

Notas de Física I

Edwin Loaiza

Física Fundamental I (106001C)

Física I+Laboratorio (106012C)

Física (106094M)

2026-09-09

*Extracto para lectura y anotación — Capítulo 1: Conceptos Fundamentales,
Sección 1.2: Medición, SI, Análisis Dimensional y Escalas*

CAPÍTULO 1

Conceptos Fundamentales

1.2. Medición: SI, Análisis Dimensional y Escalas

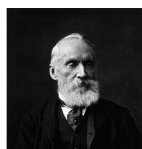


Foto: Wikipedia CC-BY-SA

“Cuando se puede medir aquello de lo que se habla y se puede expresar en números, se conoce algo del tema; pero cuando no se puede medir, cuando no se puede expresar en números, el conocimiento es pobre e insatisfactorio. Si no lo puedes medir, no lo puedes mejorar.”

— William Thomson, Barón Kelvin (1824–1907)

Objetivos de Aprendizaje

Al terminar esta sección, el estudiante será capaz de:

1. **Definir** las siete unidades base del SI y explicar cómo evolucionaron desde prototipos a constantes fundamentales. (Recordar/Comprender; RA1-ind. 2.1)
2. **Explicar** la diferencia entre masa, inercia y peso usando ecuaciones fundamentales. (Comprender; RA1-ind. 2.1, CG1)
3. **Derivar** unidades derivadas (velocidad, aceleración, fuerza, torque, momentum, energía) desde ecuaciones fundamentales. (Aplicar; RA1-ind. 2.1, CG2)
4. **Analizar** el concepto de dimensión; verificar consistencia dimensional de ecuaciones y predecir relaciones funcionales. (Analizar; RA1-ind. 2.1, CG1)
5. **Evaluar** la importancia del análisis dimensional como herramienta de validación de ecuaciones físicas. (Evaluar; RA1-ind. 2.1, CG1) [10–20% alto orden de Bloom]

Trazabilidad FFI-106001C: RA1 (Indicador 2.1: Examina los aspectos básicos de la medición y cómo reportar adecuadamente una medida), CG2, CG1. Equivalente FIL-106012C: I3-1.

Alineamiento Física-106094M: Hereda I3-1 (vía FIL). Medición cuantitativa, unidades derivadas, análisis dimensional. Competencias: rigor técnico, pensamiento lógico.

Activación: El Problema de Medir

Imagina ser un comerciante medieval. Compras “dos brazadas” de tela, pero la distancia de mis brazos es distinta de la tuya. Cada región europea tenía sus propias unidades: toises en Francia, pies en Inglaterra, varas en España. El comercio era caos.

En 1793, la Revolución Francesa cambió todo. Se decidió: las medidas deben basarse en la naturaleza, no en prototipos. Así nació el metro: la diezmillonésima parte de la distancia del Polo Norte al Ecuador.

Pero medir esa distancia era increíblemente difícil. Años después, alguien propuso: “Fabricamos una barra de acero y decimos que LO QUE HAY ENTRE DOS MARCAS es ‘un metro’”. Así nacieron el Prototipo Internacional del Metro y el Prototipo Internacional del Kilogramo, guardados en París bajo máxima seguridad.

Durante 150 años, la definición del kilogramo fue: **la masa de esa pequeña pesa de platino-iridio en una bóveda blindada en Sèvres, Francia.**

Toda la civilización moderna — balanzas, básculas, calibraciones de aviación — dependía de que esa pesa no perdiera ni un átomo. Pero ocurrió: incluso el platino pierde masa lentamente.

En 2019, los científicos decidieron: “Vamos a definir el kilogramo no por una pesa, sino por una **constante fundamental que nunca cambia**”.¹

Esta sección explora cómo medimos, cómo se construyen todas las unidades derivadas, y cómo el análisis dimensional valida cualquier ecuación física.

Desarrollo Conceptual 0: Conceptos Preliminares

Antes de entender sistemas de unidades, necesitamos aclarar qué estamos midiendo y cómo.

¿Qué es una magnitud física?

Una **magnitud física** es una propiedad medible de un objeto, sistema o fenómeno natural. Es una característica que puede ser cuantificada y comparada. **Ejemplos:** longitud, masa, tiempo, temperatura, velocidad, fuerza, energía, densidad.

No todas las propiedades son magnitudes: el color o la belleza son propiedades, pero no son magnitudes porque no se pueden medir directamente en términos numéricos

¹QuantumFracture. “La Redefinición de las Unidades del Sistema Internacional EXPLICADO.” https://youtu.be/TDpZa_N8h4w

universales.

¿Qué es una cantidad física?

Una **cantidad física** es la medida de una magnitud en un sistema particular. Es el resultado numérico que obtienes cuando comparas la magnitud contra una unidad de referencia establecida.

Relación:

$$\text{Cantidad Física} = \text{Magnitud} \times \text{Unidad} \quad (1.1)$$

Ejemplo:

- Magnitud: longitud
- Unidad de referencia: metro (m)
- Cantidad física: 5.0 m (se lee: cinco metros)

La cantidad física es siempre un número acompañado de una unidad. El número 5 sin unidad es incompleto: ¿5 qué? ¿Metros? ¿Kilómetros? ¿Pies?

¿Qué es medir?

Medir es el proceso de comparar una propiedad o característica de un objeto, fenómeno o sistema (la magnitud física) con una unidad de referencia previamente establecida, con el propósito de expresar esa propiedad en términos numéricos.

Componentes del proceso de medición:

- **Magnitud física:** la propiedad que se mide (p. ej., distancia)
- **Unidad de medida:** el patrón de referencia universal (p. ej., metro)
- **Instrumento de medición:** herramienta calibrada (p. ej., cinta métrica, regla)
- **Resultado:** cantidad física = número + unidad (p. ej., 2.5 m)

Sin unidad de medida, la medición no tiene sentido global. Si digo “la mesa mide 1.5”, ¿1.5 qué? Para que otros científicos en otro país entiendan exactamente a qué me refiero, debo especificar: “la mesa mide 1.5 metros”.

Magnitudes fundamentales vs. magnitudes derivadas

Las magnitudes se clasifican según su independencia:

- **Magnitudes fundamentales:** no se pueden expresar en términos de otras magnitudes más simples. Son las magnitudes base sobre las que se construye todo. En el SI, hay siete: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de sustancia, intensidad luminosa.

- **Magnitudes derivadas:** se expresan como combinaciones de magnitudes fundamentales. Por ejemplo, velocidad es distancia $\div$ tiempo, fuerza es masa $\times$ aceleración, densidad es masa $\div$ volumen. No son menos importantes; simplemente se derivan de las fundamentales.

Magnitudes extensivas vs. magnitudes intensivas

Las magnitudes también se clasifican según cómo cambian cuando cambia la cantidad de materia:

- **Magnitudes extensivas:** dependen de la cantidad de materia. Si doblas la cantidad de sustancia, la magnitud se dobla. **Ejemplos:** masa, volumen, energía, momentum. Si tienes 1 kg de agua, su masa es 1 kg; si tienes 2 kg de agua, su masa es 2 kg.
- **Magnitudes intensivas:** no dependen de la cantidad de materia. Si doblas la cantidad de sustancia, la magnitud permanece igual. **Ejemplos:** temperatura, densidad, presión, punto de ebullición. Si tienes 1 litro de agua a 25°C y lo mezclas con otro litro a 25°C, la temperatura sigue siendo 25°C (si los dos estaban en equilibrio térmico).

Esta distinción es importante para la laboratorio: cuando mides propiedades de materiales, debes saber si estás caracterizando una propiedad global (extensiva) o una propiedad del material independientemente de su cantidad (intensiva).

Desarrollo Conceptual I: ¿Qué es el SI? — Una breve historia

El **Sistema Internacional de Unidades** (en francés *Système international d'unités*), abreviado **SI**², es el sistema de medición más utilizado a nivel mundial. Nació en 1960 como evolución del sistema métrico decimal (1793), con el objetivo de crear un estándar universal que facilitara la comunicación científica y comercial. Su evolución desde 1799 hasta hoy refleja cómo la ciencia ha progresado desde definiciones basadas en prototipos hacia definiciones basadas en constantes fundamentales (véase Figura 1.1).

El SI es mantenido y custodiado por una red internacional de **institutos nacionales de metrología** coordinados por el **BIPM** (Bureau International des Poids et Mesures, en París). La **metrología** — la ciencia de la medición y la determinación de constantes fundamentales — es una disciplina rigurosa que combina física teórica, ingeniería de precisión y análisis estadístico para establecer y verificar los estándares que toda la civilización necesita. La metrología **no es solo de interés para científicos**: industrias de todo tipo — farmacéutica, alimentaria, automotriz, aeronáutica, semiconductores, energía, telecomunicaciones — dependen críticamente de mediciones precisas

²BIPM. “The International System of Units (SI).”

y trazables para **estandarizar procesos, garantizar calidad y asegurar la seguridad de productos**. Un medicamento de 500 mg debe contener exactamente 500 mg de principio activo; un componente aeronáutico de 1 mm no puede variar; un semiconductor debe mantener tolerancias de nanómetros. Todo esto exige que cada balanza, cada calibrador, cada instrumento de medición en el mundo sea trazable al estándar internacional único.

Estos institutos — incluyendo NIST (Estados Unidos), PTB (Alemania), NPL (Reino Unido), NMIJ (Japón), INRIM (Italia), NRC (Canadá), y decenas más en todo el mundo — son responsables de **realizar, mantener y diseminar las definiciones** de las unidades en sus respectivos territorios. Realizan experimentos de precisión extraordinaria (balanzas de Kibble, métodos de conteo atómico, interferometría óptica) para verificar que constantes fundamentales como la de Planck mantienen sus valores invariables — por ejemplo, $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ — y certifican que los estándares nacionales de masa, longitud, tiempo, temperatura, etc., sean trazables a las definiciones internacionales. Sin esta red global de laboratorios, la uniformidad del SI sería imposible, y el comercio internacional, la seguridad industrial y la innovación tecnológica se desmoronarían.

El SI establece un conjunto **coherente y universal** de siete unidades base: **longitud** (metro), **masa** (kilogramo), **tiempo** (segundo), **corriente eléctrica** (amperio), **temperatura** (kelvin), **cantidad de sustancia** (mol) e **intensidad luminosa** (candela). A partir de estas unidades base, se derivan todas las demás (velocidad, fuerza, energía, etc.).³

Magnitud base	Símbolo típico	Unidad base	Símbolo
Tiempo	t	segundo	s
Longitud	$l, x, r, \text{ etc.}$	metro	m
Masa	m	kilogramo	kg
Corriente eléctrica	I, i	amperio	A
Temperatura termodinámica	T	kelvin	K
Cantidad de sustancia	n	mol	mol
Intensidad luminosa	I_v	candela	cd

Cuadro 1.1: Las siete unidades base del SI y la magnitud que cada una mide. Fuente: BIPM, “SI base units.”

Un cambio crucial ocurrió en 2019: las unidades base dejaron de definirse por prototipos físicos (como el Prototipo Internacional del Kilogramo) y pasaron a definirse por **constantes fundamentales de la naturaleza** (velocidad de la luz, constante de Planck, constante de Boltzmann, carga elemental, número de Avogadro, etc.). Esto garantiza que cualquier laboratorio en el mundo, con el equipamiento correcto, pueda reproducir estas definiciones con precisión absoluta.

³BIPM. “SI base units.”

El SI es el **lenguaje común** de la ciencia, tecnología e industria. Elimina ambigüedades, permite reproducibilidad universal y es indispensable para que descubrimientos e innovaciones puedan verificarse en cualquier lugar del planeta.

Timeline: Evolución del SI (1799–2019)

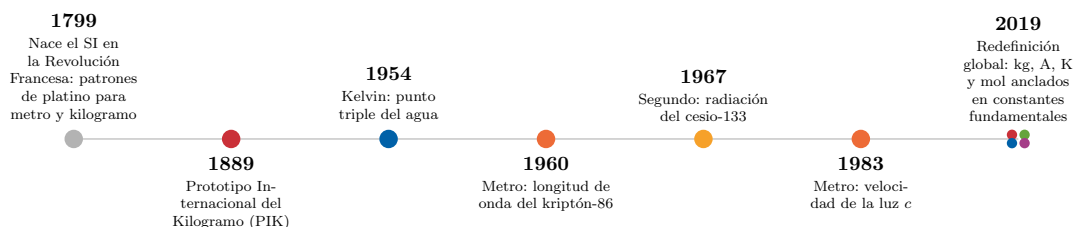


Figura 1.1: Hitos históricos en la evolución del Sistema Internacional de Unidades. Color de cada hito = color de la unidad afectada en las insignias del BIPM (2019: cuatro unidades a la vez).

La Historia del Kilogramo: Del Prototipo a la Máquina de Kibble

Imagina que toda la civilización moderna — desde básculas de farmacia hasta calibraciones de aviación, desde balanzas industriales hasta transacciones comerciales internacionales — depende de un único objeto físico guardado en una bóveda climatizada en París. Este es el drama que ha vivido la metrología durante casi 130 años.

En 1889, la Conferencia General de Pesos y Medidas decidió que la definición del kilogramo sería la masa de un cilindro específico de platino-iridio: el **Prototipo Internacional del Kilogramo (PIK)**. No era una convención basada en la naturaleza (como el metro, originalmente definido como una fracción del meridiano terrestre), sino la decisión de hacer un objeto físico el estándar universal. Cada país recibió una “copia certificada” del PIK, y todas las demás básculas del mundo se calibraban comparándose, directa o indirectamente, contra él (véase Figura 1.3a).⁴

Pero había un problema fundamental: **un prototipo físico nunca es perfectamente estable**. El PIK perdió microscópicas cantidades de masa. Sus copias nacionales divergían entre sí. ¿Cuál era el “verdadero” kilogramo? La gráfica de la Figura 1.3b muestra la cruda realidad: en 103 años (1889–1992), los prototipos nacionales derivaban lentamente, ganando o perdiendo decenas de microgramos respecto al PIK. Sin datos históricos para determinar cuál fue más estable, la única conclusión es que **el estándar mismo estaba cambiando lentamente**.

En la época de 1889–1920, esas variaciones pequeñas de microgramos eran insignificantes para la tecnología disponible. Pero el mundo cambió. Hoy, con microtecnología, nanotecnología, farmacología de precisión y química analítica industrial, **procesos críticos dependen de medidas en microgramos**. Una derivación lenta del

⁴Folger, T. “El nuevo kilogramo”. *Investigación y Ciencia*, abril de 2017, p. 64.

estándar ya no es tolerable: necesitamos que la definición misma del kilogramo sea inmutable, anclada no en un objeto que envejece, sino en una constante de la naturaleza.

La solución vino de la física cuántica. En 1975, el físico británico Brian Kibble inventó un aparato extraordinario: la **balanza de Kibble** (también llamada balanza de Watt).⁵ La idea revolucionaria es **comparar potencia eléctrica con potencia mecánica**.

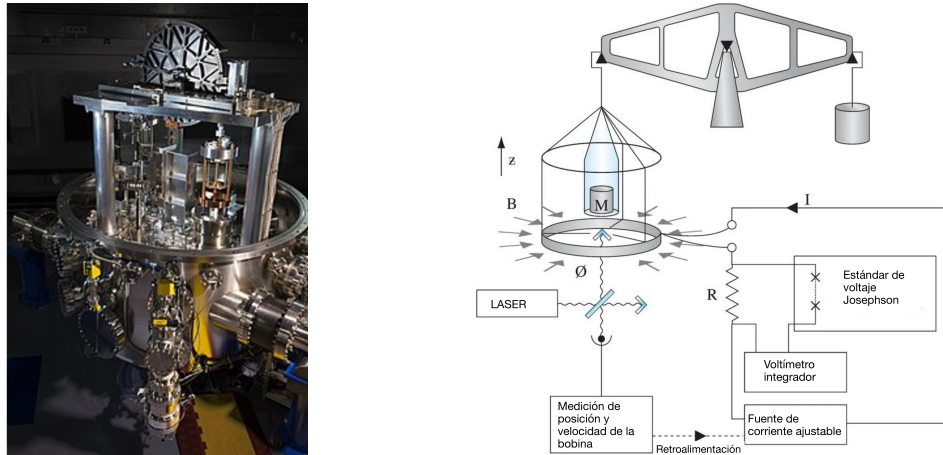


Figura 1.2: **(a)** Balanza de Kibble del NIST (NIST-4), Gaithersburg, Maryland. Contiene un imán superconductor refrigerado con helio líquido y una bobina suspendida que mide masa comparando potencia eléctrica con potencia mecánica. **(b)** Funcionamiento: una pesa en la polea (arriba) ejerce fuerza; la bobina móvil (centro) en un campo magnético experimenta una fuerza al circular corriente por ella. Un láser mide con precisión extraordinaria, y el circuito de control (derecha) ajusta la corriente hasta que ambas potencias se igualan. Este equilibrio vincula la masa a la constante de Planck — una propiedad inmutable de la naturaleza.

El mecanismo es ingenioso: una bobina de alambre en un campo magnético experimenta una fuerza cuando circula corriente por ella.⁶ El truco es encontrar la corriente exacta que equilibra una masa conocida. La genialidad está en que esa corriente está directamente ligada a la **constante de Planck** ($h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ J·s) — una de las constantes más fundamentales del universo, que **nunca cambia**. Al medir contra Planck en lugar de contra un objeto, la definición del kilogramo se vuelve inmutable.

La máquina es extraordinaria: está construida en una sala completamente forrada de cobre (para protegerla de campos magnéticos externos), contiene un imán superconductor refrigerado con helio líquido, y realiza **algunas de las mediciones más complejas de la ciencia moderna**.⁷ Laboratorios metrológicos nacionales de cinco países coordinan sus esfuerzos para lograr esta redefinición. Pero lo crucial no es la

⁵QuantumFracture. “¿Cómo Sabemos que un kilo pesa un kilo? 1. El kilogramo.” <https://youtu.be/qKEcK9ABpS8>

⁶Robinson, I. & Schlamminger, S. (2016). The watt or Kibble balance. *Metrologia* 53(5), A46.

⁷Folger, T. “El nuevo kilogramo”. *Investigación y Ciencia*, abril de 2017, p. 67.

complejidad técnica, sino la idea revolucionaria detrás: **no estamos midiendo masa contra un objeto, sino contra una constante universal.**

Por lo tanto: en lugar de decir “un kilogramo es la masa del cilindro en Sèvres”, podemos decir con precisión matemática: “un kilogramo es la masa que produce exactamente esta relación con la constante de Planck cuando se equilibra en una balanza de Kibble”.

La ventaja es profunda: no necesitas un objeto en París. Cualquier laboratorio del mundo, con equipamiento suficientemente preciso, puede recrear la definición del kilogramo. La masa ya no se define por algo que envejece, sino por algo que es inmutable: una propiedad fundamental de la naturaleza.

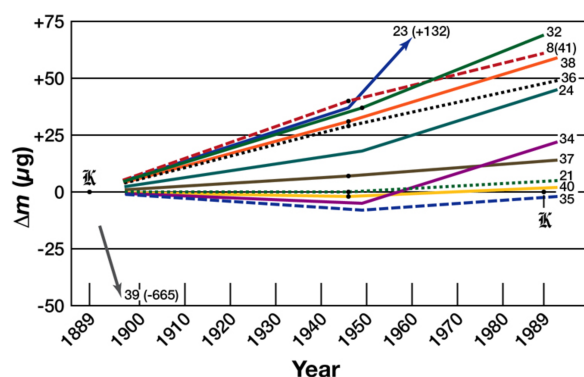


Figura 1.3: (a) Prototipo Internacional del Kilogramo (Sèvres, Francia): cilindro de platino-iridio que definía la masa durante 130 años. (b) Gráfico de derivación relativa de masa de prototipos nacionales (1889–1992, Girard 1994). Cada línea representa un país: verificaciones cada 40 años revelaron que *todos los prototipos derivaban lentamente*. Ejemplos: K39 (Japón 1894 → Corea 1958) perdió 665 μg ; K23 (Finlandia 1890) mostró desviaciones similares; K8(41) (numeración accidental). Conclusión: el estándar mismo cambiaba — imposible usar un objeto físico como definición permanente.

¿Cómo se resuelve un problema de estandarización? La historia del kilogramo ilustra el proceso científico real: observación rigurosa, debate internacional, y una decisión basada en evidencia.

Durante casi 130 años, nadie supo con certeza si el kilogramo se estaba degradando. Pero cada 40 años, los metrológicos de diferentes países transportaban sus copias a Sèvres para una comparación delicada: pesaban el PIK contra cada prototipo nacional en balanzas de precisión extraordinaria, en condiciones controladas. G. Girard, del Bureau Internacional de Pesas y Medidas, compiló estos datos en su verificación de 1994. La conclusión fue incontestable: **todos los prototipos derivaban**. No era que un país fuera negligente o que el transporte dañara las muestras — era el fenómeno físico mismo: átomos de platino-iridio abandonaban las superficies lentamente, de formas impredecibles.

Esto planteó una pregunta fundamental: **¿cuál era el verdadero kilogramo?** Si el PIK define el kilogramo, pero el PIK cambia, entonces la definición misma se degrada.

La solución no podía ser comprar una mejor bóveda — los objetos siempre cambian. Los científicos tuvieron que hacer una opción radical: abandonar los prototipos por completo.

En 2018, tras años de desarrollo de la balanza de Kibble y otros aparatos, la 26.^a Conferencia General de Pesas y Medidas votó por unanimidad redefinir no solo el kilogramo, sino **todas las siete unidades base simultáneamente**. Fue la reforma más grande en metrología internacional desde 1875. En 2019, el kilogramo ya no fue «la masa del objeto en París». Ahora es «la masa que produce exactamente esta relación con la constante de Planck cuando se mide en una balanza de Kibble». El kilogramo se ancló no en un objeto que envejece, sino en una constante de la naturaleza — algo que nunca cambia.

La lección pedagógica: la estandarización científica no es una decisión arbitraria. Es un proceso empírico, colectivo, riguroso. Comienza con evidencia (los datos de Girard). Continúa con tecnología (la balanza de Kibble). Y termina con una decisión internacional democrática, basada en lo que la naturaleza nos permite conocer con precisión.

¿Por qué debería importarme el kilogramo?

Pausa. Antes de continuar, reflexiona: **¿De verdad afecta mi vida que el kilogramo sea una constante en lugar de un prototipo físico?**

Probablemente nunca has visto un kilogramo estándar. Nunca has viajado a Sèvres. Entonces, ¿por qué dedicó la comunidad científica mundial años de investigación, miles de millones en equipamiento, y una votación unánime a este problema?

La respuesta está en lugares donde confías ciegamente en la medición de masa:

- **La farmacéutica:** cuando tomas un analgésico de 500 mg, ese número proviene de una cadena de calibraciones que remonta, eventualmente, a la definición del kilogramo. Si el estándar derivaba lentamente, las máquinas que producen medicamentos también derivaban. Una diferencia de 1 % en la dosis de ciertos fármacos es la diferencia entre «curación» y «intoxicación».
- **El comercio:** cuando compras 1 kg de harina en el supermercado, confías en que es realmente 1 kg. Si el kilogramo estándar cambiaba, entonces cada país, cada industria, se daría cuenta décadas después. Los tratos comerciales internacionales dependen de que un kg en Colombia sea lo mismo que un kg en Alemania.
- **La reproducibilidad científica:** cuando un físico en Japón replica tu experimento y afirma «usé 1 kg de masa», ambos deben significar exactamente lo mismo. Sin estandarización, los resultados no son comparables. La ciencia moderna se desmorona sin eso.

El dramatismo de Veritasium es legítimo: **la muerte del kilogramo fue una emergencia silenciosa**. No hubo colapso visible — las transacciones continuaron, los medicamentos funcionaron — pero bajo tierra, el suelo se movía. El estándar que sostenía siglos de confianza estaba degradándose.

Y eso es lo que aprenderás en esta sección: no solo qué son las unidades, sino por qué importan. Por qué un científico, un farmacéutico, un comerciante de café, todos descansamos en definiciones precisas que parecen tediosas hasta que fallan.

Desarrollo Conceptual II: Las Siete Unidades Base

La redefinición de 2019: una reforma global

La historia del kilogramo no fue aislada. En 2018, la 26^a Conferencia General de Pesas y Medidas votó por unanimidad no solo redefinir el kilogramo, sino **todas las siete unidades base simultáneamente**. La pregunta es: ¿por qué todas?

La respuesta: **todas las unidades base comparten ahora la misma estrategia — definirse mediante constantes fundamentales de la naturaleza, no prototipos físicos**. Esto significa que el metro, el segundo, el amperio, el kelvin, el mol y la candela ya no dependen de objetos en laboratorios que envejecen — dependen de propiedades inmutables del universo.

Para Colombia, esto tuvo un significado concreto. El Prototipo Número 108, custodiado por el Instituto Nacional de Metrología (INM) en Bogotá⁸, pasó de ser la referencia oficial del país a ser una reliquia histórica. Ahora, el kilogramo que usa el INM es el mismo que usa cualquier laboratorio del mundo: definido por la constante de Planck, no por un cilindro de platino-iridio.

Las constantes que definen el SI

Entonces, ¿cuáles son esas constantes que ahora sostienen el sistema de medidas global? La respuesta no es simple — seis de las siete unidades base se anclan en constantes fundamentales de la naturaleza. El kilogramo en la constante de Planck. El metro en la velocidad de la luz. El segundo en la frecuencia del cesio-133. Y así sucesivamente. Pero hay una excepción pedagógica importante: **el mol no se ancla en una constante física universal, sino en una cantidad convencional** — el número de Avogadro, que es un número puro ($6.02214076 \times 10^{23}$) elegido por acuerdo internacional. Técnica-mente, esto hace que el mol sea diferente de las otras seis unidades: mientras que estas últimas expresan propiedades inmutables de la naturaleza, el mol expresa **un conteo convencional de partículas**. Sin embargo, su efecto pedagógico es idéntico: garantiza que cualquier laboratorio en el mundo, midiendo la misma cantidad de sustancia, obtenga exactamente el mismo resultado.

⁸Instituto Nacional de Metrología de Colombia. Ficha Técnica: “Introducción a la Metrología de Masa.” Disponible en servicios.inm.gov.co. Véase también CENAM (2016) en cenam.mx/sm2016.

Observa esta figura para ver el panorama completo. Aunque la primera vez parezca compleja, note que cada definición (sea constante fundamental o convención) está conectada a una magnitud física que ya conoces:

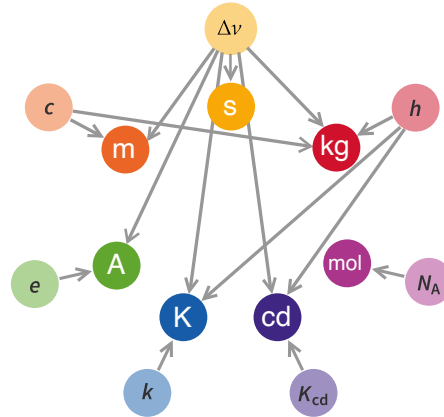


Figura 1.4: Las siete unidades base del SI (2019) y sus constantes definidoras. Cada unidad ancla en una constante fundamental: velocidad de la luz (c), constante de Planck (h), frecuencia del cesio-133, carga elemental (e), constante de Boltzmann (k_B), constante de Avogadro (N_A), eficacia luminosa (candela). Ninguna es un objeto físico; todas son propiedades de la naturaleza que puede verificar cualquier laboratorio del mundo.

Estructura de este desarrollo

Lo que sigue es la descripción de cada una de las siete unidades. Para cada una, verás el mismo patrón que vimos con el kilogramo: primero, una definición histórica basada en objetos o fenómenos accesibles; luego, una redefinición moderna anclada en una constante fundamental. Este patrón te mostrará cómo funciona la estandarización científica en la práctica — no es un evento único, sino una estrategia que se repite cuando la precisión lo exige.

1. Masa (kilogramo, kg)



Definición: Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck, h , en $6,62607015 \times 10^{-34}$, cuando se expresa en la unidad J·s (kilogramo·metro²/segundo). De esto se deduce que el kilogramo es la masa que corresponde a esa constante de Planck cuando se mide en una balanza de Kibble — la máquina que compara potencia eléctrica con potencia mecánica, descrita en detalle en la Figura 1.2.

El concepto profundo: Masa es inercia. No es «cuánto pesa»; es **qué tan difícil es poner en movimiento o detener** un objeto. Es una propiedad intrínseca

de la materia. La inercia es aditiva: dos objetos de masa m juntos tienen masa $2m$.

Pero hay algo más profundo. Einstein demostró algo sorprendente: la masa inercial (qué tan difícil de mover) es **exactamente igual** a la masa gravitacional (cuánto te atrae la gravedad). Esto no era obvio — podrían haber sido diferentes. Esa igualdad es el corazón de la Teoría General de la Relatividad. La gravedad no es una fuerza que « tira »; es la curvatura del espacio-tiempo causada por la **masa**. Una masa de 1 kilogramo curva el universo de la misma forma aquí en la Tierra que en cualquier otro lugar.

Masa vs. Peso (una confusión común): $\text{Peso} = mg$ donde $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$ (aceleración gravitacional). Son conceptos distintos. En la Luna, $g \approx 1,6 \text{ m/s}^2$, así que la misma masa pesa aproximadamente 6 veces menos. Pero su inercia — qué tan difícil de mover — es idéntica en cualquier lugar.

Nota lingüística importante: en la vida cotidiana, confundimos constantemente masa con peso. Cuando alguien pregunta « ¿cuál es tu peso? », la mayoría responde « 70 kilogramos » — pero está dando su **masa**, no su peso. Técnicamente, el peso es una **fuerza** (la atracción gravitacional), y debería expresarse en **newtons** (N), no kilogramos. El newton es una **unidad derivada** (no una unidad base como el kilogramo) que se construye a partir de las siete unidades base. Esta confusión es tan común que incluso aparece en conversaciones científicas. Más adelante en este curso profundizaremos en las unidades derivadas y estableceremos la distinción entre masa (kilogramo, unidad base) y peso (newton, unidad derivada).⁹

Impacto en medición y producción: La precisión del kilogramo sostiene industrias enteras. En farmacéutica, un comprimido de 500 mg debe contener exactamente 500 mg de principio activo — variaciones de 1 % pueden ser la diferencia entre cura y toxicidad.

En agricultura, fertilizantes declarados como « 100 kg de NPK » son pesados en balanzas calibradas contra el estándar nacional; un error de 5 kg en 1000 kg de aplicación cambia la química del suelo para una temporada. En electrónica, componentes SMD (surface mount) pesan miligramos — máquinas de pick-and-place rechazan componentes fuera de rango de 1 mg, y eso exige balanzas de precisión trazables al kilogramo.

En alimentos, un envase de yogur etiquetado 150 g debe cumplir; inspectores usan balanzas certificadas para verificar, remontando su calibración al Instituto Nacional de Metrología. En agroforestal, la biomasa de árboles se estima por peso; errores sistemáticos en calibración de balanzas sesgan estudios de captura de carbono.

Sin un kilogramo definido por una constante fundamental (no por una pesa envejeciendo en París), cada país, cada laboratorio, operaría con sus propios estándares — el comercio internacional sería caos.¹⁰

⁹QuantumFracture. “¿Cómo Sabemos que un kilo pesa un kilo?” <https://youtu.be/qKEcK9ABpS8>

¹⁰Folger, T. “El nuevo kilogramo”. *Investigación y Ciencia*, abril de 2017, p. 64.

2. Longitud (metro, m)



Definición técnica: 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 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Definición derivada: Es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299,792,458$ de segundo.

Historia de la medición: El metro es el relato de cómo la ciencia intenta escapar del tedio de los prototipos. Durante la Revolución Francesa (1789), los científicos decidieron crear un sistema de medidas universal: «**para todos los tiempos, para todos los pueblos**».¹¹ En 1793, la Academia de Ciencias —incluyendo a Borda, Lagrange, Laplace y Monge— eligió definir el metro como la **diezmillonésima parte de la distancia del Polo Norte al Ecuador, pasando por París**. Una apelación a la geometría del planeta mismo.

Para medirlo, los astrónomos Pierre Méchain y Jean-Baptiste Delambre pasaron siete años (1792–1799) midiendo la distancia entre Dunkirk (Francia) y Barcelona (España). Después, se fabricó un prototipo de platino. Pero se descubrió que los astrónomos habían cometido un error: el metro resultante era 0.2 milímetros más corto que la verdadera fracción del meridiano. A pesar del error, el mundo adoptó esa definición. La lección: **consistencia importa más que perfección absoluta**.

Algunos científicos propusieron usar el **péndulo de segundos** como unidad de longitud. Parecía perfecto: natural, simple, universal. Pero la naturaleza traicionó la idea: el péndulo cambia de longitud según la gravedad local. En distintos lugares del planeta, un «metro de péndulo» sería diferente. Se rechazó la propuesta.

La evolución del metro es, entonces, una secuencia de **decisiones forzadas por limitaciones prácticas**:

- **(a) Definición por la naturaleza (1793):** Anclar en el meridiano terrestre. El problema: ningún laboratorio podía verificar esa medida sin una expedición geodésica. Era hermosa en teoría, imposible en práctica.
- **(b) Prototipo físico (1889):** Fabricar barras de platino-iridio y distribuir las. Resolvió el problema práctico — cada país podía comparar contra su copia. Pero durante 100 años, descubrimientos en la **espectroscopia de la luz** (estudio de radiación de átomos) mostraron que era posible anclar definiciones en fenómenos ópticos con **mayor precisión** que cualquier prototipo físico. Los prototipos también degradaban lentamente, como vimos con el kilogramo.

¹¹NIST. “Meter: Introduction.” <https://www.nist.gov/si-redefinition/meter>

- **(c) Constante universal (1960 → 2019):** Los avances en óptica permitieron primero usar longitudes de onda de la luz (1960). Luego, en 2019, anclar directamente en la velocidad de la luz en el vacío. Pero aquí viene un detalle fascinante: la velocidad de la luz no fue elegida arbitrariamente. Einstein, en 1905, demostró que c es una constante fundamental del universo — el postulado central de la Relatividad Especial. Los metrológicos de 2019 no inventaron nada nuevo; simplemente reconocieron lo que la física fundamental ya sabía. Ahora, cualquier laboratorio con un láser puede reproducir la definición con precisión extraordinaria. Además, la definición nunca cambia — no envejece.

Las tres figuras te muestran esta evolución en acción — de la naturaleza, al objeto físico, a la constante inmutable:



Figura 1.5: **(a)** Definición natural: meridiano terrestre. Ambiciosa pero impráctica. **(b)** Solución física: prototipo N° 27 (1889). Funciona, pero se degrada. **(c)** Solución moderna: velocidad de la luz. Constante universal, medible en cualquier lugar. — Evolución del metro: de definición geométrica a prototipo físico a constante universal. Este patrón se repite en todas las unidades del SI moderno.

Ventaja: La velocidad de la luz es la misma en cualquier lugar — no porque sea una convención, sino porque Einstein demostró en 1905 que c es una **constante fundamental del universo**, el postulado central de la Teoría Especial de la Relatividad. Así que cuando la ciencia eligió anclar el metro en c , estaba reconociendo una verdad física profunda. Ahora, cualquier laboratorio con láser puede verificar la definición.¹²

Impacto en medición y construcción: Medidas precisas de distancia son vitales en múltiples campos. En construcción, planos de edificios deben cumplir tolerancias de milímetros — un error de 5 mm en 10 m de losa puede acumular a lo largo de pisos y comprometer estabilidad estructural.

En topografía y catastro, mediciones de terrenos usan distanciómetros láser calibrados; un error de 0.1 % en medición de parcelas causa conflictos de propiedad. En agricultura de precisión, sistemas GPS de guiado autónomo requieren exactitud de decímetros; máquinas sembradoras y cosechadoras deben saber su posición con precisión de 10 cm para aplicar insumos o recoger uniformemente.

¹²QuantumFracture. “¿Cómo Sabemos que un metro mide un metro? 2. El metro.” <https://youtu.be/v1-cQyITiZA>

En electrónica, tolerancias en diseño de PCB (circuitos impresos) van hasta 50 micrómetros; fabricantes de semiconductores operan en nanómetros — todos dependen de que el metro defina la misma longitud globalmente. En alimentos, el llenado de envases (botellas, latas) se mide por volumen, que depende de dimensiones precisas de contenedores — la inspección de altura de líquido usa visión artificial calibrada.

Sin un metro estable anclado en una constante universal, cada país tendría su propio «metro», y las especificaciones técnicas internacionales serían imposibles.

3. Tiempo (segundo, s)



Definición técnica: 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 (s^{-1}).

Definición derivada: Es la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio-133.

Una reflexión profunda: «No podemos medir el tiempo directamente. No lo vemos, no lo escuchamos, no lo tocamos. En cambio, medimos **intervalos de tiempo** — duraciones separando dos eventos. Eso es lo que un reloj mide de verdad».¹³ El tiempo es abstracto; solo sus intervalos son concretos.

Origen babilónico: El segundo no es una invención moderna. Hace 4000 años, los sumerios dividieron un círculo en 360 grados. Los babilonios, alrededor de 1000 a.C., dividieron cada grado en 60 minutos de arco, y cada minuto en 60 segundos. **Estos términos nacieron en astronomía, no en relojería.** Solo siglos después, cuando los monjes medievales construyeron relojes mecánicos para marcar horas de oración, trasladaron ese sistema sexagesimal de los cielos al tiempo cotidiano. Así, el número 60 —una herencia babilónica de 4000 años— aún flota en nuestras muñecas y nuestros teléfonos.

Historia del segundo — cuando la Tierra se desaceleró: Históricamente, la definición se basaba en la **rotación de la Tierra**: un segundo era $1/86.400$ del «día solar medio» (promedio de días entre 1750 y 1890). Parecía perfecto — la Tierra era el reloj más grande disponible. Pero había un problema fundamental: **la Tierra se ralentiza.** Su rotación no es uniforme. Si anclábamos el tiempo en la rotación terrestre, entonces la propia definición del segundo cambiaba constantemente.

En 1967, los científicos hicieron un cambio radical: abandonaron la Tierra como reloj y adoptaron el **átomo de cesio-133** como reloj universal. El cesio es extraordinariamente estable — sus átomos emiten microondas exactamente 9.192.631.770 veces

¹³NIST. “Second: Introduction.” <https://www.nist.gov/si-redefinition/second-introduction>

por segundo, idéntico en cualquier lugar del universo. **El cesio es más confiable que la Tierra misma.**

Esto causó un problema práctico: los relojes atómicos y la rotación terrestre se desincronizaban. Para mantenerlos aproximadamente conectados, se creó el **segundo intercalar** — un segundo extra agregado ocasionalmente, para que nuestros relojes (que marcan tiempo atómico) sigan sincronizados con el movimiento del sol (lo que observamos en la vida cotidiana).¹⁴

Evolución del reloj — tres intentos de capturar el tiempo

Así como el metro evolucionó desde definiciones geométricas a constantes universales, el segundo también pasó por tres intentos radicalmente diferentes de estandarización:

1. **(a) Reloj de sol — Definición astronómica (1600s-1960):** Usa la rotación terrestre como mecanismo de medición (1 segundo = $1/86,400$ del día). Preciso inicialmente, pero inestable a largo plazo.
2. **(b) Reloj de cuarzo — Oscilador electrónico (1930s-1967):** Cristales de cuarzo vibran a frecuencia estable cuando se aplica voltaje. Revolucionó relojería: mucho más preciso que el sol. Aún se degrada lentamente (temperatura, envejecimiento). No elegido para SI oficial.
3. **(c) Reloj atómico de cesio (1967-presente):** Átomos de cesio-133 como mecanismo de medición fundamental. Nunca se degrada. Es la solución definitiva (ver "Historia del segundo." arriba para detalles).

Visualmente, esta evolución se ve así:



Figura 1.6: **(a)** Reloj de sol (Sorbona, Jean Picard): definición astronómica. Preciso inicialmente, pero la Tierra se ralentiza. **(b)** Reloj de cuarzo: más preciso que péndulo o sol, pero aún se degrada. No fue elegido por el SI. **(c)** Reloj atómico de cesio-133 (1967): la solución moderna. Estable en cualquier lugar del universo, nunca envejece. — Evolución del segundo: de la rotación terrestre a la estabilidad atómica.

¹⁴QuantumFracture. “¿Cómo sabemos cuanto mide un segundo? 7: el segundo.” <https://youtu.be/GGDMi7za85s>

K), cualquier laboratorio podía reproducirlo. Pero incluso eso era imperfecto: era una propiedad física de una sustancia específica, no una constante universal.

En 2019, como con todas las unidades, la definición cambió. Ahora el kelvin se ancla directamente en la **constante de Boltzmann** — una constante física fundamental que relaciona energía, temperatura y el comportamiento microscópico de la materia. Boltzmann descubrió que la energía térmica promedio de una partícula es proporcional a la temperatura: $E = k_B T$. Así que definir el kelvin es, en esencia, definir la relación entre energía y movimiento molecular.

Evolución de la calibración — tres hitos en cómo medimos el calor

La temperatura ha sido la magnitud más difícil de estandarizar. Históricamente, los intentos pasaron por tres enfoques radicalmente diferentes:

1. **(a) Baño de hielo — Arbitrario pero reproducible:** Punto congelación del agua. Funciona para ambientes. Límites claros a temperaturas extremas.
2. **(b) Punto triple — Más fundamental pero limitado:** Fenómeno natural único y reproducible (ver "Historia" para detalles). Mejor que el hielo, pero aún ligado a una sustancia específica.
3. **(c) Constante de Boltzmann — Universal:** Enfoque basado en energía cinética microscópica. Sin sustancias específicas, sin límites. Válido en cualquier rango de temperatura.

Visualmente:

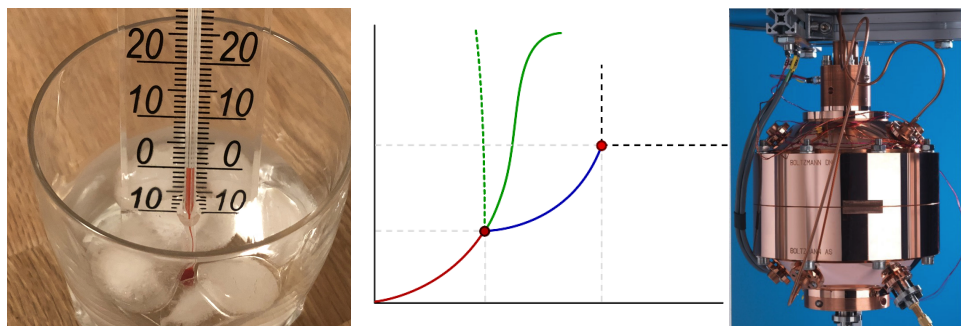


Figura 1.7: **(a)** Baño de agua con hielo: calibración práctica histórica. Ofrecía un punto reproducible (0°C) pero arbitrario — la congelación es un fenómeno visible pero no fundamental. **(b)** Punto triple del agua (diagrama de fase): donde hielo, líquido y vapor coexisten en equilibrio único (273.16 K , 611.657 Pa). Más preciso y reproducible que el hielo, pero aún ligado a una sustancia específica. **(c)** Resonador acústico de diamante (NPL): la solución moderna. Mide la velocidad del sonido en gas, que depende directamente de la energía térmica molecular según Boltzmann ($E = k_B T$). Sin arbitrariedad, sin sustancia específica — pura física. — Evolución de la temperatura: de puntos prácticos a constantes fundamentales.

Por qué Boltzmann? La constante de Boltzmann no es un punto arbitrario como el hielo o el punto triple. Es una **conexión directa entre energía térmica y temperatura molecular**. $E = k_B T$ es la ecuación más fundamental de la termodinámica. Cuando defines el kelvin usando k_B , estás diciendo: «la temperatura mide literalmente la energía cinética promedio de las moléculas». Es más que una convención — es física pura.

El sorpresivo cero absoluto: Clásicamente, en el siglo XIX se pensaba que a 0 K todo movimiento cesaba completamente. Pero en el siglo XX, la mecánica cuántica reveló algo perturbador: **aun a cero absoluto, hay movimiento**. Se llama «**zero-point motion**» — una vibración residual de las partículas, consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg (no puedes conocer posición y momento simultáneamente con certeza absoluta). Este movimiento no es térmico; es una propiedad intrínseca de la mecánica cuántica. Por eso el cero absoluto no es un punto de reposo — es un punto donde **solo permanece el movimiento cuántico fundamental**.¹⁵

Impacto en medición de temperatura: Inversiones térmicas en cuartos de cultivo (15–25 K por encima del ambiente exterior) regulan evapotranspiración y fotosíntesis; desviaciones de apenas ± 2 K reducen productividad en 5–10 %. Rangos operativos de componentes electrónicos (-40 a 125°C típico) definen vida útil; error de ± 5 K causa falla prematura.

Sensores RTD en suelo calibrados contra el Instituto Nacional de Metrología monitorean la velocidad de mineralización de nitrógeno — la temperatura de suelo (10 – 20°C) afecta la absorción radicular directamente. Cultivos sensibles (café 20 – 30°C , cacao 20 – 28°C) experimentan estrés crítico si la temperatura sale de rango — un sensor descalibrado de 1 K predice mal el riesgo de helada.

Esterilización térmica de conservas ($121^\circ\text{C} \times 15$ min) requiere precisión; variaciones de ± 2 K permiten la sobrevivencia de patógenos o degradan texturas. Conservación de alimentos en cadena de frío (0 – 4°C para lácteos, -18°C para congelados) depende de termómetros precisos; error de ± 3 K compromete lotes enteros. La temperatura de color de iluminación LED (5600 K simula luz solar) requiere calibración universal para que las pantallas luzcan idénticas en distintos lugares.

El kelvin, anclado en la energía cinética molecular fundamental (constante de Boltzmann), permite que termómetros en distintas regiones midan la misma temperatura, habilitando predicciones agroclimáticas, especificaciones de ingeniería y control de procesos que sean universalmente comparables.¹⁶

¹⁵NIST. “Kelvin: Thermodynamic Temperature.” <https://www.nist.gov/si-redefinition/kelvin-introduction>

¹⁶QuantumFracture. “¿Cómo sabemos que un kelvin es un kelvin? 3. El Kelvin.” <https://youtu.be/GokMHWcm1MM>

5. Corriente Eléctrica (amperio, A)



Definición técnica (2019): Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, e , en $1,602176634 \times 10^{-19}$, cuando se expresa en la unidad culombio (C).

Definición derivada: 1 amperio es el flujo de 1 culombio de carga por segundo. O equivalentemente: la corriente que transporta exactamente $6,24 \times 10^{18}$ electrones por segundo.

Historia — Del galvanómetro a la carga elemental: El amperio fue reconocido como unidad internacional en 1908, pero su definición era absurda. Se basaba en un **experimento imaginario de Ampère (1820s)**: dos hilos paralelos de **longitud infinita** separados exactamente 1 metro crearían una fuerza específica. Impráctica — imposible construir hilos infinitos. Durante un siglo, los científicos midieron amperaje usando amperímetros mecánicos, pero la definición oficial seguía siendo una ficción física.

En 2019, la redefinición volvió a lo fundamental: la **carga elemental** (e), la cantidad de carga en un electrón o protón individual. Ahora 1 amperio es: **la corriente en que exactamente $6,24 \times 10^{18}$ electrones cruzan un punto por segundo.**

¿Cómo se mide? Contando electrones individuales: La solución moderna es revolucionaria. Los científicos crearon dispositivos de **transporte de electrón simple** (Single Electron Transport chips, SET) que pueden contar el tránsito de electrones individuales. Un electrón pasa por un punto. El dispositivo lo cuenta. Otro electrón pasa. Se cuenta. Repite $6,24 \times 10^{18}$ veces por segundo — eso es 1 amperio. Es metrología cuántica: la definición se volvió más clara (basada en la naturaleza, no en ficción), pero la medición se volvió más exigente técnicamente. Solo laboratorios con equipamiento criogénico y detectores cuánticos pueden hacerlo.¹⁷

¹⁷NIST. “The Ampere (SI Redefinition).” <https://www.nist.gov/si-redefinition/ampere-introduction>



Figura 1.8: (a) Amperímetro histórico (moving-vane, siglo XX): medía corriente por desviación mecánica de aguja. Funcional pero sin definición rigurosa. (b) Líneas de transmisión (powerlines): contexto cotidiano. La corriente eléctrica que corre por ellas depende de que 1 amperio sea preciso y universal. (c) Chip cuántico moderno: representa medición de carga elemental. La nueva definición no es mecánica — es cuántica. — Evolución de la corriente: de aguja mecánica a conteo de electrones.

Impacto en medición de corriente eléctrica:¹⁸ Especificaciones de consumo en microcontroladores (50 mA en reposo vs. 100 mA activo) deben certificarse con precisión; error de 1 mA acorta autonomía de batería en horas. Límites de corriente máxima en pines de microprocesadores (típicamente 20 mA por pin) no pueden excederse sin daño permanente — calibración del amperio permite a ingenieros confiar en esos límites.

Sensores de humedad capacitivos en cuartos de cultivo operan a corrientes de miliamperios y requieren calibración confiable para monitoreo de riego automático; lectores de tensiometría IoT miden pulsos de corriente débil y necesitan amperímetros de laboratorio certificados. Sistemas de medición de estrés hídrico en árboles (microtensiómetros) envían señales en nanoamperios que deben amplificarse sin ruido; esto exige estándares de calibración rigurosos.

Máquinas de envasado y procesamiento usan motores con control de corriente; si la corriente sobrepasa un umbral, los motores se detienen automáticamente para evitar daño de producto — esto solo es posible con una definición universal del amperio. Plantas de energía distribuida sincronizadas por corriente de fases (ciclo de AC compartido entre plantas) dependen de medición precisa de amperaje para equilibrio de carga.

El amperio, definido por la carga elemental (número de electrones por segundo exactamente), permite que un medidor en Bogotá y otro en Nariño reporten la misma corriente, habilitando comercio de energía, control de procesos precisos y seguridad de sistemas críticos.

¹⁸QuantumFracture. “¿Cómo sabemos que un amperio mide un amperio? 4. El amperio.” <https://youtu.be/WIs609Tk1yM>

de masas. Pero el sodio genera «ruido» — iones de sodio interfieren con las señales de silicio. El chemist Savelas Rabb de NIST propuso audazmente usar tetrametilamonio hidróxido (TMAH), un disolvente que se vaporiza completamente, dejando solo silicio. Resultado: incertidumbre reducida dramáticamente. Hoy, TMAH es estándar mundial — una innovación pequeña que transformó la metrología global. Laboratorios de todo el mundo — PTB (Alemania, liderazgo técnico), NMIJ (Japón), NIST (USA, innovación), INRIM (Italia), NRC (Canadá) — colaboraron intensamente durante años. En 2017, todos convergieron al mismo valor de forma independiente. Como expresó el chemist Bob Vocke del NIST: «**Trabajando juntos — ¡asombroso!**». Este espíritu cooperativo internacional es el corazón de la redefinición del 2019.^a

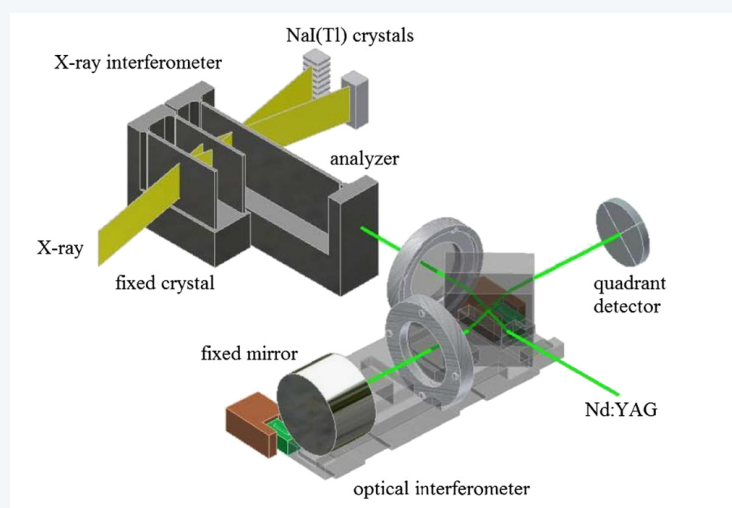


Figura 1.9: Aparato XRCD (X-ray Crystal Density) — Método de referencia para medir la constante de Avogadro. Arriba: interferómetro de rayos X con cristales NaI, midiendo el espaciamiento atómico a del silicio. Abajo: interferómetro óptico con láser Nd:YAG, midiendo el diámetro y volumen de la esfera. Fuente: Bettin et al. (2019), Fig. 3.

La esfera más redonda del mundo

Veritasium capturó el experimento en el video «*The Roundest Object in the World*».^b La esfera de silicio Si28-31Pr11, fabricada en el Instituto Leibniz (Berlín), tiene masa de 5682 gramos, diámetro de 101 milímetros, y desviaciones de la forma perfecta menores a 20–28 nanómetros — menos que un virus (véase Figura 1.10).

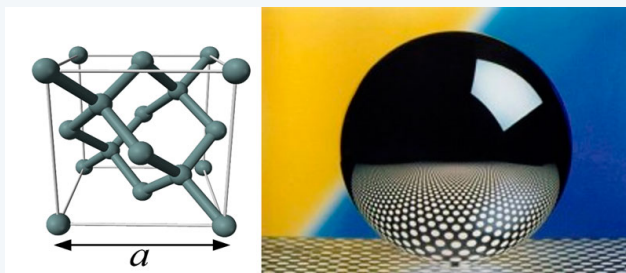


Figura 1.10: (a) Estructura cristalina cúbica del silicio: el parámetro de red a determina el espaciamiento atómico. (b) Esfera Si₂₈-31Pr₁₁ reflejando luz: casi perfectamente esférica, desviaciones menores a 28 nanómetros. Fuente: Bettin et al. (2019), Fig. 6 (adaptada).

¿Por qué tan perfecta? Porque cualquier irregularidad distorsiona el volumen. Y si distorsionas el volumen, fallas al contar átomos. La redondez extrema **es metrología**: es cómo la ciencia moderna ancla una constante fundamental. No es romántico — es riguroso.

^aBettin, H., Fujii, K., & Nicolaus, A. (2019). *Silicon spheres for the future realization of the kilogram and the mole*. *C. R. Physique*, 20(1), 64–76. / NIST. “Redefining the Mole.” <https://www.nist.gov/si-redefinition/redefining-mole>

^bVeritasium. *The Roundest Object in the World*. YouTube. Derek Muller documenta el experimento de la esfera de silicio y visualiza la precisión extrema.

Por qué es importante: El mol es **vital para la química**. Permite cálculos estequiométricos: si la ecuación dice «2 moles de hidrógeno reaccionan con 1 mol de oxígeno», ahora sabes exactamente cuántas moléculas son eso. Permite concentraciones (molaridad). Permite convertir entre átomos y gramos. Sin el mol, la química moderna no existiría.

Impacto en análisis químico y síntesis: El dopaje de semiconductores (silicio tipo-n y tipo-p para transistores) se controla en concentración molar; un error de 0.01 mol/cm³ hace que el transistor no conduzca — la espectrometría de masas requiere calibración en moles.

Fertilizantes declarados como «16-4-8» (N-P-K en % peso) deben convertirse a molaridad para predecir la disponibilidad iónica en el suelo; el nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) y el nitrato (NO₃⁻) tienen velocidades de absorción radicular distintas — un error de 0.1 mol N/ha es la diferencia entre deficiencia y toxicidad. El pH del suelo se define logarítmicamente: pH = -log[H⁺] donde [H⁺] está en moles/litro; un técnico agrícola necesita calcular cuánta cal (CaCO₃) agregar en moles para neutralizar la acidez.

El análisis de nutrientes foliares en hojas (N, P, K) se reporta en mmol/kg; un error en la especiación de formas iónicas (NO₃⁻ vs. NH₄⁺) sesga las predicciones de deficiencia nutricional. El contenido de proteína bruta en alimentos se estima por nitrógeno total (método Kjeldahl, reportado en moles de N); la conformidad de aditivos (conservantes, colorantes, antioxidantes) requiere molaridad exacta — las regulaciones especifican

límites en mmol/L, y una variación de 0.2 mmol puede cambiar el estatus de un lote de permitido a prohibido.

El mol permite comparar análisis de laboratorio en distintos lugares sin ambigüedad: un resultado de 5 mmol N/kg en un análisis de suelo en Cali significa exactamente lo mismo en Popayán, habilitando decisiones de nutrición de cultivos uniformes a nivel nacional.

7. Intensidad Luminosa (candela, cd)





Figura 1.11: **(a)** Aparato Hefner flame (1903): Comparador de flama. Los científicos del NBS (National Bureau of Standards) usaban lámparas de filamento de carbono calibradas contra flamas estándar Hefner para establecer la unidad internacional de candela. **(b)** Lámpara incandescente de 500 W (1970s): Estándar de referencia durante décadas. **(c)** Detector de diodo de silicio (1990s-presente): Primer dispositivo detector para realizar la candela en EE.UU., fundamental cambio desde lámparas hacia radiometría moderna. — Fuente: NIST Si-Redefinition.

En el 1700s-1800s, científicos usaban velas de cera como referencia. En 1879, Viole propuso platino fundido. En 1909, se adoptó la «vela internacional» (Figura 1.11a) con filamentos de carbono comparados contra flamas estándar. En 1933, se estandarizó un cuerpo negro a la temperatura de fusión del platino. En 1948, la candela fue oficialmente adoptada como unidad base SI. En los 1970s (Figura 1.11b), las lámparas incandescentes de tungsteno fueron estándar de referencia. En 1979, redefinición moderna: frecuencia 540 THz de radiación monocromática. En 1990s (Figura 1.11c), NIST implementó por primera vez un **detector de silicio** en lugar de lámparas, revolucionando la metrología. En 2019, se ancló directamente en eficacia luminosa (683 lm/W), cortando el cordón umbilical con prototipos físicos.

Aplicación en laboratorio: NIST mide la candela usando fotómetros estándar con fotodiodos de silicio, calibrados contra radiometría criogénica de referencia. La incertidumbre actual es de 0,2 % — es decir, están seguros del valor de la candela a 1 parte en 500. Eso permite que la industria cinematográfica, el diseño de iluminación, y la investigación en óptica compartan estándares globales precisos.

Lo único y peculiar: la candela es la **única unidad SI base que mide percepción, no una propiedad física objetiva**. Compara:

- El **metro** = distancia (física pura, independiente del observador)
- El **kilogramo** = inercia (física pura)
- El **segundo** = duración (física pura)
- La **candela** = brillo **percibido por el ojo humano**

La constante definidora de la candela, $K_{cd} = 683 \text{ lm/W}$, no es una propiedad universal del universo como la velocidad de la luz. Es una **convención humana**. La frecuencia elegida (540 THz, luz verde) existe porque **nuestros ojos de día son más sensibles al verde que a otros colores**. Un alien con diferentes receptores visuales encontraría esta elección completamente arbitraria. Como lo expresó NIST: «Simply convenient for human perception».¹⁹ La candela es la unidad que **une ciencia con biología** — una confesión de que incluso la medición más rigurosa sale del cuerpo humano.

Impacto en medición de iluminancia y color: Especificaciones de LEDs (candelas a ángulo definido, color 5600 K para simulación de luz diurna) se calibran contra estándares internacionales; fabricantes de displays deben garantizar luminancia uniforme ($\pm 5\%$ típico) para que pantallas luzcan idénticas en Medellín y en Tokio.

Cada cultivo requiere irradiancia óptima para fotosíntesis: lechuga $200\text{--}400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, tomate $400\text{--}700 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ — un sensor descalibrado en $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ reduce la fotosíntesis notablemente. Sensores de luz calibrados en iluminancia (lux) permiten comparar productividad entre invernaderos en distintas regiones; un invernadero en Nariño y otro en Cundinamarca saben si operan bajo el mismo rango de luz. El fotoperiodo (duración e intensidad de luz) induce floración en algunos cultivos (papa, cebolla); un error de ± 100 lux o 30 minutos en el fotoperiodo puede retrasar la cosecha varias semanas.

Iluminación de plantas de procesamiento de alimentos debe cumplir mínimos de 500 lux en áreas de corte para detección visual de defectos; auditorías de calidad usan luxómetros calibrados. Maduración de frutas (p. ej., plátanos) se controla por exposición lumínica — luz excesiva acelera degradación de pigmentos y reduce vida poscosecha. Color matching en industria agroalimentaria (café torrefacto, chocolate, jugos) se realiza bajo iluminación estándar (p. ej., D65, 6500 K); variación de 200 K cambia percepción de color. La candela, basada en la sensibilidad espectral del ojo humano a luz de 540 nm (verde-amarilla), unifica todas estas mediciones bajo un estándar perceptual universal — lo que ves en prueba de color en Bogotá y en calibración de display en Cali son equivalentes porque ambos usan candelas.

Síntesis: Las Siete Bases Fundamentales

Hemos recorrido 225 años de metrología — desde prototipos que envejecían en París hasta constantes fundamentales inmutables. Las siete unidades base del SI ahora se definen así:

Esto **no es una coincidencia romántica**. Es el resultado de una decisión científica rigurosa: anclar las unidades en la naturaleza misma, en constantes que nunca cambiarán. Esto permite que un científico en Tokio, otro en São Paulo y otro en Nairobi

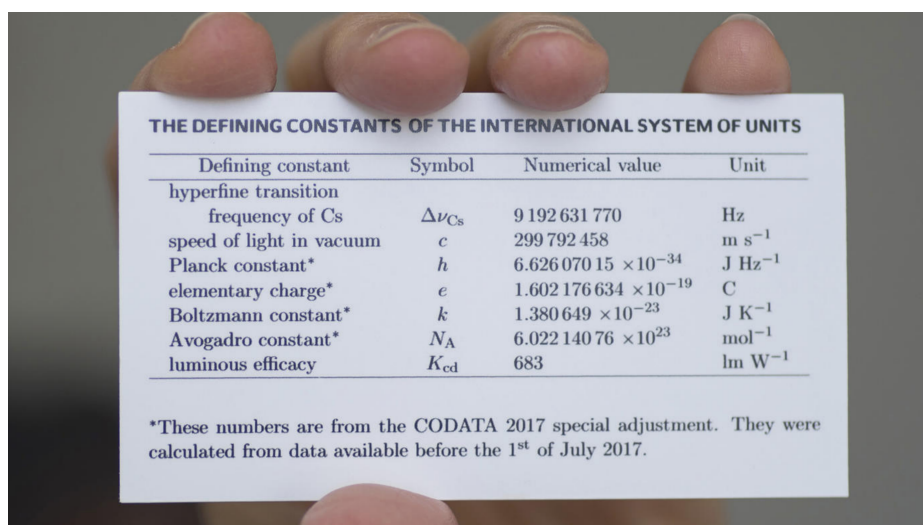
¹⁹NIST. “Candela (SI Redefinition).” <https://www.nist.gov/si-redefinition/candela>

Unidad base	Símbolo	Constante fundamental
Metro	m	Velocidad de la luz: $c = 299792458$ m/s
Kilogramo	kg	Constante de Planck: $h = 6,626070 \times 10^{-34}$ J·s
Segundo	s	Período del cesio-133: $\nu_{Cs} = 9192631770$ Hz
Kelvin	K	Constante de Boltzmann: $k = 1,380649 \times 10^{-23}$ J·K ⁻¹
Amperio	A	Carga elemental: $e = 1,602176634 \times 10^{-19}$ C
Mol	mol	Constante de Avogadro: $N_A = 6,02214076 \times 10^{23}$ mol ⁻¹
Candela	cd	Eficacia luminosa: $K_{cd} = 683$ lm·W ⁻¹

Cuadro 1.2: Síntesis: las siete unidades base del SI y la constante fundamental en la que ancla cada una.

midan exactamente lo mismo, sin dependencia de un prototipo físico que envejece. Es la democratización de la precisión.

Pero estas siete unidades son solo el **fundamento**. El verdadero poder del SI es que de ellas se derivan todas las demás unidades que necesita la física moderna. La Figura 1.12 muestra la tarjeta de referencia con los valores exactos de estas siete constantes fundamentales que definen el sistema.



THE DEFINING CONSTANTS OF THE INTERNATIONAL SYSTEM OF UNITS			
Defining constant	Symbol	Numerical value	Unit
hyperfine transition frequency of Cs	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
speed of light in vacuum	c	299 792 458	m s ⁻¹
Planck constant*	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J Hz ⁻¹
elementary charge*	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Boltzmann constant*	k	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	J K ⁻¹
Avogadro constant*	N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol ⁻¹
luminous efficacy	K_{cd}	683	lm W ⁻¹

*These numbers are from the CODATA 2017 special adjustment. They were calculated from data available before the 1st of July 2017.

Figura 1.12: **Tarjeta de referencia: Constantes fundamentales del SI 2019.** Las siete constantes que definen todas las unidades base. Estos valores fueron adoptados por decisión científica internacional en 2019, reemplazando prototipos físicos por constantes inmutables de la naturaleza. Foto: tarjeta de referencia física.

Desarrollo Conceptual III: Unidades Derivadas desde Ecuaciones Fundamentales

¿Por qué unidades derivadas? Hasta ahora hemos definido siete unidades base (metro, kilogramo, segundo, kelvin, amperio, mol, candela). Pero en la práctica, medimos **combinaciones** de estas: velocidad, aceleración, fuerza, energía, etc. Estas nuevas

magnitudes requieren nuevas unidades.

La idea clave: No necesitamos inventar estas unidades. La ciencia ya tiene **ecuaciones** que relacionan estas magnitudes. Cada ecuación define implícitamente cómo se combinan las unidades base. Cuando escribes $F = ma$, esa ecuación automáticamente define la unidad de fuerza como $\text{kilogramo} \times (\text{metro}/\text{segundo}^2)$. No la inventamos; la ecuación la produce.

En esta sección, veremos cómo ecuaciones conocidas generan unidades derivadas. **Por ahora, solo nos importa ver la relación algebraica:** qué variables se multiplican, qué se dividen, y qué unidades resultan. Más adelante profundizaremos en **por qué** esas ecuaciones tienen esa forma y **qué significan físicamente**. Por ahora, son solo relaciones entre variables.

Seguiremos un orden lógico: comenzamos con relaciones simples (velocidad = distancia $\div$ tiempo), luego más complejas (fuerza = masa $\times$ aceleración), hasta llegar a síntesis (energía). Cada una define una unidad derivada diferente.

Nota: Para una **tabla completa y de referencia** de todas las unidades derivadas (incluyendo presión, potencia, torque, y muchas más), ver el **Apéndice: Tabla Completa de Unidades Derivadas** al final de esta sección. Allí encontrarás la ecuación, dimensión y unidades SI para más de 20 magnitudes derivadas.

Cinemática: Describiendo el Movimiento

Velocidad: $v = \Delta x / \Delta t$

La definición de velocidad promedio es:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.2)$$

donde Δx es desplazamiento (metros) y Δt es tiempo (segundos).

Unidad derivada: Según la ecuación $v = \Delta x / \Delta t$, la unidad de velocidad es $[v] = \text{m/s}$ (metros por segundo). Es la división de metro entre segundo.

Aceleración: $a = \Delta v / \Delta t$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Unidad derivada: Según la ecuación $a = \Delta v / \Delta t$, la unidad de aceleración es $[a] = \frac{\text{m/s}}{\text{s}} = \text{m/s}^2$ (metros por segundo al cuadrado). Observe que es velocidad (m/s) dividida por tiempo (s).

Dinámicas: Nuevas Relaciones

Hemos visto ecuaciones que relacionan posición y tiempo (velocidad) y velocidad con tiempo (aceleración). Ahora introduciremos ecuaciones que relacionan estas magnitudes

con masa.

Fuerza: $F = ma$

$$F = ma \quad (1.4)$$

donde m es masa (kg) y a es aceleración (m/s^2).

Unidad derivada: Según la ecuación $F = ma$, la unidad de fuerza es $[F] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N}$ (newton). Es el producto de masa (kg) multiplicada por aceleración (m/s^2).

Torque: $\tau = r \times F$

$$\tau = r \times F \quad (1.5)$$

donde r es distancia desde el eje (metros) y F es fuerza (newtons).

Unidad derivada: Según la ecuación $\tau = r \times F$, la unidad de torque es $[\tau] = \text{m} \cdot \text{N} = \text{N} \cdot \text{m}$ (newton-metro). Es distancia (m) multiplicada por fuerza (N).

Momentum: $p = mv$

$$p = mv \quad (1.6)$$

Unidad derivada: Según la ecuación $p = mv$, la unidad de momentum es $[p] = \text{kg} \cdot \text{m/s}$ (kilogramo-metro por segundo). Es masa (kg) multiplicada por velocidad (m/s).

Energía y Trabajo

Hemos introducido relaciones entre posición-tiempo (velocidad), velocidad-tiempo (aceleración), y masa-aceleración (fuerza). Ahora introduciremos ecuaciones que relacionan masa, velocidad y distancia de una nueva forma.

Energía: $E = \frac{1}{2}mv^2$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.7)$$

Unidad derivada: Según la ecuación $E = \frac{1}{2}mv^2$, la unidad de energía es $[E] = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{J}$ (joule). Es masa (kg) multiplicada por velocidad al cuadrado (m/s^2).

Nota: Otras ecuaciones producen la misma unidad: $E_p = mgh$ (masa $\times$ aceleración gravitacional $\times$ altura) también da joules. $E_s = \frac{1}{2}kx^2$ (constante de resorte $\times$ deformación al cuadrado) también da joules. Esto confirma que todas estas magnitudes comparten la misma unidad.

Observación dimensional: $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$. Aunque dimensionalmente idénticas, se usan en contextos diferentes (joule para energía, newton-metro para torque). Solo es una coincidencia algebraica.

Potencia: $P = E/t$

$$P = \frac{E}{t} \quad (1.8)$$

Unidad derivada: Según la ecuación $P = E/t$, la unidad de potencia es $[P] = \text{J/s} = \text{W}$ (watt). Es energía (J) dividida por tiempo (s).

Densidades: Unidades Derivadas Simples y Prácticas

Las densidades son unidades derivadas particularmente simples: combinan solo masa con una magnitud geométrica (longitud, área, o volumen). Esto las hace ideales para introducir unidades derivadas de forma directa. Además, son fáciles de determinar experimentalmente usando solo una balanza y medidas geométricas simples (regla, probeta), lo que las convierte en herramientas prácticas inmediatas en el laboratorio.

¿Por qué las densidades son importantes? Las densidades caracterizan propiedades fundamentales de materiales. En electrónica, la densidad volumétrica de dopantes en semiconductores (expresada en átomos/cm³, equivalente a kg/m³ de esa especie) determina si un transistor funciona. En agroambiental, la densidad del suelo (típicamente 1200–1400 kg/m³) determina porosidad, permeabilidad, y capacidad de retención de agua. En agroforestal, la densidad de la madera (p. ej., caoba 600 kg/m³, pino 500 kg/m³) predice resistencia y durabilidad. En alimentos, la densidad de un líquido (agua pura 1000 kg/m³, aceite 900 kg/m³, miel 1400 kg/m³) es criterio de pureza y calidad. La densidad lineal de cables (kg/m) y fibras es esencial en cálculos de peso en puentes y estructuras. Sin poder determinar densidades experimentalmente, no hay caracterización rigurosa de materiales.

Densidad lineal (lineal mass density): $\lambda = m/L$

$$\lambda = \frac{m}{L} \quad (1.9)$$

donde m es masa (kg) y L es longitud (m).

Unidad derivada: Según la ecuación $\lambda = m/L$, la unidad de densidad lineal es $[\lambda] = \text{kg/m}$ (kilogramo por metro). Se mide pesando un segmento de longitud conocida.

Densidad superficial (surface mass density): $\sigma = m/A$

$$\sigma = \frac{m}{A} \quad (1.10)$$

donde m es masa (kg) y A es área (m^2).

Unidad derivada: Según la ecuación $\sigma = m/A$, la unidad de densidad superficial es $[\sigma] = \text{kg}/\text{m}^2$ (kilogramo por metro cuadrado). Se mide pesando una hoja o lámina de área conocida.

Densidad volumétrica (volumetric mass density): $\rho = m/V$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.11)$$

donde m es masa (kg) y V es volumen (m^3).

Unidad derivada: Según la ecuación $\rho = m/V$, la unidad de densidad volumétrica es $[\rho] = \text{kg}/\text{m}^3$ (kilogramo por metro cúbico). Se mide pesando un volumen conocido (p. ej., 1 litro de agua destilada a 4°C pesa 1 kg, así que su densidad es $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$).

Tabla Resumen de Unidades Derivadas

Magnitud	Ecuación	Unidad SI
<i>Unidades derivadas complejas</i>		
Velocidad	$v = dx/dt$	m/s
Aceleración	$a = dv/dt$	m/s^2
Fuerza	$F = ma$	N
Torque	$\tau = r \times F$	$\text{N}\cdot\text{m}$
Momentum	$p = mv$	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$
Energía	$E = \frac{1}{2}mv^2$	J
Potencia	$P = E/t$	W
<i>Unidades derivadas simples (determinables en lab)</i>		
Densidad lineal	$\lambda = m/L$	kg/m
Densidad superficial	$\sigma = m/A$	kg/m^2
Densidad volumétrica	$\rho = m/V$	kg/m^3

¿Cómo sabemos que nuestras ecuaciones son correctas? Las unidades derivadas que acabamos de construir no son arbitrarias — surgen de relaciones físicas fundamentales. Pero **¿cómo verifica un científico que una ecuación es correcta sin resolver un problema entero?** ¿Cómo se puede descartar un error antes de invertir horas en cálculos? La respuesta está en un concepto más profundo que la unidad: la **dimensión** de una magnitud.

Desarrollo Conceptual IV: Dimensiones y Análisis Dimensional

¿Qué es una dimensión?

Una **dimensión** es la naturaleza cualitativa de una magnitud física — la clase de cantidad que representa, independientemente de la unidad usada. La dimensión de longitud es la misma ya sea que midas en metros, pulgadas o kilómetros. La dimensión de masa es idéntica en kilogramos o libras.

En física, usamos **notación de corchetes** para representar las siete dimensiones fundamentales:

Símbolo	Dimensión
$[M]$	Masa
$[L]$	Longitud
$[T]$	Tiempo
$[I]$	Corriente eléctrica
$[\Theta]$	Temperatura
$[N]$	Cantidad de sustancia
$[J]$	Intensidad luminosa

Cualquier magnitud derivada se expresa como combinación de estas siete:

$$[\text{Magnitud}] = [M]^a [L]^b [T]^c [I]^d [\Theta]^e [N]^f [J]^g$$

¿Qué es el análisis dimensional?

El **análisis dimensional** es una herramienta de **verificación** que permite validar si una ecuación física es correcta, sin necesidad de resolver el problema. Funciona sobre un principio fundamental: **toda ecuación física debe tener las mismas dimensiones en ambos lados**.²⁰

Regla de oro (NIST):

- **Condición necesaria:** Si una ecuación es **dimensionalmente consistente**, es **necesaria** (pero no suficiente) para que sea correcta.
- **Condición suficiente:** Si una ecuación es **dimensionalmente inconsistente**, eso es **suficiente** para afirmar que es **falsa**.

En otras palabras: *consistencia dimensional = prueba necesaria pero no suficiente de corrección*.

²⁰NIST Guide: “Dimensional Analysis as a Tool for Validation”; NPL Educational Resources.

Tres aplicaciones prácticas del análisis dimensional

1. Detección de errores (Verificación — enfoque NIST)

Se propone: $d = gt$ (distancia en caída libre).

Verificación dimensional:

- Lado izquierdo: $[d] = [L]$
- Lado derecho: $[g][t] = \frac{[L]}{[T]^2} \cdot [T] = \frac{[L]}{[T]}$
- $[L] \neq \frac{[L]}{[T]} \rightarrow$ Ecuación **rechazada como incorrecta**.

La forma correcta es $d = \frac{1}{2}gt^2$. El análisis dimensional detectó el error sin resolver nada.

2. Simplificación de problemas complejos (Teorema de Buckingham — enfoque NPL)

Problema: El arrastre en un objeto depende de velocidad v , tamaño r , densidad ρ , viscosidad μ — cinco variables. ¿Cómo se combinan?

El **teorema de Buckingham** dice: con n variables y m dimensiones fundamentales, puedes reducir a $n - m$ **grupos adimensionales** que capturan toda la física.

Aquí: $n = 5$, $m = 3$ (M, L, T) $\rightarrow n - m = 2$ grupos adimensionales. Esto reduce tremendamente los experimentos: en lugar de variar 5 variables independientemente, investigas solo 2 combinaciones sin dimensiones.

3. Predicción de relaciones funcionales (Escalamiento — aplicación común)

Pregunta: ¿De qué depende el período T de un péndulo?

Sabemos: T depende de longitud L y gravedad g . Escribimos: $T = C \cdot L^a \cdot g^b$ (donde C es constante).

Análisis dimensional:

$$[T] = [L]^a \cdot ([L][T]^{-2})^b \quad (1.12)$$

$$[T] = [L]^{a+b} \cdot [T]^{-2b} \quad (1.13)$$

Para que coincida:

- Potencia de $[L]$: $a + b = 0$
- Potencia de $[T]$: $-2b = 1 \rightarrow b = -1/2 \rightarrow a = 1/2$

Resultado: $T \propto \sqrt{L/g}$. **Sin un experimento, el análisis dimensional predijo la forma funcional.** (La constante exacta $C = 2\pi$ requiere más información.)

4. Determinación de unidades de constantes fundamentales

El análisis dimensional también permite **encontrar las unidades de constantes desconocidas**, simplemente despejando de la ecuación. Esto es especialmente útil cuando trabajas con ecuaciones nuevas o extranjeras.

Ejemplo 1.2.1: Constante gravitacional G

Ley de gravitación universal:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.14)$$

¿Cuáles son las unidades de G ? Despejamos:

$$[G] = \frac{[F][r^2]}{[m_1][m_2]} = \frac{[MLT^{-2}][L^2]}{[M][M]} = \frac{[L^3]}{[M][T^2]} = [M^{-1}L^3T^{-2}] \quad (1.15)$$

En unidades SI: $[G] = \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$.

Ejemplo 1.2.2: Constante elástica k (Ley de Hooke)

Fuerza en un resorte:

$$F = kx \quad (1.16)$$

Despejamos $[k]$:

$$[k] = \frac{[F]}{[x]} = \frac{[MLT^{-2}]}{[L]} = [MT^{-2}] \quad (1.17)$$

En unidades SI: $[k] = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ (también llamado N/m).

Ejemplo 1.2.3: Viscosidad dinámica η (Ley de Stokes)

Fuerza de fricción sobre una esfera en un fluido:

$$F = 6\pi\eta rv \quad (1.18)$$

Despejamos $[\eta]$:

$$[\eta] = \frac{[F]}{[r][v]} = \frac{[MLT^{-2}]}{[L][LT^{-1}]} = \frac{[MLT^{-2}]}{[L^2T^{-1}]} = [ML^{-1}T^{-1}] \quad (1.19)$$

En unidades SI: $[\eta] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (también Pa·s, pascal-segundo).

Principios fundamentales

Principio de Fourier: Solo pueden sumarse o restarse magnitudes de la **misma dimensión**. No puedes sumar tiempo con distancia. Este principio invalida categorías enteras de posibles ecuaciones antes de hacer cálculos.

Dimensión $\neq$ Unidad: La **dimensión** es cualitativa (longitud, masa, tiempo). La **unidad** es la escala (metro, kilogramo, segundo). Un análisis dimensional trabaja con dimensiones: no importa si usas metros o millas, la dimensión es $[L]$.

Limitaciones (importante)

El análisis dimensional es una herramienta poderosa pero **no** puede:

1. Determinar constantes numéricas

El análisis dimensional **solo determina la forma** de una ecuación, no los coeficientes numéricos. Ejemplos concretos:

- Energía cinética: El análisis dimensional dice $E \propto mv^2$, pero **no distingue** entre:
 - $E = \frac{1}{2}mv^2$ (correcta)
 - $E = mv^2$ (dimensionalmente consistente, pero físicamente falsa)
 - $E = \frac{1}{3}mv^2$ (también dimensionalmente consistente, pero incorrecta)
- Caída libre: El análisis dimensional dice $y \propto gt^2$, pero no determina que es $y = \frac{1}{2}gt^2$ y no $y = gt^2$.
- Período del péndulo: El análisis dimensional predice $T \propto \sqrt{L/g}$, pero la constante exacta es $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. El factor 2π **no puede obtenerse del análisis dimensional** — requiere derivación teórica o experimentación.

¿Por qué? Porque todas estas formas son **dimensionalmente equivalentes** — tienen las mismas dimensiones en ambos lados. El análisis dimensional verifica *forma*, no magnitud.

2. Derivar ecuaciones desde cero

El análisis dimensional **solo verifica**, no **genera**. Si te proponen una ecuación, puedes validarla; pero no puedes inventar una ecuación nueva sin información física adicional.

Ejemplo: Si alguien pregunta “¿cuál es la forma de la fuerza magnética sobre una carga que se mueve en un campo?”, el análisis dimensional solo dice: F debe depender de q (carga), v (velocidad), y B (campo magnético), y la única forma dimensionalmente consistente es $F \propto qvB$. Pero **el análisis dimensional no te dice que sea** $F = q(\vec{v} \times \vec{B})$ — esa estructura vectorial específica requiere derivación teórica o ley experimental.

3. Distinguir entre ecuaciones dimensionalmente equivalentes

Este es el problema crucial: múltiples ecuaciones físicamente distintas pueden ser dimensionalmente idénticas, y el análisis dimensional no puede decir cuál es correcta.

Ejemplo 1.2.4: Resistencia del aire: ¿lineal o cuadrática?

Supón que estudias cómo la fuerza de resistencia del aire F depende de la velocidad v de un objeto.

Candidato 1: $F = bv$ (resistencia lineal, válida a velocidades bajas)

Candidato 2: $F = cv^2$ (resistencia cuadrática, válida a velocidades altas)

Ambas son dimensionalmente consistentes con la fuerza, $[F] = [MLT^{-2}]$:

- Candidato 1: $[b] = [MT^{-1}]$, entonces $[bv] = [MT^{-1}][LT^{-1}] = [MLT^{-2}] \checkmark$
- Candidato 2: $[c] = [ML^{-1}]$, entonces $[cv^2] = [ML^{-1}][LT^{-1}]^2 = [ML^{-1}][L^2T^{-2}] = [MLT^{-2}] \checkmark$

Pero son físicamente distintas. ¿Cuál es correcta? El análisis dimensional no lo dice — necesitas **experimentación o teoría** (Stokes vs. turbulencia) para elegir.

En síntesis (NIST + NPL consensus):²¹

El análisis dimensional es una herramienta de **validación rápida**: rechaza ecuaciones incorrectas con certeza, simplifica problemas complejos, y predice formas funcionales. Pero no reemplaza la física rigurosa — solo es el **primer filtro** antes de experimentación o derivación formal.

Desarrollo Conceptual V: Notación de Potencias de 10

Antes de explorar las escalas del universo, necesitamos una herramienta esencial: la **notación de potencias de 10**. Esta es la forma sistemática en que los científicos escriben números muy grandes o muy pequeños.

¿Qué es una potencia de 10?

Una **potencia de 10** es una forma abreviada de escribir multiplicación repetida por 10:

$$10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1000 \quad (1.20)$$

$$10^6 = 1\,000\,000 \text{ (un millón)} \quad (1.21)$$

$$10^{-3} = \frac{1}{10 \times 10 \times 10} = 0,001 \text{ (una milésima)} \quad (1.22)$$

$$10^{-6} = 0,000001 \text{ (una millonésima)} \quad (1.23)$$

El exponente (el número pequeño arriba) nos dice cuántas veces multiplicar (si es positivo) o dividir (si es negativo) por 10.

¿Por qué usamos esto? Porque el universo es extremo. La masa de un electrón tiene 31 dígitos de ceros después del punto decimal antes de llegar a 91: aproximadamente $0.000\dots091$ kg. Es mucho más fácil escribir $9,1 \times 10^{-31}$ kg.

Notación científica

La **notación científica** combina un decimal con una potencia de 10:

$$\text{Número} = (\text{dígitos entre 1 y 10}) \times 10^n \quad (1.24)$$

Ejemplos:

- Velocidad de la luz: $c = 3 \times 10^8$ m/s (en lugar de 300,000,000 m/s)

²¹NIST Guide to SI Unit Usage; NPL Educational Resources on Dimensional Analysis.

- 38

Nota 1: Existen prefijos adicionales poco usados en la práctica moderna: **deca** (da, 10^1) y **hecto** (h, 10^2) — ambos casi obsoletos en ciencia porque el sistema decimal es suficientemente flexible. También existe el **angstrom** ($\text{\AA}$), una unidad no oficial pero ampliamente usada en física atómica y cristalografía: $1 \text{\AA} \equiv 10^{-10} \text{ m}$, ideal para describir tamaños atómicos (el radio de Bohr del átomo de hidrógeno es aproximadamente $0.53 \text{\AA}$). Para los propósitos de este curso, la tabla anterior cubre los prefijos esenciales.

Nota 2 — Cuidado con la nomenclatura de números grandes: En América Latina, España y Europa continental se usa el **sistema largo** (long scale):

- **Millón** = 10^6 (universal)
- **Billón** = 10^{12} (un millón de millones) — América Latina, Europa
- **Trillón** = 10^{18}

Pero en EE.UU., Reino Unido y documentos científicos estadounidenses se usa el **sistema corto** (short scale):

- **Million** = 10^6 (universal)
- **Billion** = 10^9 (mil millones) — EE.UU., UK
- **Trillion** = 10^{12}

Esto causa confusión internacional. Para evitar malentendidos, los científicos **siempre usan prefijos SI** (giga, mega, tera) en lugar de nombres de números. En este curso usaremos solo potencias de 10 y prefijos SI — así no hay ambigüedad, sin importar el idioma o país.

Ejemplos prácticos:

- $1 \text{ km} \equiv 10^3 \text{ m}$ (kilómetro = mil metros)
- $1 \text{ ms} \equiv 10^{-3} \text{ s}$ (milisegundo = milésima de segundo)
- $1 \mu\text{A} \equiv 10^{-6} \text{ A}$ (microamperio = millonésima de amperio)
- $1 \text{ nm} \equiv 10^{-9} \text{ m}$ (nanómetro = milmillonésima de metro)
- $1 \text{ GHz} \equiv 10^9 \text{ Hz}$ (gigahertz = mil millones de hertz)

Dónde estamos: Las escalas del universo

Masas en el Universo ¿Cuánto pesa un electrón comparado con una ballena, o con la Tierra misma? La siguiente tabla recorre catorce escalas de masa, desde el mundo subatómico (electrones, protones, moléculas) hasta lo cosmológico (planetas, estrellas, galaxias, el universo entero). Note cómo los órdenes de magnitud (las potencias de 10) revelan dónde vivimos nosotros en ese rango:

Objeto/Escala	Masa (kg)	Orden
Electrón	$9,1 \times 10^{-31}$	10^{-30}
Protón	$1,7 \times 10^{-27}$	10^{-27}
Átomo de hidrógeno	$1,7 \times 10^{-27}$	10^{-27}
Molécula de agua	$3,0 \times 10^{-26}$	10^{-26}
Gota de agua (1 mm^3)	10^{-6}	10^{-6}
Persona promedio	70	10^2
Automóvil	1,500	10^3
Ballena azul	130,000	10^5
Montaña (Everest)	10^{14}	10^{14}
Luna	$7,4 \times 10^{22}$	10^{23}
Tierra	$6,0 \times 10^{24}$	10^{24}
Sol	$2,0 \times 10^{30}$	10^{30}
Galaxia Vía Láctea	2×10^{41}	10^{41}
Universo observable	10^{53}	10^{53}

Cuadro 1.3: Masas representativas en el universo, desde el electrón hasta el universo observable, ordenadas por potencias de 10.

Tabla I: Masas en el Universo

Reflexión profunda — Dónde estamos en la escala de masas:

El rango total es de 10^{-30} kg (electrón) a 10^{53} kg (universo observable). Esto es **83 órdenes de magnitud** — si escribieras este rango en una sola línea, ocuparía una hoja de papel. Pero aquí viene lo sorprendente:

- Tu masa ($70 \text{ kg} \approx 10^{1,85} \text{ kg}$) está casi exactamente en el **centro logarítmico** del universo.
- Esto **no es coincidencia**. Representa un equilibrio fundamental: eres lo suficientemente grande para contener átomos en cantidad masiva (cada átomo $\approx 10^{-26} \text{ kg}$), pero lo suficientemente pequeño para ser gobernado por química y biología cuántica.
- Si fueras más pequeño ($10^{-10} \text{ kg} = \text{polvo}$), serías gobernado completamente por mecánica cuántica: los electrones se comportarían de forma impredecible.
- Si fueras más grande ($10^{30} \text{ kg} = \text{planeta}$), serías gobernado por gravitación: la presión interna te aplanaría, la física cambiaría radicalmente.

Implicación: Cada orden de magnitud representa un **cambio cualitativo** de las leyes de la física. Esto es por qué los prefijos SI avanzan de 3 en 3 — es la escala en la que nuestro universo revela nuevas capas de complejidad.

Recuerda: observas átomos (10^{-26} kg cada uno) usando ojos hechos de átomos. Mides galaxias (10^{41} kg) usando luz que viaja 13 mil millones de años. Eres el instrumento de medición, y estás en el centro de la escala. Eso es extraordinario.²²

²²Recurso visual complementario (sin diálogo, solo música e ilustraciones en pantalla): “Añadiendo MATERIA hasta el INFINITO”. <https://youtu.be/qvJg-Hiact4>

Ejercicio — Masa en potencias de 10: Un grano individual de café tostado pesa aproximadamente 0.13 g. Un saco estándar de exportación contiene 60 kg de café. Un contenedor marítimo de 20 pies transporta 320 sacos. Expresa las tres masas (grano, saco, contenedor) en notación científica, indica el prefijo SI más apropiado para cada una, y calcula cuántos órdenes de magnitud separan el grano individual del contenedor lleno.

Distancias en el Universo El video “Viaje Cósmico” parte de una escena cotidiana en Venecia: un acróbata sostiene un aro de 1 metro de diámetro, rodeado por un círculo de espectadores de 10 metros — apenas 10^1 m. Desde ahí, cada nuevo círculo concéntrico se aleja 10 veces más que el anterior: la plaza de San Marcos, la ciudad completa, el norte de Italia, Europa, la Tierra, el sistema solar, la Vía Láctea, hasta los límites del universo observable.²³ Esa misma lógica —multiplicar por 10 en cada paso— organiza la siguiente tabla:

Tabla II: Distancias en el Universo

Escala/Objeto	Distancia (m)	Orden
Radio de átomo	10^{-10}	10^{-10}
Longitud de onda luz visible	5×10^{-7}	10^{-7}
Diámetro de célula	10^{-5}	10^{-5}
Altura de humano	1.7	10^0
Everest	8,848	10^4
Diámetro de Tierra	$1,3 \times 10^7$	10^7
Distancia Tierra-Luna	$3,8 \times 10^8$	10^8
Distancia Tierra-Sol	$1,5 \times 10^{11}$	10^{11}
Año luz	$9,5 \times 10^{15}$	10^{16}
Diámetro Vía Láctea	10^{21}	10^{21}
Radio universo observable	$4,4 \times 10^{26}$	10^{26}

Cuadro 1.4: Distancias representativas en el universo, desde el radio de un átomo hasta el radio del universo observable, ordenadas por potencias de 10.

Reflexión profunda — Dónde estamos en la escala de distancias:

El rango es de 10^{-10} m (radio de un átomo) a 10^{26} m (radio del universo observable). Eso es **36 órdenes de magnitud**. Y tú ($1.7 \text{ m} \approx 10^0 \text{ m}$) estás exactamente en el medio.

Piensa en lo que esto significa:

▪ **Hacia lo pequeño:** Cada factor de 10 hacia abajo te lleva a un reino diferente.

- 10^{-3} m: milímetro (grano de sal)
- 10^{-6} m: micrón (bacteria)

²³Quantum Fracture / Veritasium. “Viaje Cósmico.” <https://www.youtube.com/watch?v=RJx1LdyPjKg> [07:45]

- 10^{-9} m: nanómetro (molécula de proteína)
- 10^{-10} m: angstrom (átomo)
- Más abajo: núcleo atómico, quarks (ya no lo ves directamente)
- **Hacia lo grande:** Cada factor de 10 hacia arriba te aleja más del hogar.
 - 10^3 m: kilómetro (tu ciudad)
 - 10^6 m: millón de metros (región geográfica)
 - 10^8 m: la Luna
 - 10^{11} m: el Sol (distancia Tierra-Sol)
 - 10^{21} m: la Vía Láctea completa (millones de años luz)
 - Más allá: otras galaxias, el horizonte del universo observable

Lo asombroso: Los videos de "viaje cósmico" que viste comprimían este rango de 36 órdenes de magnitud en 10 minutos — literalmente un factor de 10 cada 20 segundos.²⁴ Cada cambio de orden de magnitud es un **cambio de contexto físico radical**. Esto explica por qué los prefijos SI (kilo, mega, giga, tera) son tan poderosos: cada salto representa un cambio cualitativo del universo que observas.

Ejercicio — Distancia en potencias de 10: Un componente electrónico de montaje superficial (SMD) mide aproximadamente 0.5 mm de lado. Un lote agrícola típico tiene 800 m en su lado mayor. Un satélite de posicionamiento GPS, usado en agricultura de precisión, orbita la Tierra a 20 200 km de altura. Expresa las tres distancias con el prefijo SI más apropiado y ordénalas de menor a mayor, indicando cuántos órdenes de magnitud separan el componente SMD del satélite GPS.

Tiempos en el Universo El video "To Scale: TIME" lleva la misma idea de los círculos de Venecia al tiempo: sus creadores construyeron en el desierto de Mojave un modelo físico de la historia del universo con 800 luces separadas 10 metros entre sí, cada una representando un intervalo de tiempo. En esa escala, toda la historia de la civilización humana conocida cabe en el último centímetro del recorrido, y una vida individual es más delgada que el ancho de un cabello.²⁵ La siguiente tabla recorre esa misma escala completa, desde el ciclo de un procesador moderno hasta los $4,4 \times 10^{17}$ segundos que tiene el universo:

Tabla III: Tiempos en el Universo

Reflexión profunda — Dónde estamos en la escala de tiempos:

²⁴Videos recomendados: "Viaje Cósmico" (6:20–17:00, <https://www.youtube.com/watch?v=RJx1LdyPjKg>) y "A escala: El Sistema Solar" (<https://youtu.be/zR3Igc3Rhfg>)

²⁵Overstreet, W. & Gorosh, A. (Canal "To Scale:"). "To Scale: TIME." <https://youtu.be/nOVvEbH2GCO>

Evento/Escala	Tiempo (s)	Orden
Ciclo de computadora moderna	10^{-9}	10^{-9}
Femtosegundo (dinámica atómica)	10^{-15}	10^{-15}
Milisegundo (percepción humana)	10^{-3}	10^{-3}
Segundo	1	10^0
Minuto	60	10^2
Hora	3,600	10^3
Día	86,400	10^4
Año	$3,2 \times 10^7$	10^7
Siglo	$3,2 \times 10^9$	10^9
Desde civilización humana (10,000 años)	$3,2 \times 10^{11}$	10^{11}
Edad de la Tierra	$1,4 \times 10^{17}$	10^{17}
Edad del universo	$4,4 \times 10^{17}$	10^{17}

Cuadro 1.5: Tiempos representativos en el universo, desde el femtosegundo hasta la edad del universo, ordenados por potencias de 10.

El rango es de 10^{-15} s (femtosegundo, reacción atómica) a 10^{17} s (edad del universo). Son **32 órdenes de magnitud**. Pero note algo extraño: tú experimentas el mundo en la escala de **1 segundo** (10^0 s), que está casi en el extremo inferior de lo que vives conscientemente.

¿Qué significa esto?

- **Lo que no percibes:** Abajo de 10^{-3} s (milisegundo), tu cerebro no puede resolver eventos individuales. Los electrones en un átomo oscilan en 10^{-15} s — eso es **billones de eventos por segundo** que suceden sin que los notes.
- **Tu escala natural:** Reaccionas a eventos en 100-500 milisegundos (time to blink). Tu corazón late cada segundo. Duermes horas. Vives décadas. Esto es 10^{-3} a 10^9 segundos — apenas 12 órdenes de magnitud. Es un mundo muy estrecho.
- **Lo que nunca verás:** Arriba de 10^7 s (millones de segundos = décadas), nada en tu experiencia personal. Civilizaciones duran 10^{11} s. La Tierra tiene 10^{17} s de antigüedad. El universo, 10^{17} s. Eso es **16,000 millones de años** — número tan grande que es casi incomprensible.
- **La brecha:** Existe una **brecha de 24 órdenes de magnitud** entre lo más pequeño que mides (femtosegundos en física de partículas) y lo más grande que observas (edad del universo). Tú vives exactamente en el medio de esa brecha.

Implicación crucial: Los prefijos SI (nano, pico, femto para lo pequeño; kilo, mega, giga, tera para lo grande) son tu herramienta para hablar de ese rango insano. Sin ellos, escribirías números tan grandes y pequeños que ningún papel sería lo suficientemente grande.

Aquí es donde la **notación científica y los prefijos SI se vuelven no solo convenientes, sino absolutamente esenciales**. No es un lujo matemático — es la única forma de pensar sobre las escalas del universo.²⁶

Ejercicio — Tiempo en potencias de 10: Un microprocesador moderno de 3 GHz completa un ciclo de reloj cada 0.33 ns. El tiempo de reacción de una persona ante un estímulo visual es de aproximadamente 250 ms. Una semilla de maíz tarda cerca de 6 días en germinar y emerger del suelo. Expresa los tres tiempos en notación científica con el prefijo SI adecuado y ordénalos de menor a mayor, indicando cuántos órdenes de magnitud separan el ciclo del procesador de la germinación de la semilla.

Para profundizar: unidades tradicionales y regionales

Aunque el SI es el sistema internacional oficial, en Europa (incluyendo España) y otras regiones todavía se usan unidades tradicionales en contextos locales, históricos, o en ciertos sectores:

En España y Europa:

- **Vara** (0.83 m) — unidad de longitud usada en construcción y topografía histórica
- **Legua** (5-6 km) — distancias en textos antiguos y regionalismos
- **Arroba** (11-13 kg) — peso de líquidos y sólidos en agricultura
- **Codo, palmo, jeme** — medidas tradicionales aún usadas coloquialmente en algunas regiones

En otros países europeos: cada región tiene sus propias unidades históricas (pulgada francesa, braccio italiano, etc.).

Caso especial — Estados Unidos: A diferencia de casi todos los países industrializados, **Estados Unidos NO ha adoptado oficialmente el SI** en uso cotidiano. En su lugar usa:

- **Milla** (1.609 km) — distancias y velocidad de vehículos
- **Pie** (0.3048 m) y **pulgada** (2.54 cm) — construcción, ingeniería
- **Libra** (0.4536 kg) — peso de personas y productos
- **Grado Fahrenheit** — temperaturas cotidianas

Aunque la ciencia y tecnología estadounidenses usan SI, la población general y muchas industrias (transporte, construcción) siguen usando el sistema imperial/-consuetudinario. Esto causa problemas internacionales: en 1999, la NASA perdió una sonda en Marte porque un equipo usó millas/libras mientras otro usaba SI.^a

²⁶Video recomendado: “To Scale: TIME” — <https://youtu.be/n0VvEbH2GCO>

En el contexto de este curso: usaremos **siempre SI**. Pero es crítico saber que estas unidades existen, especialmente si trabajas con:

- Documentación técnica estadounidense (ingeniería, aviación)
- Especificaciones de productos importados
- Literatura científica histórica
- Agricultura local o especificaciones regionales

La conversión entre estos sistemas y SI se trata en detalle en secciones posteriores.

^a**Caso real documentado:** Mars Climate Orbiter (1999). Error de conversión de unidades costó \$327 millones. El software de navegación usaba newtons; los cálculos de empuje usaban libras-fuerza. Reporte oficial: <https://www.nasa.gov/news/the-mars-climate-orbiter/>

Apéndice: Tabla Completa de Unidades Derivadas

Tabla A1: Magnitudes Geométricas y Angulares

Cantidad	Ecuación	Dimensión	Unidades
Radián	$\theta = s/R$	$[\theta] = 1$	rad
Período	$P = 2\pi\sqrt{L/g}$	$[P] = T$	s
Frecuencia	$f = 1/P$	$[f] = T^{-1}$	Hz
Frecuencia angular	$\omega = 2\pi/P$	$[\omega] = T^{-1}$	rad/s
Área	$A = ab$	$[A] = L^2$	m ²
Volumen	$V = abc$	$[V] = L^3$	m ³

Tabla A2: Densidades

Cantidad	Ecuación	Dimensión	Unidades
Densidad lineal	$\lambda = m/L$	$[\lambda] = ML^{-1}$	kg/m
Densidad superficial	$\sigma = m/A$	$[\sigma] = ML^{-2}$	kg/m ²
Densidad volumétrica	$\rho = m/V$	$[\rho] = ML^{-3}$	kg/m ³

Tabla A3: Cinemática y Dinámica

Cantidad	Ecuación	Dimensión	Unidades
Velocidad	$v = \Delta x/\Delta t$	$[v] = LT^{-1}$	m/s
Aceleración	$a = \Delta v/\Delta t$	$[a] = LT^{-2}$	m/s ²
Fuerza	$F = ma$	$[F] = MLT^{-2}$	N
Torque	$\tau = Fr$	$[\tau] = ML^2T^{-2}$	N·m
Presión	$P = F/A$	$[P] = ML^{-1}T^{-2}$	Pa

Tabla A4: Energía, Potencia y Momentum

Cantidad	Ecuación	Dimensión	Unidades
Trabajo	$W = Fd$	$[W] = ML^2T^{-2}$	J
Energía cinética	$K = \frac{1}{2}mv^2$	$[K] = ML^2T^{-2}$	J
Energía potencial	$U = mgh$	$[U] = ML^2T^{-2}$	J
Potencia	$P = W/t$	$[P] = ML^2T^{-3}$	W
Momentum lineal	$p = mv$	$[p] = MLT^{-1}$	kg·m/s
Momentum angular	$L = rp$	$[L] = ML^2T^{-1}$	kg·m ² /s

Nota de referencia: Esta tabla es de consulta. No necesitas memorizar todas las unidades. Lo importante es entender que cada una viene de una ecuación que relaciona magnitudes base, y que el análisis dimensional permite verificar si tus cálculos son dimensionalmente consistentes.

Preguntas, Ejercicios y Problemas (Generación, No Reconocimiento)²⁷

Pregunta 1.2.1 (Prototipos vs. constantes). Explica por qué fue necesario pasar del Prototipo Internacional del Kilogramo a definiciones por constantes fundamentales. ¿Qué problema resolvía el prototipo y qué nuevo problema creaba?

Ejercicio 1.2.1 (Unidades derivadas). La segunda ley de Newton es $F = ma$. Usando $[m] = \text{kg}$ y $[a] = \text{m/s}^2$, deduce la dimensión de fuerza y define el newton.

Ejercicio 1.2.2 (Validación dimensional). Se propone $v = at^2$ para velocidad. Verifica dimensionalmente. ¿Correcto o incorrecto? ¿Cuál sería la forma correcta?

Ejercicio 1.2.3 (Dimensión de una constante: Ley de Coulomb). La ley de Coulomb describe la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, donde q_1, q_2 son cargas eléctricas ($q = It$, es decir $[q] = [IT]$) y r es la distancia entre ellas. Sabiendo que $[F] = [MLT^{-2}]$, deduce la dimensión de la constante de Coulomb k .

Problema 1.2.1 (Predicción por análisis dimensional). Un objeto en caída libre cae una distancia d que depende solo de aceleración gravitatoria g y tiempo t . Usa análisis dimensional para predecir la forma de d (encuentra los exponentes).

Problema 1.2.2 (Escala agroambientales: del sensor al embalse). Un sensor de humedad de suelo IoT mide volúmenes de agua en la zona radicular con una resolución de 0.5 mL. Un sistema de riego por goteo aplica aproximadamente 2 litros por planta en cada ciclo de riego. Un embalse agrícola de mediana escala, usado para regar cientos de hectáreas, almacena cerca de $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua. Expresa los tres volúmenes en litros, con notación científica y el prefijo SI más apropiado para cada uno, y determina cuántos órdenes de magnitud separan la resolución del sensor de la capacidad del embalse.

Cierre: Autoverificación

¿Puedes responder “sí” a cada uno?

Entiendo la evolución de unidades SI desde prototipos a constantes fundamentales.

Puedo explicar la diferencia entre masa, inercia y peso.

Puedo derivar la dimensión de cualquier unidad derivada común desde ecuaciones fundamentales.

²⁷Producir la respuesta desde cero (resolver, explicar, derivar) genera mayor retención a largo plazo que reconocerla entre opciones ya dadas (opción múltiple) — el efecto de generación, ligado al efecto de evaluación (*testing effect*). Mestre, J. P. & Docktor, J. L. (2020). *The Science of Learning Physics: Cognitive Strategies for Improving Instruction*. Cap. 7.

Puedo verificar si una ecuación es dimensionalmente consistente.

Entiendo los órdenes de magnitud de masas, distancias y tiempos en el universo.

Si respondiste “no” a alguno, revisa esa sección.

Conexión con Laboratorio: Práctica 01

En Práctica 01, medirás cantidades físicas (período de péndulo, distancia de caída, velocidad) y aprenderás:

1. Usar correctamente instrumentos (metros, cronómetros, balanzas).
2. Reconocer precisión inherente de cada instrumento.
3. Reportar resultados con unidades correctas e interpretación física.
4. Verificar que ecuaciones son dimensionalmente consistentes ANTES de calcular.
5. Comparar predicciones teóricas con resultados experimentales.

Referencias

Recursos en Video — SI y Definición de Unidades:

- ▶ [“La Redefinición de las Unidades del Sistema Internacional EXPLICADO.”](#)
- ▶ [“¿Cómo Sabemos que un kilo pesa un kilo? 1. El kilogramo.”](#)
- ▶ [“¿Cómo Sabemos que un metro mide un metro? 2. El metro.”](#)
- ▶ [“¿Cómo sabemos que un kelvin es un kelvin? 3. El Kelvin.”](#)
- ▶ [“¿Cómo sabemos que un amperio ...? 4. El amperio.”](#)
- ▶ [“¿Cómo sabemos cuanto mide un segundo? 7: el segundo.”](#)

Recursos en Video — El Kilogramo (Profundización):

- ▶ [“How We’re Redefining the kg.”](#)
- ▶ [“¿Cuánto Pesa Un Kilogramo?”](#)
- ▶ [“¡El kg ha Muerto! - Redefinición del Kilogramo.”](#)
- ▶ [“El Objeto Más Redondo del Mundo.”](#)

Recursos en Video — Escalas del Universo:

- ▶ [“Viaje Cósmico” \(6:20–17:00\).](#)

- ► “To Scale: TIME.”
- ► “A escala: El Sistema Solar.”
- ► “Añadiendo MATERIA hasta el INFINITO.”

Libros Recomendados:

- Sears, Zemansky, Young, *Física Universitaria*, Vol. 1, Cap. 1.
- Alonso & Finn, *Mecánica y Termodinámica*, Cap. 2.
- Tippens, *Física: Conceptos y Aplicaciones*, Cap. 1.

Recursos Complementarios (Instituciones de Metrología):

- **Lectura:** BIPM (Francia). “The 2019 Redefinition of the SI.”
- **Lectura:** NIST (EE.UU.). “The 2019 Redefinition of the SI Base Units.”
- **Lectura:** NPL (Reino Unido). “SI Units and Dimensional Analysis.”