban en la época de su desarrollo?

Cifras significativas

Cuanto más precisa es una medida, mayor es el número de cifras significativas (dígitos) que pueden emplearse para representarla. Por ejemplo, una intensidad de corriente eléctrica expresada en la forma 4,20 A (a diferencia de 4,19 A o 4,21 A) sugiere una mayor precisión que la expresada en la forma 4,2 A.

Las **cifras significativas** son todos los dígitos de un dato que tienen significado, ya estén antes o después de la coma, incluyendo los ceros. Sin embargo, en ocasiones los ceros se utilizan sin más, lo que puede llevar a confusión. Por ejemplo, si nos dicen que el aeropuerto más cercano está a 100 km, puede que dudemos de si está aproximadamente a 100 km o «exactamente» a 100 km. Es un buen ejemplo de por qué es útil la notación científica. Si empleamos la forma $1{,}00 \times 10^3$ km dejamos claro que hay exactamente tres cifras significativas. En cambio 1×10^3 representa mucha menor precisión.

Cuando efectuamos *cálculos*, el resultado no puede tener más precisión que los datos utilizados para calcular ese resultado. Como regla general (y simplificada), cuando respondemos preguntas o procesamos datos experimentales, el resultado debe contener el mismo número de cifras significativas que los datos utilizados. Si el número de cifras significativas no es el mismo para todos los datos, el número de cifras significativas de la respuesta debe ser el del menos preciso de los datos (el que tiene menor número de cifras significativas). Esto se ilustra en el Ejemplo resuelto 1.

Ejemplo resuelto

1 Utiliza la ecuación

$$P = \frac{mgh}{t}$$

para determinar la potencia, P, de un motor eléctrico que levanta una masa, m, de 1,5 kg, una altura, h, de 1,128 m en un tiempo, t, de 4,79 s. ($g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$)

$$P = \frac{mgh}{t} = \frac{1{,}5 \times 9{,}81 \times 1{,}128}{4{,}79}$$

Una calculadora mostraría en pantalla una respuesta de 3,4652…, pero esta respuesta sugiere una precisión muy alta que no se puede justificar a partir de los datos. El dato que contiene el menor número de cifras significativas es 1,5 kg, por tanto la respuesta debe contener este mismo número de cifras significativas:

$$P = 3{,}5\,\mathrm{W}$$

«Redondeo» hasta un número apropiado de cifras significativas

El «redondeo», como en el Ejemplo resuelto 1, debe realizarse al final de la cadena de cálculos, cuando ha de darse la respuesta. Si se deben efectuar más cálculos a partir de dicha respuesta, hay que utilizar todos los dígitos que aparecían previamente en pantalla. La respuesta debe redondearse nuevamente hasta el número correcto de cifras significativas. En ocasiones, este proceso puede producir pequeñas inconsistencias aparentes entre las respuestas.

Órdenes de magnitud

La física es la ciencia fundamental que intenta explicar cómo y por qué todo lo que hay en el Universo se comporta de la forma en que lo hace. Los físicos lo estudian todo, desde los componentes más pequeños de los átomos hasta los objetos más distantes de nuestra galaxia y más allá (Figura 1.1).

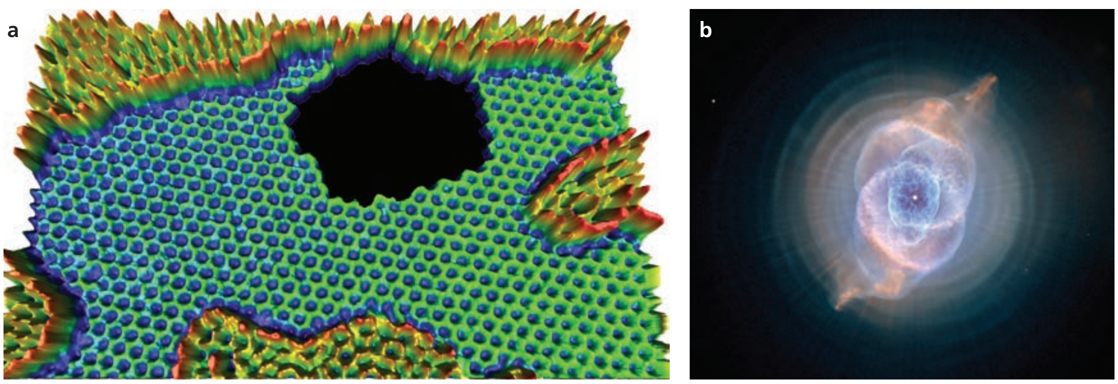


Figura 1.1
a *El comportamiento de los átomos individuales de grafeno (un material constituido por una única capa de átomos de carbono) puede observarse mediante el uso de un tipo especial de microscopio electrónico*
b *Nubes complejas de gas y polvo en la nebulosa del Ojo de Gato, a 3000 años luz de distancia*

La física es una disciplina **cuantitativa** que hace un gran uso de las matemáticas. Las medidas y los cálculos normalmente se refieren al mundo que podemos observar a nuestro alrededor (el mundo **macroscópico**), pero es posible que nuestras observaciones requieran explicaciones **microscópicas** que frecuentemente incluyen el conocimiento de las moléculas, los átomos, los iones y las partículas subatómicas. La **astronomía** es una rama de la física que estudia el otro extremo, en el que aparecen cantidades muchísimo mayores que las que podamos experimentar en nuestra vida cotidiana.

El estudio de la física, por tanto, implica trabajar tanto con números muy grandes como con números muy pequeños.

Cuando los números se alejan tanto de nuestra experiencia cotidiana puede ser difícil apreciar su verdadero tamaño. Por ejemplo, se cree que la edad del Universo es del orden de 10^{18} s, pero ¿cómo de grande es este número? La única forma sensata de responder a esta pregunta es comparando esta cantidad con alguna otra que nos resulte más familiar. Por ejemplo, la edad del Universo equivale a 100 millones de vidas humanas.

Cuando comparamos cantidades de tamaños (**magnitudes**) muy diversos, para simplificar solemos hacer aproximaciones a la potencia de 10 más cercana. Cuando un número se aproxima y se estima hasta la potencia de 10 más cercana, se dice que se está dando su **orden de magnitud**. Por ejemplo, cuando comparamos la vida de un ser humano (cuyo promedio general es de unos 70 años) con la edad del Universo ($1{,}4 \times 10^{10}$ años), podemos utilizar el cociente aproximado $10^{10}/10^2$. En otras palabras, la edad del Universo es de unas 10^8 vidas humanas, o también podríamos decir que hay ocho órdenes de magnitud entre ambos valores.

Algunos ejemplos más:

- La masa de un átomo de hidrógeno es 1,67 x 10^{-27} kg. En orden de magnitud es 10^{-27} kg.
- La distancia a la estrella más cercana (*Proxima Centauri*) es 4,01 x 10^{16} m. En orden de magnitud es 10^{17} m. (Fíjate: log de 4,01 x 10^{16} = 16,60, que está más cerca de 17 que de 16).
- Un día contiene 86 400 segundos. En orden de magnitud son 10^5 s

En las Tablas 1.4 a 1.6 se muestran los intervalos de masas, distancias y tiempos que aparecen en el Universo. Es muy recomendable que veas simulaciones de ordenador en las que se representen estos intervalos.

Tabla 1.4 *Intervalo de masas que aparece en el Universo*

Objeto	Masa/kg
el Universo observable	10^{53}
nuestra galaxia (Vía Láctea)	10^{42}
el Sol	10^{30}
la Tierra	10^{24}
un avión comercial grande	10^5
un humano adulto alto	10^2
un libro grande	1
una gota de lluvia	10^{-6}
un virus	10^{-20}
un átomo de hidrógeno	10^{-27}
un electrón	10^{-30}

Distancia	Tamaño/m
distancia al extremo del Universo observable	10^{27}
diámetro de nuestra galaxia (Vía Láctea)	10^{21}
distancia a la estrella más cercana	10^{16}
distancia al Sol	10^{11}
distancia a la Luna	10^8
radio de la Tierra	10^7
altitud de crucero de un avión	10^4
altura de un niño	1
crecimiento de un cabello humano en un día	10^{-4}
diámetro de un átomo	10^{-10}
diámetro de un núcleo	10^{-15}

Tabla 1.5 *Intervalo de distancias que aparece en el Universo*

Periodo de tiempo	Intervalo de tiempo/s
edad del Universo	10^{18}
tiempo transcurrido desde la extinción de los dinosaurios	10^{15}
tiempo transcurrido desde la aparición del ser humano sobre la Tierra	10^{13}
tiempo transcurrido desde la construcción de las pirámides de Egipto	10^{11}
duración de una vida humana en promedio	10^9
un día	10^5
tiempo que transcurre entre dos latidos humanos	1
periodo correspondiente a un sonido de alta frecuencia	10^{-4}
tiempo que tarda la luz en atravesar una habitación	10^{-8}
periodo de oscilación de una onda de luz	10^{-15}
tiempo que tarda la luz en atravesar un núcleo	10^{-23}

Tabla 1.6 *Intervalo de tiempos que aparece en el Universo*

Estimación

A veces no disponemos de los datos necesarios para efectuar un cálculo exacto o bien puede ocurrir que tengamos que dar una respuesta muy rápida. En ocasiones la pregunta es tan vaga que dar una respuesta apropiada es simplemente imposible. La capacidad de establecer una estimación sensata es una habilidad muy útil que necesita de mucha práctica. El Ejemplo resuelto y las preguntas 2-5 que se proponen a continuación son ejemplos típicos de cálculos que no tienen una respuesta exacta.

Cuando se efectúan estimaciones, cada persona puede establecer una respuesta distinta, de manera que lo más apropiado es emplear una única cifra significativa (o dos como máximo). A veces solo es necesario dar un orden de magnitud.

Ejemplo resuelto

2 Estima la masa del aire de un aula (densidad del aire = 1,3 kg m^{-3})

Un aula convencional puede tener unas dimensiones de 7 m x 8 m x 3 m, de modo que su volumen es de unos 170 m^3

masa = densidad x volumen = 170 x 1,3 = 220 kg

Como se trata de una estimación, tal vez sería más apropiado dar una respuesta de 200 kg. En orden de magnitud correspondería a 10^2 kg

1 Estima la masa de:
 a una hoja de un libro
 b el aire que contiene una botella
 c un perro
 d el agua que contienen los océanos de la Tierra.

2 Proporciona una estimación para las preguntas siguientes:
 a la altura de un edificio de tres pisos
 b el número de veces que gira una rueda a lo largo de la vida útil de un coche
 c cuántos granos de área caben en una taza
 d el espesor de una hoja de un libro.

3 Estima los periodos de tiempo siguientes:
 a cuántos segundos contiene una vida humana media
 b cuánto tardaría una persona en dar una vuelta completa a la Tierra (ignora el tiempo durante el que no camina)
 c cuánto tarda la luz en atravesar una habitación.

4 Averigua los datos necesarios para poder comparar las medidas siguientes. (Da tu respuesta en forma de orden de magnitud).
 a la distancia a la Luna con respecto a la circunferencia de la Tierra
 b la masa de la Tierra con respecto a la masa de una manzana
 c el tiempo que tarda la luz en atravesar un metro con respecto al tiempo que transcurre entre tus latidos.

1.2 Incertidumbre y errores

El objetivo de los científicos es diseñar experimentos que puedan proporcionar un «valor exacto» de sus medidas, pero debido a la precisión limitada de los aparatos de medida, normalmente expresan los resultados con un determinado grado de incertidumbre

Naturaleza de la ciencia

Certidumbre

Aunque los científicos se distinguen por la búsqueda de las respuestas «exactas», toda medida contiene inevitablemente un grado de incertidumbre. Los resultados de *toda* investigación científica contienen incertidumbres y errores, aunque el objetivo de una investigación de calidad es minimizarlos tanto como sea posible.

Cuando recibimos datos numéricos de cualquier clase (ya sean científicos o de otro tipo), necesitamos saber hasta dónde podemos creernos la información que estamos leyendo o escuchando. La presentación de los resultados de una investigación científica rigurosa debe contener siempre una evaluación de la incertidumbre asociada a los resultados, ya que esta constituye parte integral del proceso científico. Desafortunadamente no ocurre lo mismo para mucha de la información que recibimos a través de los medios de comunicación, que suele presentarse demasiado a menudo de forma poco crítica y poco científica, sin referencias a las fuentes y a su fiabilidad.

Ya podemos intentarlo de todas las maneras, incluso con los mejores instrumentos de medida; simplemente no es posible medir algo. Y eso es por una razón: las cosas que queremos medir no existen como cantidades perfectamente exactas; de hecho, no hay ningún motivo para lo que lo sean.

En consecuencia, *toda* medida es una aproximación. Puede que una medida sea la más exacta que se haya hecho jamás; por ejemplo, puede establecerse que la anchura de una regla es 2,283 891 03 cm, pero todavía no es un valor perfecto, y si lo fuera, no lo sabríamos, porque siempre necesitaríamos un instrumento más preciso para comprobarlo. En este ejemplo tenemos, además, una complicación adicional: cuando medimos longitudes muy pequeñas, tenemos que lidiar con la naturaleza atómica de los objetos que estamos midiendo. (¿Cuál es el límite de un átomo?)

La **incertidumbre** es el intervalo, por encima y por debajo de un valor dado, en el que cabe esperar que se encuentren los valores de las medidas repetidas de un experimento. Por ejemplo, si la altura media que alcanza el rebote de una pelota cuando esta se lanza (desde una misma altura) es 48 cm y las medidas experimentales de dicho rebote se encuentran en el intervalo entre 45 cm y 51 cm, el resultado de la medida experimental del rebote debería expresarse como 48 ± 3 cm. La incertidumbre es ± 3 cm, aunque suele expresarse mejor en forma de porcentaje, en este ejemplo $\pm 6\%$. Obviamente, lo deseable es que los experimentos den resultados con baja incertidumbre, a este tipo de medidas se las denomina **precisas**. Pero, ¡a veces los resultados precisos son incorrectos!

Cuanto más precisa es una medida, mayor es el número de cifras significativas (dígitos) que pueden emplearse para representarla.

Si se conoce el valor correcto («verdadero») de una magnitud y la medida experimental que se obtiene no coincide con dicho valor, hablamos de **error** experimental. Es decir, se produce un error en una medida cuando su resultado no coincide con el valor correcto. Por ejemplo, si un alumno obtiene experimentalmente el valor 49 cm para la altura del rebote de una pelota, pero la observación de un registro de video muestra que el valor correcto es 48 cm, el error de la medida es de + 1 cm.

Todas las medidas comportan errores, ya sean grandes o pequeños, que obedecen a distintas causas, pero, en todo caso, no deben confundirse con las equivocaciones. Los errores pueden clasificarse como *aleatorios* o *sistemáticos* (ver más abajo), aunque, hasta cierto punto, todas las medidas llevan asociados errores de ambos tipos.

Los términos *error* e *incertidumbre* se utilizan con el mismo significado, aunque esta identificación solo tiene sentido cuando nos referimos a experimentos que tienen un resultado verdadero conocido.

Enlace con la teoría del conocimiento

El conocimiento científico es provisional

«Uno de los objetivos de las ciencias físicas es proporcionar un retrato exacto del mundo material. Uno de los logros de la física del siglo XX ha sido demostrar que este objetivo es inalcanzable».

Jacob Bronowski

¿Pueden los científicos estar verdaderamente seguros de sus descubrimientos?

La creencia popular es que la ciencia trabaja con «hechos» y, en gran parte, es así; pero esta creencia también proporciona una impresión incompleta de la naturaleza de la ciencia. La afirmación es engañosa, en tanto que puede sugerir que los científicos creen que han desvelado determinadas «verdades» universales para siempre. El conocimiento científico es provisional y está completamente abierto a los cambios a medida que se van realizando nuevos descubrimientos. Es más, esta es la naturaleza esencial de la ciencia, y los buenos científicos fomentan la revisión del «conocimiento» existente y la búsqueda del perfeccionamiento y el progreso.

Distintas clases de incertidumbre

La incertidumbre en las medidas experimentales que se trata en el presente capítulo es consecuencia de las limitaciones de los científicos y de sus equipos para obtener resultados 100% exactos. No obstante, debemos también tener en cuenta que el propio acto de medir puede cambiar lo que estamos intentando medir. Por ejemplo, el hecho de conectar un amperímetro a un circuito eléctrico puede tener un efecto sobre la intensidad de la corriente que se desea medir, por muchos esfuerzos que se realicen para minimizar dicho efecto. Análogamente, el hecho de poner un termómetro en un líquido caliente altera su temperatura.

La «incertidumbre» también aparece como un importante concepto en la física moderna: el principio de incertidumbre de Heisenberg trata del comportamiento de las partículas subatómicas y se explica en el capítulo 12 (alumnos de Nivel Avanzado). Una de sus ideas centrales es que cuanta mayor es la precisión con la que se conoce la posición de una partícula, menor es la precisión con la que se conoce su momento, y viceversa. Sin embargo, hay que recalcar que el principio de incertidumbre de Heisenberg es una característica fundamental de la física cuántica y que no tiene nada que ver con los límites experimentales de la tecnología de laboratorio actual.

Errores aleatorios y sistemáticos

Errores aleatorios

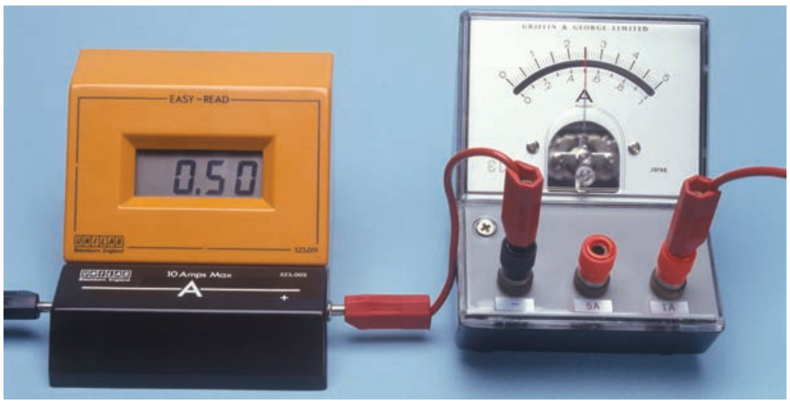
Los **errores aleatorios** son inevitables, porque las medidas exactas son imposibles. Los valores obtenidos experimentalmente pueden ser mayores o menores que el valor correcto y se distribuyen de forma aleatoria a su alrededor.

Por regla general, los errores aleatorios son desconocidos e impredecibles. Su existencia se debe a múltiples razones, entre las que se encuentran:

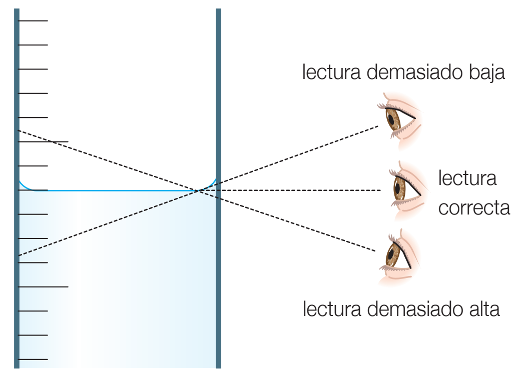
- limitaciones de la escala o la pantalla que se esté utilizando
- lecturas de la escala desde posiciones incorrectas
- irregularidad en los tiempos de reacción de la persona que manipula un cronómetro
- dificultad para realizar observaciones que cambian rápidamente con el tiempo.

La lectura obtenida a partir de un instrumento de medida está limitada por la menor división de su escala. Es lo que se denomina **error de legibilidad** (o **de lectura**). Por ejemplo, un termómetro de vidrio con un líquido en su interior, con una escala en la que solo vienen marcados los grados (23 °C, 24 °C, 25 °C, etc.) no es fiable para medir intervalos de temperatura de 0,1 °C. Normalmente se considera que el error asociado a una escala **analógica** (continua), como la del termómetro de vidrio del ejemplo anterior, es la mitad de la división más pequeña, para este ejemplo ± 0,5 °C. En el caso de instrumentos **digitales** se considera que el error corresponde a la menor división que puede mostrar en pantalla el instrumento de medida. En la Figura 1.2 se muestran dos amperímetros, uno analógico y el otro digital, que pueden utilizarse para medir la intensidad de la corriente eléctrica.

Un motivo muy habitual por el que aparecen errores aleatorios es la lectura de una escala analógica desde una posición incorrecta. Se denomina **error de paralaje** y en la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de este tipo de error.



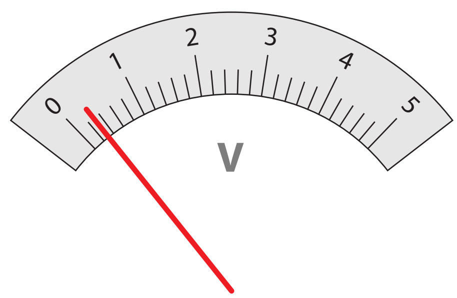
■ **Figura 1.2** *Amperímetro analógico y amperímetro digital utilizados para medir la misma intensidad de corriente eléctrica*



■ **Figura 1.3** *Error de paralaje cuando se lee el nivel de líquido en un cilindro de medida*

Errores sistemáticos

Un **error sistemático** se produce cuando algo funciona mal de *manera repetida,* ya sea en el instrumento de medida o en el método empleado. Una lectura que presenta un error sistemático siempre es o más alta o más baja que el valor correcto y siempre en la misma cantidad. Las causas más frecuentes de estos errores son instrumentos que tienen una escala incorrecta (mal **calibrada**), o instrumentos que tienen un valor inicial incorrecto, como por ejemplo un medidor que muestra en pantalla un determinado valor cuando la lectura debería ser cero. Este error se denomina **error de calibración de cero**, del que se muestra un ejemplo en la Figura 1.4. Un termómetro que registra de forma incorrecta la temperatura de una habitación produce errores sistemáticos cuando se utiliza para medir otras temperaturas.



■ **Figura 1.4** *Este voltímetro tiene un error de calibración de cero de 0,3 V, por tanto todas las lecturas se verán incrementadas por igual en 0,3 V*

Exactitud

Se dice que una medida cercana al valor correcto (si este se conoce) es una medida **exacta**, pero, en el lenguaje científico, el término *exacto* también significa que un conjunto de medidas realizadas durante un experimento posee un pequeño error sistemático. Por tanto, un conjunto de medidas exactas se distribuye de forma prácticamente uniforme alrededor del valor correcto (ya sea cerca o lejos de este), de manera que el promedio de estas medidas estará cerca del valor verdadero.

En muchos experimentos puede suceder que se desconozca el valor «correcto», lo que comporta que la exactitud de las medidas no se puede conocer con certeza. En estos casos, la calidad de la medida se puede juzgar mejor mediante su **precisión**: ¿pueden repetirse los mismos resultados?

Las diferencias entre precisión y exactitud pueden ilustrarse mediante el ejemplo de unas flechas y una diana, como en la Figura 1.5. El tiro es preciso si las flechas están agrupadas muy cerca unas de otras, y exacto si las flechas se distribuyen de forma prácticamente uniforme alrededor del centro de la diana. El último diagrama representa *tanto* exactitud *como* precisión, aunque en el lenguaje cotidiano hablaríamos simplemente de precisión.

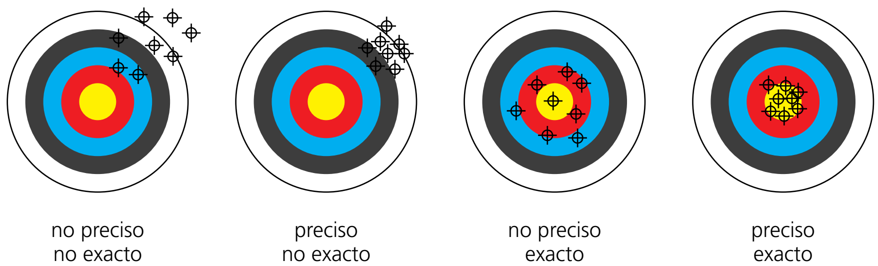


Figura 1.5 *Diferencia entre precisión y exactitud*

Un reloj que siempre se adelanta 5 minutos se puede decir que es preciso, pero no es exacto. Es un claro ejemplo de error de calibración de cero sistemático. El uso de un cronómetro manual para cronometrar una carrera de 100 m puede proporcionar resultados exactos (si no hay errores sistemáticos), pero es poco probable que sea preciso, porque los tiempos de reacción humanos dan lugar a errores aleatorios significativos.

Identificación y reducción de los efectos de los errores

Si disponemos de una única medida de una determinada magnitud, puede que no tengamos manera de saber lo cerca que está del resultado correcto; es decir, probablemente desconocemos la magnitud de cualquier error de la medida. Pero si repetimos la medida y los resultados son similares (baja incertidumbre, alta precisión) aumenta nuestra confianza en los resultados del experimento, sobre todo si hemos revisado cualquier causa posible de error sistemático.

La manera más habitual de reducir los efectos de los *errores aleatorios* es mediante la repetición de experimentos y el cálculo del promedio de los resultados, que debería estar más cerca del valor correcto que la mayoría, o la totalidad, de las medidas individuales. Cualquier valor inusual (**anómalo**) debe ser verificado y probablemente excluido del cálculo del promedio.

Muchos experimentos implican la realización de un intervalo de medidas, cada una bajo unas condiciones experimentales distintas, de forma que se pueda representar una gráfica que muestre el patrón de resultados. (Por ejemplo, cambiando el voltaje de un circuito eléctrico para ver cómo afecta a la intensidad de corriente eléctrica). Si aumentamos el número de pares de medidas reducimos también los efectos de los errores aleatorios porque la recta de ajuste puede dibujarse con mayor fiabilidad.

Los experimentos deben diseñarse, dentro de lo posible, para que produzcan lecturas grandes. Por ejemplo, podemos leer las divisiones de una regla hasta la mitad de un milímetro, y otro tanto les ocurre a las medidas que realicemos con este instrumento. Cuando medimos una longitud de 90 cm probablemente este error se puede considerar aceptable (es un porcentaje de error del 0,56%), pero este mismo porcentaje de error cuando medimos solo 2 mm es probablemente inaceptable. Cuanto más grande es la lectura de una medida (realizada con un determinado instrumento), menor será su error asociado. Si esto no es posible, puede que sea necesario sustituir el instrumento de medida por otro con divisiones más pequeñas.

Puede ocurrir que llevemos a cabo un experimento cuidadosamente y con instrumentos de buena calidad y, en cambio, tengamos errores aleatorios importantes. Las causas pueden ser diversas y es posible que tengamos que rediseñar el experimento para soslayar los problemas. El uso de un cronómetro para medir el tiempo que tarda en llegar al suelo un objeto que dejamos caer o la medida de la altura del rebote de una pelota son dos ejemplos de experimentos simples que pueden dar lugar a errores aleatorios significativos.

Los efectos de los *errores sistemáticos* no pueden reducirse repitiendo las medidas. Los instrumentos deben revisarse antes de ser utilizados para detectar posibles errores, pero puede ocurrir que no detectemos un error sistemático hasta que hayamos representado gráficamente los resultados y veamos que la recta de ajuste no interseca el eje vertical de la forma esperada, como se muestra en la Figura 1.6. En un caso así lo más conveniente es aumentar o disminuir todas las medidas una misma magnitud si es que se puede determinar la causa del error sistemático.

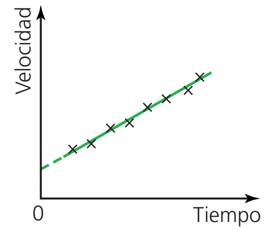


Figura 1.6 *La recta de ajuste para esta gráfica velocidad-tiempo, correspondiente a un carrito que cae rodando por una pendiente desde una posición de reposo, no pasa por el origen, por tanto ha habido probablemente un error sistemático*

Incertidumbre absoluta, relativa y en porcentaje

Incertidumbre y datos experimentales

La incertidumbre correspondiente a un dato experimental puede expresarse mediante una de estas tres formas:

- La **incertidumbre absoluta** de una medida es el intervalo, por encima y por debajo del valor dado, dentro del que esperamos que se encuentre cualquier medida repetida que hagamos. Por ejemplo, podemos expresar la masa de un bolígrafo en la forma 53,2 g ± 0,1 g, donde la incertidumbre es ±0,1 g.
- La **incertidumbre relativa** es el cociente entre la incertidumbre absoluta y el valor medido.
- El **porcentaje de incertidumbre** es la incertidumbre relativa expresada en porcentaje.

La incertidumbre expresada en porcentaje suele ser la que proporciona mayor información. Lo deseable es que un experimento produzca resultados con incertidumbre menor del 5%, pero no siempre es posible.

Ejemplo resuelto

3 La masa de una pieza de metal se expresa en la forma 346 g ± 2,0%.

a ¿Cuál es la incertidumbre absoluta?

b ¿Cuál es el rango de valores esperado que puede tomar la masa?

c ¿Cuál es la incertidumbre relativa?

a el 2% de 346 g es ± 7 g (aproximando a gramos, como el dato inicial)

b entre 339 g y 353 g (con 3 cifras significativas)

c el 2% equivale a $\frac{1}{50}$

Lo ideal sería expresar todas las medidas experimentales con la incertidumbre asociada, pero puede resultar repetitivo y tedioso en un contexto de aprendizaje, de modo que se suelen omitir hasta que se trabaja con este tema de forma específica.

Normalmente es fácil decidir el valor de la incertidumbre asociada a una medida aislada realizada con un determinado instrumento. Se suele identificar esta incertidumbre con el error de lectura, tal como hemos descrito anteriormente. Sin embargo, a veces es difícil decidir cuál es la incertidumbre global asociada a una medida teniendo en cuenta todas las dificultades experimentales. Por ejemplo, el error de lectura de un cronómetro puede ser 0,01 s, pero la incertidumbre asociada a sus medidas puede ser mucho mayor como consecuencia de los tiempos de reacción humanos.

La mayor o menor dispersión de las lecturas alrededor del valor medio puede ser útil como guía para estimar la incertidumbre aleatoria, pero no así para la incertidumbre sistemática. Una vez calculado el valor medio de las lecturas, puede establecerse que la incertidumbre aleatoria es la máxima diferencia entre una lectura aislada y el valor medio. Esto último se ilustra en el ejemplo resuelto siguiente.

Ejemplo resuelto

4 Las medidas siguientes (en cm) corresponden a las lecturas de un experimento para medir la altura del rebote de una pelota: 32, 29, 33, 32, 37 y 28. Estima los valores de la incertidumbre aleatoria (absoluta y en porcentaje) asociados al experimento.

La media aritmética de estas seis lecturas es 31,83 cm, pero sería más adecuado expresarla con dos cifras significativas (32 cm), como los datos originales. La lectura que presenta la mayor diferencia con este valor medio es 37 cm, por tanto 5 cm es una posible estimación de la incertidumbre absoluta; en porcentaje, la incertidumbre es: (5/37) x 100 = 14%.

Fíjate en que si los mismos datos se hubieran obtenido en el orden: 28, 29, 32, 32, 33, 37, sería difícil de creer que las incertidumbres fueran aleatorias y sería necesario encontrar otra explicación para la variación de resultados.

Incertidumbre en resultados calculados

Cuando efectuamos cálculos basados en datos experimentales, se supone que conocemos la incertidumbre asociada a cada medida individual. Por tanto, es importante saber cómo utilizar estas incertidumbres individuales para determinar la incertidumbre de cualquier resultado calculado a partir de estos datos.

Consideremos un ejemplo simple: medimos la distancia recorrida por un carrito que se desplaza a velocidad constante, 76 cm ± 2 cm (± 2,6%) durante un tiempo de 4,3 s ± 0,2 s (± 4,7%).

Podemos calcular la velocidad a partir del cociente distancia/tiempo = 76/4,3 = 17,67…, que se expresa como 18 m s^{-1} cuando lo redondeamos a dos cifras significativas, por consistencia con los datos experimentales.

Para determinar la incertidumbre de este resultado, consideramos las incertidumbres asociadas a la distancia y al tiempo. Si utilizamos la distancia más larga y el tiempo más corto, la mayor respuesta posible para la velocidad es 78/4,1 = 19,02… Si utilizamos la menor distancia y el tiempo más largo, la menor respuesta posible para la velocidad es 74/4,5 = 16,44… (Los números los redondearemos al final de los cálculos).

La velocidad se encuentra, por tanto, entre 16,44 cm s^{-1} y 19,02 cm s^{-1}. El valor 19,02 presenta la mayor diferencia (1,35) respecto a 17,67. Así pues, el resultado final puede expresarse como 17,67 ± 1,35 cm s^{-1}, que representa una incertidumbre máxima del 7,6%. Si redondeamos a dos cifras significativas, el resultado pasa a ser 18 ± 1 cm s^{-1}.

Los cálculos de la incertidumbre según el método anterior pueden llegar a ser muy farragosos, de modo que, en este curso, *se aceptarán los métodos aproximados*. Por ejemplo, en el cálculo de la velocidad que acabamos de realizar, la incertidumbre de los datos fue del ± 2,6% para la distancia y del ± 4,7% para el tiempo. El porcentaje de incertidumbre del resultado final se puede aproximar mediante la suma de los porcentajes de incertidumbre de los datos de partida: 2,6 + 4,7 = 7,3%. Con este método aproximado obtenemos más o menos el mismo valor que el que habíamos calculado utilizando los valores mayores y menores posibles de la velocidad. A continuación se dan algunas reglas para estimar la incertidumbre en el caso de resultados calculados.

Reglas para estimar la incertidumbre en resultados calculados

- Para cantidades que proceden de adición o substracción: sumar las incertidumbres absolutas. En el *Apéndice de datos de Física* esto se expresa como:

Si $y = a \pm b$ entonces $\Delta y = \Delta a + \Delta b$

- Para cantidades que proceden de multiplicación o de división: sumar las incertidumbres relativas individuales o los porcentajes de incertidumbre individuales. En el *Apéndice de datos de Física* esto se expresa como:

Si $y = \dfrac{ab}{c}$ entonces $\dfrac{\Delta y}{y} = \dfrac{\Delta a}{a} + \dfrac{\Delta b}{b} + \dfrac{\Delta c}{c}$

- Para cantidades que proceden de elevar a una potencia, *n*, el *Apéndice de datos de Física* da:

Si $y = a^n$ entonces $\dfrac{\Delta y}{y} = \left|n\left(\dfrac{\Delta a}{a}\right)\right|$

- Para otras funciones (como las trigonométricas, logarítmicas o raíces cuadradas): calcular los valores absolutos mayores y menores posibles y comparar con el valor medio, tal como se muestra a continuación en el ejemplo resuelto. Ten en cuenta, no obstante, que aunque estos cálculos puedan tener lugar en conexión con el trabajo de laboratorio, *no* se pedirán en los exámenes.

Ejemplo resuelto

5 La medida de un ángulo θ, resulta ser 34° ± 1°. ¿Cuál es la incertidumbre asociada a la inclinación de este ángulo?

tg 34° = 0,675 tg 33° = 0,649 tg 35° = 0,700

Mayor incertidumbre absoluta = 0,675 − 0,649 = 0,026
(0,700 − 0,675 = 0,025, que es menor que 0,026)

Por tanto, tg θ = 0,67 ± 0,03 (utilizando el mismo número de cifras significativas que en los datos originales).

5 Se añade una masa de 346 ± 2 g a una masa de 129 ± 1 g.
a ¿Cuál es la incertidumbre absoluta global?
b ¿Cuál es el porcentaje de incertidumbre global?

6 La ecuación $s = \frac{1}{2}at^2$ se emplea para calcular el valor de s cuando a es 4,3 ± 0,2 m s^{-2} y t es 1,4 ± 0.1 s.
a Calcula el valor de s.
b Calcula el porcentaje de incertidumbre de los datos del enunciado.
c Calcula el porcentaje de incertidumbre de la respuesta.
d Calcula la incertidumbre absoluta de la respuesta.

7 La medida de una cierta magnitud resulta ser (1,46 ± 0,08). ¿Cuál es la máxima incertidumbre de la raíz cuadrada de esta magnitud?

Uso de las hojas de cálculo para calcular incertidumbres

Las hojas de cálculo pueden resultar muy útiles cuando hay que efectuar múltiples cálculos de incertidumbres asociadas a resultados experimentales. Por ejemplo, la resistividad, ρ, de un alambre puede calcularse mediante la ecuación $\rho = R\pi r^2/l$, donde r y l son el radio y la longitud del alambre, respectivamente, y R es su resistencia. En la figura 1.7 se muestran los **datos sin procesar** (sombreados en verde) de un experimento en el que se mide la resistencia de varios alambres de un mismo metal. En el resto de la hoja de cálculo se muestran los cálculos correspondientes al proceso de datos para determinar la resistividad y la incertidumbre en el resultado. Se puede utilizar un programa de ordenador para dibujar una gráfica de los resultados, que además puede incluir barras de error (véase página 13).

RESISTENCIA		RADIO			LONGITUD		RESISTIVIDAD		
Resistencia R/Ω ± 0,2 Ω	Porcentaje de incertidumbre en R	Radio, r/mm ± 0,01 mm	Porcentaje de incertidumbre en r	Porcentaje de incertidumbre en r^2	Longitud, l/cm ± 1 cm	Porcentaje de incertidumbre en l	Resistividad, $\rho = R\pi r^2/l/\Omega$m	Porcentaje de incertidumbre en ρ	Incertidumbre absoluta en ρ/Ωm
9,4	2,1	0,15	6,7	13,3	44	2,3	0,0000015	18	0,0000003
6,2	3,2	0,22	4,5	9,1	67	1,5	0,0000014	14	0,0000002
6,2	3,2	0,25	4,0	8,0	80	1,3	0,0000015	12	0,0000002
5,2	3,8	0,30	3,3	6,7	99	1,0	0,0000015	12	0,0000002
5,0	4,0	0,35	2,9	5,7	128	0,8	0,0000015	10	0,0000002
3,8	5,3	0,43	2,3	4,7	149	0,7	0,0000015	11	0,0000002
3,4	5,9	0,51	2,0	3,9	175	0,6	0,0000016	10	0,0000002
2,4	8,3	0,62	1,6	3,2	198	0,5	0,0000015	12	0,0000002

Figura 1.7 *Uso de una hoja de cálculo para calcular indeterminaciones asociadas a un experimento de resistencia eléctrica*

8 **a** Utiliza una hoja de cálculo para entrar los mismos datos sin procesar que se muestran en la Figura 1.7.
b Utiliza la hoja de cálculo para confirmar los cálculos que se muestran.
c ¿Qué diferencia aparecería en los resultados si el radio del alambre solo se pudiera medir con una precisión de medio milímetro?

Naturaleza de la ciencia

Incertidumbre

«Todo conocimiento científico presenta un cierto grado de incertidumbre…»

Richard P. Feynman (1998), *¿Qué significa todo eso?: Reflexiones de un científico-ciudadano*

No solo son los experimentos los que presentan incertidumbre. Todo conocimiento científico la posee en un determinado grado, en el sentido de que los buenos científicos comprenden que aquello que damos por cierto hoy puede cambiar a la luz de nuevos descubrimientos o perspectivas. Y esta duda es fundamental para la verdadera naturaleza de la ciencia. En cualquier época, pasada o presente, el desarrollo de la ciencia se ha sustentado sobre un corpus de conocimiento consensuado por la comunidad científica, y los mayores avances provienen justamente de aquellos que cuestionan y ponen en duda la situación actual del conocimiento y el pensamiento científico.

Representación gráfica de la incertidumbre

Los sistemas de representación gráfica se explican detalladamente en el apartado *Gráficos y análisis de datos* de la página web gratuita anexa.

El intervalo de incertidumbre aleatoria de una medida o de un resultado calculado puede representarse gráficamente mediante unas cruces que representan cada dato experimental o calculado (en lugar de un punto).

Barras de error

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo, la gráfica de la distancia en función del tiempo para el movimiento de un tren. Sobre cada dato se dibuja una línea vertical y otra horizontal que representan la incertidumbre en las medidas de ambos ejes, respectivamente. En este ejemplo concreto, la incertidumbre en el tiempo es ± 0,5 s y la incertidumbre en la distancia es ± 1 m. Estas líneas, que normalmente se representan con una pequeña línea perpendicular en el extremo, para indicarlo claramente, se denominan **barras de error** (tal vez sería mejor denominarlas barras de *incertidumbre*). En la Figura 1.8, el área delimitada por cada barra de error se ha sombreado para destacarla. Cabe esperar que la curva de ajuste pase por alguno de los puntos de cada una de las áreas sombreadas.

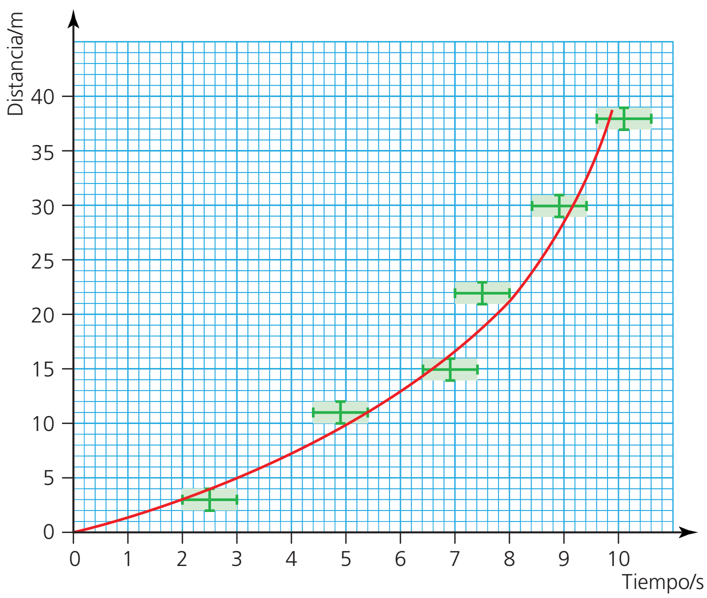


Figura 1.8 *Representación de la incertidumbre mediante barras de error*

En algunos experimentos, las barras de error son tan cortas e insignificantes que no se incluyen en la gráfica. Por ejemplo, la medida de una masa puede expresarse como 347,46 ± 0,01 g. La incertidumbre asociada a esta lectura sería demasiado pequeña para representarla en forma de barra de error sobre un gráfico. (Fíjate en que no cabe esperar barras de error para las funciones trigonométricas y logarítmicas).

Incertidumbre asociada a la pendiente y a las intersecciones con los ejes

Si los resultados de un experimento sugieren una representación lineal, normalmente es importante determinar los valores de la pendiente y/o las intersecciones con los ejes. Sin embargo, a menudo se pueden dibujar diversas rectas que pasan por las barras de error que representan los datos experimentales.

Generalmente consideramos que la recta de ajuste está entre la recta de máxima pendiente posible y la recta de mínima pendiente posible. En la Figura 1.9 se muestra un ejemplo (por simplicidad, solo se representan la primera y la última barra de error, pero en la práctica deben considerarse todas las barras de error para dibujar las rectas).

En la Figura 1.9 se representa la variación de la longitud de un muelle metálico en función de la fuerza con la que se estira. Sabemos que las medidas no son precisas porque las barras de error son largas. La recta de ajuste se ha dibujado entre las otras dos rectas. Se trata de un **gráfico lineal** (una línea recta) y sabemos que la pendiente de la recta representa la fuerza constante (rigidez) del muelle, y la intersección con el eje *x* representa la longitud original del muelle. A partir de las medidas procedentes de la recta de ajuste, podemos efectuar los cálculos siguientes:

$$\text{fuerza constante= gradiente} = \frac{90 - 0}{6{,}6 - 1{,}9} = 19\,\text{N cm}^{-1}$$

longitud original = intersección con el eje x = 1,9 cm

Para determinar la incertidumbre en el cálculo de la pendiente y de las intersecciones con los ejes, debemos considerar el conjunto de rectas que atraviesan las barras de error. La incertidumbre será la máxima diferencia entre los valores obtenidos a partir de las gráficas con la mayor pendiente posible y la menor pendiente posible, respectivamente, y el valor calculado a partir de la recta de ajuste. En este ejemplo se haría de la forma siguiente:

la fuerza constante está entre $14\,\text{N cm}^{-1}$ y $28\,\text{N cm}^{-1}$

la longitud original está entre 1,1 cm y 2,6 cm.

El resultado final se puede representar como:

fuerza constante = $19 \pm 9\,\text{N cm}^{-1}$

longitud original = $1{,}9 \pm 0{,}8$ cm.

Claramente, el elevado valor de las incertidumbres asociadas a estos resultados confirma que el experimento tenía poca precisión.

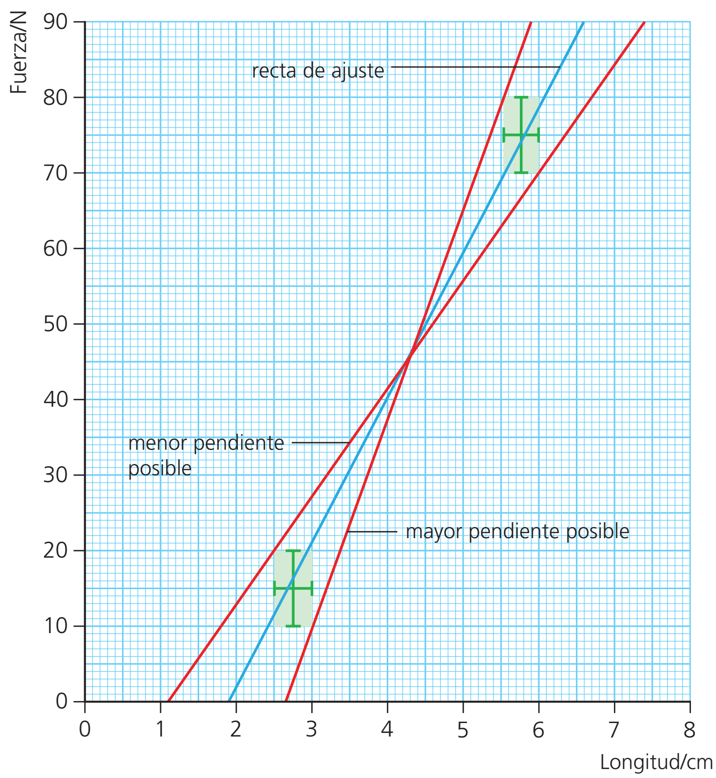


Figura 1.9 *Búsqueda de las pendientes máxima y mínima en el experimento del estiramiento de un muelle*

1.3 Magnitudes vectoriales y escalares

Algunas magnitudes poseen dirección y módulo, mientras que otras solo poseen módulo; comprenderlo es fundamental para su correcta manipulación

Naturaleza de la ciencia

Modelos tridimensionales

Al estudiar las páginas de un libro o una pantalla, es fácil que perdamos la conciencia espacial y el reconocimiento de que los principios de la ciencia se aplican al espacio tridimensional. Es importante conocer las direcciones de algunas magnitudes físicas (en dos o en tres dimensiones) para comprender sus efectos. Estas magnitudes se denominan vectores. El tratamiento matemático de las magnitudes vectoriales en tres dimensiones (análisis vectorial) se inició en el siglo dieciocho.

Magnitudes vectoriales y escalares

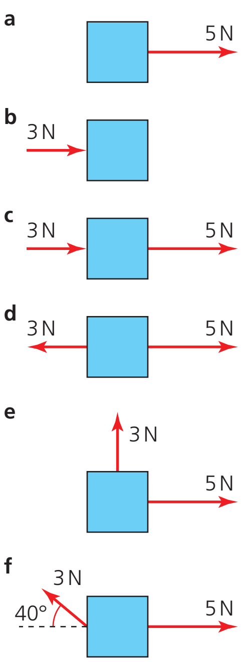


Figura 1.10
Las fuerzas son magnitudes vectoriales

En los diagramas de la Figura 1.10 se representa la fuerza o fuerzas que actúan sobre un objeto. En la Figura 1.10a el objeto está siendo estirado hacia la derecha con una fuerza de 5 N. La longitud de la flecha representa su tamaño, y la orientación de la flecha representa la dirección en la que actúa. La longitud de la flecha es proporcional a la fuerza. En la Figura 1.10b se representa una fuerza más pequeña (3 N) que empuja el objeto hacia la derecha. En ambos ejemplos el objeto se desplazará (se acelerará) hacia la derecha.

En la Figura 1.10c hay dos fuerzas actuando. Podemos sumarlas para mostrar que el efecto es el mismo que el que correspondería a una única fuerza de 8 N (= 3 + 5) actuando sobre el objeto. Decimos entonces que la fuerza *resultante* (neta) es de 8 N.

En la Figura 1.10d hay dos fuerzas actuando sobre el objeto, pero lo hacen en direcciones distintas. El efecto global lo podemos calcular «sumando» las dos fuerzas, pero en este caso debemos tener en cuenta su dirección. Así, podemos escribir +5 + (–3) = + 2 N, donde a las fuerzas que tiran hacia la derecha les otorgamos signo positivo y a las que lo hacen hacia la izquierda, negativo. La resultante tiene el mismo efecto que una única fuerza (2 N) tirando hacia la derecha. En las Figuras 1.10e y 1.10f también hay dos fuerzas actuando, pero no lo hacen sobre la misma recta. En estos casos, la resultante puede determinarse mediante un compás o mediante cálculos trigonométricos (véase página 16).

Así, una fuerza es una magnitud de la que necesitamos conocer su *dirección* y su *módulo* (tamaño).

Las magnitudes que poseen tanto módulo como dirección se denominan **vectoriales**.

Todo lo que medimos posee un módulo y una unidad. Por ejemplo, podemos medir la masa de un libro, que resulta ser 640 g. Aquí, 640 g es el módulo de la medida, pero la masa no tiene dirección.

Las magnitudes que solo poseen módulo, pero no así dirección, se denominan **escalares.**

La mayoría de las magnitudes son escalares. Algunos ejemplos habituales de magnitudes escalares utilizados en física son la masa, la longitud, el tiempo, la energía, la temperatura y la velocidad. Sin embargo, cuando utilizamos las magnitudes siguientes necesitamos conocer tanto el módulo como la dirección sobre la que están actuando, ya que son *magnitudes vectoriales:*

- desplazamiento (distancia en una dirección dada)
- velocidad (rapidez en una dirección dada)
- fuerza (incluyendo el peso)
- aceleración
- momento e impulso
- intensidad del campo (gravitatorio, eléctrico y magnético).

Los símbolos de las magnitudes vectoriales se suelen representar con letra cursiva y en negrita (por ejemplo $\boldsymbol{F}$). Para las magnitudes escalares se suele emplear la cursiva normal (por ejemplo, m).

En los diagramas, todos los vectores se representan con flechas que apuntan hacia el sentido correcto y con una longitud que es proporcional al módulo del vector (como en las fuerzas de la Figura 1.11). A lo largo de este curso los cálculos vectoriales se limitarán a dos dimensiones.

La importancia de los vectores puede ilustrarse mediante la diferencia entre distancia y desplazamiento. El piloto de un vuelo internacional que conecta Estambul con El Cairo, por poner un ejemplo, necesita saber algo más aparte de que ambas ciudades están separadas por 1 234 km. El piloto necesita conocer el «rumbo» (la dirección) de vuelo para llegar al destino.

Análogamente, en estudios topográficos o de agrimensura deben medirse *tanto* la distancia *como* la dirección de una determinada posición respecto a un punto de referencia.

Combinación y descomposición de vectores

Suma de vectores para determinar el vector resultante

Cuando sumamos dos o más magnitudes escalares (por ejemplo, una masa de 25 g con otra de 50 g), hay una única respuesta posible (resultante): 75 g. Pero, cuando sumamos cantidades vectoriales, existe una gama de resultantes posibles, dependiendo de las direcciones con las que se trabaje.

Para determinar la resultante de las dos fuerzas que se representan en las Figuras 1.10e o 1.10f existen dos métodos posibles: el dibujo (método gráfico) o la trigonometría (método trigonométrico).

Método gráfico

Las dos fuerzas de la Figura 1.10f se dibujan cuidadosamente a escala (por ejemplo, 1 cm representando 1 N) respetando el ángulo que forman (140°). A continuación se completa el paralelogramo. La resultante es la diagonal del paralelogramo (véase Figura 1.11). Recordemos que debemos determinar tanto el módulo como la dirección a partir del diagrama. En este ejemplo, la fuerza resultante se representa mediante la línea roja. Su longitud es de 3,4 cm (es decir, 3,4 N) y forma un ángulo de 36° respecto a la fuerza de 5,0 N.

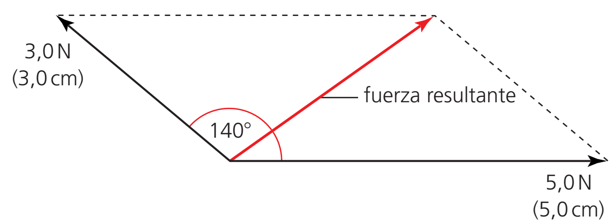


Figura 1.11 *Uso del paralelogramo para la determinación de la fuerza resultante*

Método trigonométrico

Las fuerzas de la Figura 1.11 forman un ángulo recto. Esto significa que el paralelogramo obtenido será un rectángulo (Figura 1.12) y el módulo de la resultante de las fuerzas, F, se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras:

$$F^2 = 3{,}0^2 + 5{,}0^2 = 3$$

$$F = 5{,}8\ \text{N}$$

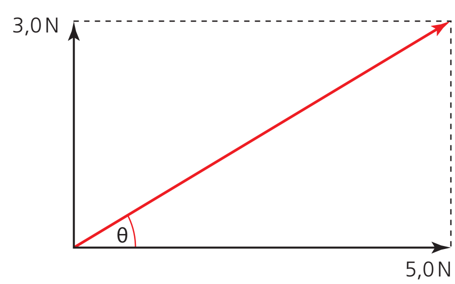


Figura 1.12

La dirección de esta fuerza puede determinarse mediante el uso de la trigonometría:

$\operatorname{tg} \theta = \dfrac{3{,}0}{5{,}0}$ (θ es el ángulo que forma la resultante con la dirección de la fuerza de 5,0 N)

$\theta = 31°$

En este curso *no* se espera que determines las soluciones trigonométricas si el paralelogramo no es un rectángulo.

Resta de vectores para determinar su diferencia

Cuando deseamos conocer cuánto ha cambiado una magnitud vectorial, puede que tengamos que calcular la diferencia entre dos vectores. Dicha diferencia se determina *restando* un vector del otro. Un vector negativo posee el mismo módulo y dirección que el vector positivo, pero sentido contrario. Así, cuando restamos los vectores $\boldsymbol{P}$ y $\boldsymbol{Q}$ podemos escribir:

$$\boldsymbol{P} - \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{P} + (-\boldsymbol{Q})$$

En la Figura 1.13 se representa una resta de vectores mediante el método gráfico. La línea roja representa la diferencia cuando un determinado vector cambia en magnitud y dirección de ***P*** a ***Q***.

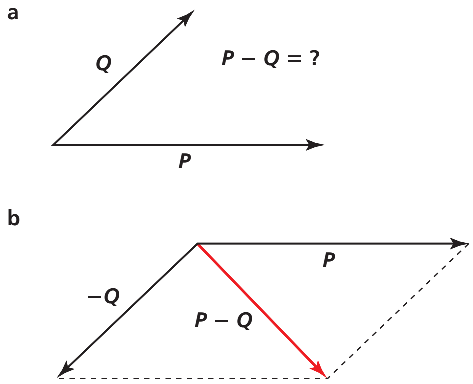


Figura 1.13 *Si deseamos calcular la diferencia entre **P** y **Q** (diagrama **a**) sumamos **P** y – **Q** (diagrama **b**)*

Multiplicación y división de vectores por escalares

Si un vector ***P*** se multiplica o se divide por un número escalar *k*, los vectores resultantes son simplemente *k**P*** o ***P***/*k*. Si *k* es negativo, el vector resultante se convierte en negativo, lo que significa que cambia de sentido respecto al vector ***P***.

Descomposición de un vector en dos componentes

Hemos visto anteriormente que dos vectores individuales pueden combinarse matemáticamente para encontrar un solo vector resultante que tenga el mismo efecto que los dos vectores considerados por separado. Este proceso puede hacerse al revés: puede considerarse que un vector individual tiene el mismo efecto que dos vectores por separado. A este proceso se le denomina **descomposición** de un vector en sus dos **componentes**. Descomponer puede ser muy útil porque, si las dos componentes se escogen de modo que sean perpendiculares entre sí (normalmente horizontal y vertical), serán independientes una de la otra y se podrán considerar totalmente por separado.

En la Figura 1.14 se representa un vector individual, ***A***, con la horizontal. Si queremos conocer el efecto de este vector sobre las dos direcciones, horizontal y vertical, podemos descomponerlo en sus dos componentes:

$$\cos\theta = \frac{\boldsymbol{A}_H}{\boldsymbol{A}}$$

y

$$\text{sen}\ \theta = \frac{\boldsymbol{A}_V}{\boldsymbol{A}}$$

de forma que

$$\boldsymbol{A}_H = \boldsymbol{A}\cos\theta$$

y

$$\boldsymbol{A}_V = \boldsymbol{A}\,\text{sen}\,\theta$$

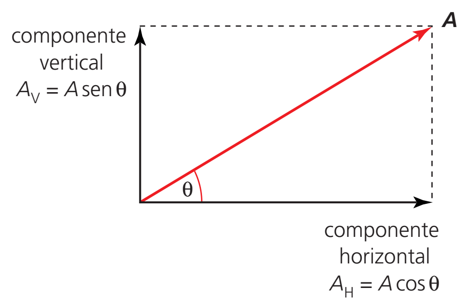


Figura 1.14 *Descomposición de un vector en dos componentes perpendiculares*

Ambas ecuaciones y el diagrama asociado figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

6 En la Figura 1.15 se representa una caja situada sobre una superficie en pendiente (un «plano inclinado»). La caja pesa 585 N. ¿Cuáles son las componentes del peso:

a en la dirección de la pendiente?
b perpendicularmente a la pendiente?

a componente en la dirección de la pendiente = $585 \operatorname{sen} 23° = 230\,N$

b componente perpendicular a la pendiente = $585 \cos 23° = 540\,N$

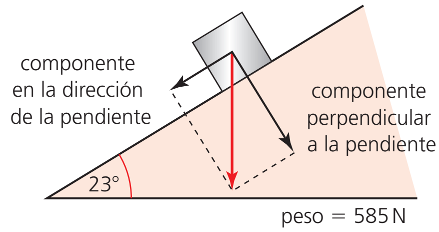


Figura 1.15

Enlace con la teoría del conocimiento

Física y matemáticas

¿Cuál es la naturaleza de la certidumbre y la demostración en matemáticas?

La ciencia se basa principalmente en el conocimiento obtenido a partir de la experimentación y la medida, aunque en este capítulo ha quedado claro que hablar de exactitud y certidumbre absolutas en la recogida de datos no es posible. Por el contrario, las teorías y métodos esenciales de las matemáticas puras lidian con la certidumbre. Las matemáticas son una herramienta indispensable para la física por muchas razones, entre las cuales figuran la concisión, la falta de ambigüedad y la utilidad para el establecimiento de predicciones. Los principios físicos más importantes pueden resumirse en forma matemática.

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Se ha medido en tres ocasiones el diámetro de un alambre con un instrumento que tiene un error de compensación de cero. Los resultados han sido respectivamente: 1,24 mm; 1,26 mm y 1,25 mm. El valor medio de estos resultados es:

A. exacto pero no preciso
B. preciso pero no exacto
C. exacto y preciso
D. inexacto e impreciso.

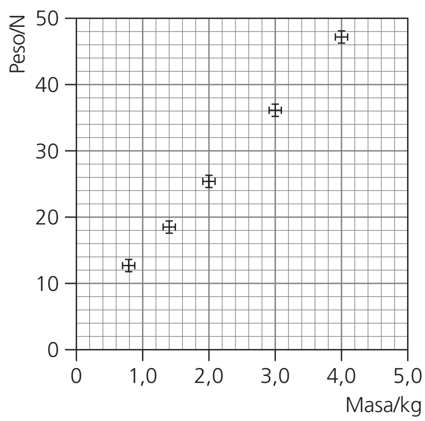
2 El espesor aproximado de una hoja de un libro de texto es:

A. 0,02 mm
B. 0,08 mm
C. 0,30 mm
D. 1,00 mm.

3 ¿Cuál de las respuestas siguientes representa la conversión aproximada de un periodo de tiempo de 1 mes a las unidades del SI?

A. 0,08 años
B. 30 días
C. 3×10^6 segundos
D. todas las anteriores.

4 Se miden de forma independiente las masas y los pesos de diferentes objetos. En el gráfico siguiente se representa el peso en función de la masa y se incluyen las barras de error.



Los resultados experimentales sugieren que:

A. las medidas muestran un error sistemático significativo y un error aleatorio pequeño
B. las medidas muestran un error aleatorio y un error sistemático pequeño
C. las medidas son precisas pero no exactas
D. el peso de un objeto es proporcional a su masa.

5 ¿Cuál de las unidades siguientes es una unidad del SI?

A. newton
B. culombio
C. amperio
D. joule

6 Se mide la distancia recorrida por un coche en un determinado periodo de tiempo con una incertidumbre del 6%. Si la incertidumbre en la medida del tiempo es del 2%, ¿cuál es la incertidumbre en el cálculo de la velocidad del coche?

A. 3%
B. 4%
C. 8%
D. 12%

7 ¿Cuál de las magnitudes siguientes es un escalar?

A. presión
B. aceleración
C. intensidad del campo gravitatorio
D. desplazamiento.

8 Se mide la intensidad de corriente de un reóstato y resulta ser 2,00 A ± 0,02A. ¿Cuál de las posibilidades siguientes identifica correctamente la incertidumbre absoluta y la incertidumbre en porcentaje de la corriente?

	Incertidumbre absoluta	Incertidumbre en porcentaje
A	± 0,02 A	± 1%
B	± 0,01 A	± 0,5%
C	± 0,02 A	± 0,01%
D	± 0,01 A	± 0,005%

9 ¿Cuál de los valores siguientes representa una estimación razonable de la magnitud de la masa de un avión de gran tamaño?

A. 10^3 kg
B. 10^5 kg
C. 10^7 kg
D. 10^9 kg

10 ¿Cuál de las expresiones siguientes equivale a la unidad de la fuerza en el SI (el newton)?

A. kg m s^{-1}
B. kg m^2 s^{-1}
C. kg m s^{-2}
D. kg m^2 s^2