Anales de Química de la RSEQ
An. Quím. RSEQ, 2026, 122 (2), 155-164
https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2110
La revista de la Real Sociedad Española de Química

ENSEÑANZA QUÍMICA

El sistema de unidades en magnetismo

The system of units in magnetism

Francesc Lloret Pastor[1,2,*] y Rafael Ruiz García[2]

[1] Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Valencia.
[2] Instituto de Ciencia Molecular, Universidad de Valencia.

PALABRAS CLAVE:
Unidades Magnéticas
CGS-EMU
Sistema Internacional
Campos Magnéticos
Magnetización

RESUMEN:
A pesar de que el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el estándar oficial, el sistema CGS-EMU sigue siendo comúnmente utilizado en el campo del magnetismo. La coexistencia de ambos sistemas de unidades genera confusión y errores, tanto a estudiantes como investigadores. El presente artículo describe la historia y evolución de estos sistemas, con objeto de entender esta polémica coexistencia. Se presta un énfasis particular en las unidades magnéticas y los factores de conversión entre ambos sistemas.

KEYWORDS:
Magnetic Units
CGS-EMU
International System
Magnetic Fields
Magnetization

ABSTRACT:
Even though the International System of Units (SI) is the official standard, the CGS-EMU system is still commonly used in the field of magnetism. The coexistence of both systems of units generates confusion and errors, both for students and researchers. In this article we try to describe the history and evolution of these systems, to understand this controversial coexistence. Emphasis is placed on magnetic units and conversion factors between both systems.

Introducción

Un sistema de unidades es un conjunto de unidades diseñado para cubrir una amplia gama de cantidades medibles, incorporando las correspondientes relaciones matemáticas para reducir al máximo el número de unidades base independientes requeridas. Es decir, un conjunto mínimo de unidades básicas a partir de las cuales derivar todas las demás magnitudes. Un sistema de unidades es un elemento esencial en la física y la ingeniería, pues proporciona coherencia a la medición, comparación y comunicación de resultados.

En el campo del magnetismo, a pesar de reconocer que el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el estándar oficial, el sistema CGS-EMU (**c**entímetro-**g**ramo-**s**egundo, donde EMU son las siglas del inglés **e**lectro-**m**agnetic-**u**nits) sigue siendo comúnmente utilizado por parte de muchos investigadores. La coexistencia histórica de ambos sistemas ha generado, y sigue generando, confusión y errores, tanto a estudiantes como investigadores.

Aunque los sistemas de unidades pueden parecer meros convenios administrativos, detrás de ellos late una historia sorprendentemente humana, con debates intensos, filosofías enfrentadas y decisiones políticas complejas que moldearon la forma con que hoy entendemos el mundo físico. En esta breve revisión se describe, de manera pedagógica y coherente, la historia y sus protagonistas, sus decisiones conceptuales, los conflictos entre la física y la ingeniería, y su evolución, desde el sistema CGS, pasando por el sistema MKS (metro-kilogramo-segundo), racionalizado de Giorgi, hasta el SI y su última revisión en 2019; con un énfasis particular en las unidades magnéticas y la problemática coexistencia de ambos sistemas.

Breve historia de los sistemas de unidades: de los orígenes del CGS al SI contemporáneo

La historia de los sistemas de unidades es, en el fondo, la historia de cómo la humanidad aprendió a medir el mundo de forma coherente para poder construir, comerciar y hacer ciencia sin malentendidos… o al menos con menos discusiones.

Los primeros sistemas tenían el cuerpo humano como regla base. En las civilizaciones antiguas, medir significaba comparar con el cuerpo: el codo (antebrazo), el pie, el palmo o el paso. El problema era evidente: no todos los brazos o pies miden lo mismo. Durante la Edad Media, los sistemas de unidades se multiplicaron. Una libra podía significar cosas distintas según la ciudad. La vara, la arroba o el quintal cambiaban de valor de un reino a otro. Esto complicaba el comercio y la adminis-

CÓMO CITAR: F. Lloret, R. Ruiz. *An. Quím. RSEQ* **2026**, 122, 155-164, https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2110

* C-e: francisco.lloret@uv.es

Manuscrito recibido: 01/02/2026 · aceptado: 26/03/2026

tración. Viajar con mercancías implicaba, además de mapas y tablas de conversión, tener mucha paciencia.

A finales del siglo XVIII, la física vivía una especie de "*Torre de Babel*" metrológica. Cada país, e incluso cada laboratorio, usaba sus propias unidades.[1] Los resultados experimentales eran incomparables y las ecuaciones, un mosaico de factores numéricos sin patrón. El verdadero punto de inflexión llegó con la Revolución Francesa y la introducción del sistema métrico decimal (1799). La idea era audaz y elegante: crear un sistema decimal universal basado en la naturaleza, no en reyes ni cuerpos humanos. Así nacieron el metro y el kilogramo como unidades universales de longitud y masa. Por primera vez, la medición empezaba a ser lógica y escalable, algo que la ciencia agradecería enormemente. Sin embargo, su alcance no había llegado aún a la electrodinámica. El nuevo fenómeno de la corriente eléctrica y su conexión con el magnetismo, descubierto por Øersted en 1820 y cuantificada por Ampère, necesitaba su propio marco de medida.

El primer intento serio de sistematización fue obra de Carl Friedrich Gauss y Wilhelm Eduard Weber. En 1832, durante sus investigaciones sobre el magnetismo terrestre, idearon un sistema de unidades puramente mecánico, basado en el centímetro, el gramo y el segundo (el embrión del futuro sistema CGS). El objetivo: toda magnitud electromagnética debía expresarse únicamente en términos de masa, longitud y tiempo. Esto implicaba redefinir carga, corriente, potencial y campo en función de magnitudes mecánicas medibles. En este marco, la fuerza entre dos cargas eléctricas (q_1 y q_2) situadas a una cierta distancia entre ellas (r) podía escribirse sin constantes arbitrarias a través de la ecuación (1). Una forma "pura" de la ley de Coulomb, libre de factores humanos. Así nació la visión naturalista de la metrología física. Un sistema que describiera el universo "como es", no "como lo convenimos".

$$Ley\ de\ Coulomb\ (CGS): F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (1)$$

Mientras Gauss y Weber ponían orden en el laboratorio, James Clerk Maxwell construía el edificio teórico. Entre 1861 y 1865, sus ecuaciones unificaron electricidad, magnetismo y luz (óptica) en un solo cuerpo matemático. Maxwell necesitaba un sistema de unidades coherente que mantuviera la simetría y coherencia de sus ecuaciones.

Los orígenes: la búsqueda de un sistema absoluto (1800–1873)

Durante la primera mitad del siglo XIX, la electricidad y el magnetismo experimentaron una revolución conceptual. Øersted, Ampère, Faraday y finalmente Maxwell transformaron fenómenos dispersos en un conjunto unificado de leyes dinámicas. Sin embargo, el lenguaje dimensional de estas teorías era caótico. La electrostática usaba unas unidades; la electrodinámica, otras; la mecánica, otras; y los laboratorios ingenieriles aplicaban unidades prácticas incompatibles con la física teórica.

Los trabajos de Maxwell (1873) estimularon la necesidad de establecer un sistema absoluto de unidades, tal como el propuesto por Gauss y Weber, esto es, un sistema cuyo núcleo fueran únicamente longitud (L), masa (M) y tiempo (T). Todas las demás magnitudes deberían deducirse de estas.

La base filosófica era doble:

1. Unificación: si electricidad y mecánica son aspectos de un mismo fenómeno físico, sus unidades deben compartir la misma raíz dimensional.
2. Simplicidad formal: las ecuaciones de la naturaleza deberían ser universales e independientes del sistema de unidades.

Fue en este contexto cuando surgió el primer gran sistema coherente de la física moderna: el sistema "cegesimal" CGS.

El sistema CGS: triunfo y tensiones (1873–1900)

En 1873, el mismo año en que James Clerk Maxwell publicó la primera edición de su libro *"A Treatise on Electricity and Magnetism"*, el Comité para la Selección y Nomenclatura de Unidades Dinámicas y Eléctricas, bajo el liderazgo de William Thomson (Lord Kelvin) y científicos como Maxwell, Stoney y Fleeming Jenkin, presentó su primer informe en el cual se recomendaba la adopción del sistema de unidades CGS, a pesar de la oposición de un miembro del Comité, George Johnstone Stoney, quien afirmaba que el centímetro "*es demasiado pequeño*" para ser una unidad práctica para la ingeniería y defendía adoptar el metro. El comité prefirió el CGS antes que el sugerido sistema MGS (metro-gramo-segundo) de Stoney porque tenía la ventaja de hacer que el valor de la densidad del agua fuese prácticamente igual a la unidad (1 g/cm^3 = 10^{-6} g/m^3). No obstante, esta crítica —aparentemente técnica— anticipaba la futura transición al sistema MKS (metro-kilogramo-segundo).

El CGS era un sistema "absoluto", es decir, basado en unidades mecánicas de longitud L, masa M y tiempo T, a partir de ellas se derivan todo el resto de las unidades. Cualquier magnitud, incluida la eléctrica o magnética, debía expresarse como una combinación de centímetros, gramos y segundos. Por ejemplo, las dimensiones para la fuerza: $F = m{\cdot}a = m{\cdot}e/t^2 \rightarrow M{\cdot}L{\cdot}T^{-2}$ (g·cm·s^{-2}). Similarmente, las dimensiones para la carga, según la ecuación de Coulomb (1): $q = [F{\cdot}r^2]^{1/2} \rightarrow M^{1/2}{\cdot}L^{3/2}{\cdot}T^{-1}$ (g$^{1/2}$·cm$^{1/2}$·s^{-1}). Obviamente, se requería acordar nombres para cada uno de estos conjuntos de dimensiones. De esta época datan unidades célebres del sistema CGS, aún presentes en magnetismo: dinas (unidad de fuerza), erg (unidad de energía), gauss (inducción magnética), oersted (intensidad del campo magnético H), etc.

Sin embargo, el electromagnetismo era demasiado rico para un único conjunto; así que surgieron dos ramas o subsistemas del CGS:

1. CGS- ESU (electrostático). Derivado de la ley de Coulomb entre cargas puntuales.
2. CGS- EMU (electromagnético). Derivado de las fuerzas entre corrientes o imanes.

La coexistencia de ambos generó una doble tradición de unidades que pronto se volvería molesta.

Aunque conceptualmente elegante, el CGS tenía tres problemas graves:

1. No era práctico para ingeniería, que necesitaba unidades más grandes.
2. Generaba constantes incómodas, especialmente factores (irracionales) de 4π, omnipresentes en las ecuaciones de Maxwell.
3. Nunca pudo integrar completamente la electricidad y el magnetismo en un único subsistema (coexistencia de ESU y EMU).

Estas limitaciones prepararon el terreno para una reforma profunda

La racionalización: Heaviside (1890–1904) y la cruzada contra el 4π

Uno de los muchos logros de Oliver Heaviside fue la reformulación de las ecuaciones cartesianas de Maxwell en notación de cálculo vectorial compacto. Las ecuaciones de Maxwell contenían incómodos factores 4π, reflejo de la geometría de la esfera en tres dimensiones (el área de una esfera es $4\pi r^2$). Heaviside creía que el factor 4π en las ecuaciones electromagnéticas era simplemente una convención ilógica, y defendió firmemente la racionalización del sistema CGS, es decir, la eliminación del número irracional 4π en la mayoría de las ecuaciones, incluidas las de Maxwell, para las unidades magnéticas. Introdujo así la idea de racionalización, la cual influiría decisivamente en Giovanni Giorgi.

A continuación, se indican las ecuaciones de Maxwell (2) para el campo eléctrico (E) y la inducción magnética (B), racionalizadas y sin racionalizar.

No Racionalizadas	Racionalizadas
$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{J} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

(2)

En las ecuaciones de Maxwell racionalizadas, las constantes ε_0("permitividad del vacío") y μ_0 (permeabilidad del vacío) ya incluyen el efecto del 4π, esto es, el factor 4π se traslada a la definición de unidades, de modo que todas las ecuaciones electromagnéticas quedan simétricas y racionalizadas.[2] El producto de ambas constantes es la inversa del cuadrado de la velocidad de la luz (c) según la ecuación (3).

$$\mu_0\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2} \qquad (3)$$

El sistema MKS de Giorgi: una cuarta unidad entra en escena (1901–1954)

En 1901, el ingeniero italiano Giovanni Giorgi propuso extender el sistema mecánico de tres unidades MKS (metro, kilogramo, segundo) a un sistema tetradimensional, añadiendo una cuarta unidad eléctrica que pudiese vincular a la mecánica y al electromagnetismo. "Si adoptamos una unidad eléctrica independiente —el amperio— las unidades mecánicas y eléctricas pueden coexistir sin constantes arbitrarias" (Giorgi, 1901).[3]

Lo crucial no era qué unidad escoger, si no la filosofía subyacente: las constantes μ_0 y ε_0 no debían fijarse arbitrariamente, si no que debían ser cantidades físicas medibles y no constantes por convenio.

El significado de la permeabilidad del vacío (también llamada constante magnética) μ_0 era fundamental para el sistema de Giorgi, quien enfatizó: "En mi sistema, [μ_0] no es un número, ni asumo ningún valor especial para él; es una cantidad física, que tiene dimensiones, y que debe medirse experimentalmente". Giorgi consideró que tanto μ_0 como ε_0 estaban sujetas al refinamiento experimental, con $\mu_0 \approx 1.256 \times 10^{-6}$ henrios por metro [H/m] y $\varepsilon_0 \approx 8{,}842 \times 10^{-12}$ faradios por metro [F/m], y ambos sujetos a la condición de que $[\mu_0\, \varepsilon_0]^{-1/2}$ fuese igual a la velocidad de la luz $c \approx 3 \times 10^8$ m/s. Su postura rompía con el CGS.[4] El electromagnetismo ya no debía derivarse exclusivamente de L, M y T, sino que requería una cuarta unidad explícita, lo cual fue el preludio del sistema MKSA (**m**etro-**k**ilogramo-**s**egundo-**a**mperio) y finalmente del Sistema Internacional, SI.

Heaviside racionalizó las ecuaciones de Maxwell y Giorgi racionalizó las unidades, el cual veía esta racionalización como un complemento opcional, pero conveniente, a su sistema de cuatro dimensiones. Sin embargo, su propuesta causó resistencia. La oposición al sistema de Giorgi fue liderada por Richard Glaze-Brook, un exalumno y heredero intelectual de Maxwell, que actuaba como presidente de la Comisión de Símbolos, Unidades y Nomenclatura (SUN) de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada. Glazebrook, veía en el MKSA una amenaza para la continuidad del electromagnetismo en CGS, lo cual retrasó la adopción del sistema de Giorgi durante décadas.

Entre 1901 y 1954, una larga serie de organismos internacionales debatieron opciones para la cuarta unidad (ohmio, voltio, culombio, henrio, faradio, weber…). Todas las demás unidades se podrían derivar de estas cuatro mediante las ecuaciones fundamentales. Por ejemplo, la unidad métrica para la carga eléctrica, el culombio (C), se define como la carga transferida por una corriente de un amperio (A) en un segundo [A·s]. En 1946, el Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM) aceptó el amperio como la cuarta unidad.

La definición original del amperio se dio en términos de la fuerza entre dos conductores paralelos, la ley de Ampère (4), donde la fuerza por unidad de longitud $F/l = 2{\cdot}10^{-7}$ N/m, las corrientes I_1 e I_2 = 1A, y la separación d = 1 m.

$$F/l = \mu_0{\cdot}I_1{\cdot}I_2/2\pi d \qquad (4)$$

Esta definición fijaba $\mu_0 = 4\pi{\cdot}10^{-7}$ N/A^2 ≡ $4\pi{\cdot}10^{-7}$ H/m (N = newton y H = henrio). Como veremos más adelante, la definición del amperio en el SI revisado se basará en el valor fijo de la carga elemental del electrón, e, mientras que el valor de μ_0 dependerá del valor de la constante hiperfina, a, de la frecuencia de transición hiperfina del cesio.

Una decisión clave para cambiar el sistema CGS se debía a las cantidades eléctricas y magnéticas. Si se considera que la carga es independiente de la masa, la longitud y el tiempo, la ecuación que describe la fuerza entre dos cargas eléctricas en el vacío debe incluir un constante dimensional k_C que contenga a la nueva unidad de modo que $F = k_C\, q_1q_2/r^2$, donde $k_C = 1/4\pi\varepsilon_0$, con unidades m^{-3}·kg^{-1}·s^4·A^2 (aquí aparece la nueva unidad, A, el amperio). La decisión de representar k_C como $1/4\pi\varepsilon_0$ incluye la opción de colocar el factor 4π en esta ecuación (5) y así evitar la necesidad de hacerlo en las ecuaciones de Maxwell (2).

$$\textit{Ley de Coulomb (MKSA o SI)}: F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2} \qquad (5)$$

Finalmente, en 1954, durante la 10ª Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) se aprobó definitivamente el amperio como la cuarta unidad base, formalizando así el sistema MKSA (metro, kilogramo, segundo, amperio). Con la adición del amperio se podían definir coherentemente las magnitudes electromagnéticas y conservar los valores prácticos usados en la ingeniería eléctrica. El MKSA se convertiría, años después, en el esqueleto del SI.

Nacimiento del Sistema Internacional de Unidades (1960)

Seis años más tarde, en 1960, durante la 11ª CGPM se adoptó oficialmente el nombre: "*Système International d'Unités*" (SI). El nuevo sistema se basaba en siete unidades fundamentales: metro (m), kilogramo (kg), segundo (s), amperio (A), kelvin (K), mol y candela (Cd). Todas las demás unidades podían derivarse mediante productos de potencias enteras de estas. Se había creado, por primera vez en la historia, un sistema universal, coherente, racionalizado y metrológicamente estable. El SI unificaba las unidades magnéticas y eléctricas y utilizaba unidades conocidas como julio, vatio, newton, voltio, ohmio, faradio, etc.… todas ellas derivadas de las siete unidades básicas (por ejemplo, 1 J = 1 kg·m^2·s^{-2}). Este sistema fue generalmente aceptado por los investigadores en la mayoría de las disciplinas científicas.

El SI moderno previo a la revisión cuántica: de 1983 a 2018

En 1983, el SI redefinió el metro fijando la velocidad de la luz a un valor exacto (con nueve cifras significativas): c = 299 792 458 m/s. Esto tuvo una consecuencia: la permitividad del vacío, ε_0, antes experimental, quedó fijada por convenio. Durante décadas, el amperio seguía definiéndose mediante la fuerza entre conductores paralelos y, para que esa definición funcionara, se necesitaba asignar un valor exacto a μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-7}$ N·A^{-2}). Este esquema era funcional, pero no totalmente satisfactorio desde un punto de vista teórico, puesto que las constantes de la naturaleza debían ser medidas y no fijadas por convención.[5]

La gran revolución de 2019: el SI basado en constantes fundamentales

El 16 de noviembre de 2018, la 26ª CGPM (en Versalles) aprobó la mayor revisión del SI desde 1960, la cual entró en vigor el 20 de mayo de 2019 (Día Mundial de la Metrología). A partir de entonces, la constante de Planck (h), la carga elemental (e), la constante de Boltzmann (k) y la constante de Avogadro (N_A) se fijaron con valores exactos y, como consecuencia, el kilogramo, amperio, kelvin y mol fueron redefinidos con base en estos números fijos, respectivamente.[6]

En lugar de que la definición del amperio fijara el valor de μ_0, en esta última revisión de 2019, el SI define el amperio en términos del valor fijo de e (basado en número de electrones por segundo). Como resultado, el valor de μ_0 debe determinarse experimentalmente. Del mismo modo, la permitividad del vacío $\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ también debe determinarse experimentalmente, tal como era antes de que *se* fijara c en 1983. El producto $\mu_0\varepsilon_0 = 1/c^2$ sigue siendo una relación exacta. Era razonable fijar el valor de e en lugar de μ_0. En la década de 1990, el valor del amperio se realizaba mediante la ley de Ohm, mientras que el voltio y el ohmio, como unidades de voltaje y resistencia, se realizaba mediante el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico, respectivamente.

Medición de μ_0 y otras constantes

El valor experimental de la permeabilidad en el vacío, μ_0, se obtiene mediante la determinación experimental de la constante adimensional de estructura fina, α, para la frecuencia de transición del cesio-133, según la ecuación (6), donde la constantes h (constante de Planck), c (la velocidad de la luz en el vacío) y e (la carga elemental del electrón) son valores fijados por convenio desde la redefinición del SI en 2019.

$$(\mu_0)_{exp} = \frac{2h}{c\,e^2}(\alpha)_{exp} \qquad (6)$$

h = 6,626 070 15 × 10^{-34} J s (exacto).

e =1,602 176 634×10^{-19} C (exacto).

c =299 792 458 m/s (exacto).

A partir del valor de α = 7,297 352 5643 × 10^{-3} ± 1.1 × 10^{-12}, basado en el último ajuste cuatrienal de las constantes físicas fundamentales por el Comité de Datos del Consejo de Ciencia Internacional, se obtiene:

$$\mu_0 = \underline{1{,}256\ 637\ 061}\ 262\ 815 \pm 1{,}89\cdot 10^{-6}\ \text{H/m}$$

Esta constante, curiosamente muy próxima a 1/137, recibe varias interpretaciones según el campo de la física que la define (física teórica, física de alta energía, cosmología o electrodinámica cuántica), puesto que puede medirse de muchas modalidades.[7]

Comparemos con el valor anterior fijado históricamente por el SI antes de 2019:

$$\mu_0^{(ant.)} = 4\pi \times 10^{-7} = \underline{1{,}256\ 637}\ 061\ 435\ 9173\cdot 10^{-6}\ \text{H/m}$$

La diferencia entre el valor calculado y el antiguo es

$$\Delta\mu_0 = \mu_0 - \mu_0^{(ant.)} \approx -1.73 \times 10^{-16}\ \text{H/m}$$

Es decir, una diferencia relativa de ≈ −1.38 × 10^{-10} (≈ −0.14 partes por mil millones). Esa desviación queda dentro de la incertidumbre de μ_0.

En definitiva, el valor medido actual de μ_0 es prácticamente igual al antiguo valor definido (exacto) de $4\pi \times 10^{-7}$ dentro de la incertidumbre ligada a la constante de estructura fina α. Esto restauró la visión original de Giorgi de 1901. Más de un siglo después, la filosofía original de Giorgi había triunfado.

El hecho de que μ_0 sea un valor experimental (variable por medición) implica que los factores de conversión entre SI y EMU ya no son exactamente equivalentes y varían con el nuevo valor de la nueva medición. No obstante, en la práctica la diferencia es insignificante, del orden de 10^{-9}; esto es mucho menor que la incertidumbre total en cualquier medición magnética.[8]

La frecuencia de transición hiperfina del cesio-133, $\Delta\nu_{cs}$, expresada en hertzios, Hz, se fijó para definir al segundo desde 1967. La eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540 × 10^{12} Hz, K_{cd}, y la velocidad de la luz en el vacío, c, también se fijaron por la CGPM, para definir las unidades candela y metro, en 1979 y 1983, respectivamente, junto con la constante de Boltzman, k, y el número de Avogadro, N_A.[9]

$\Delta\nu_{cs}$ = 9 192 631 770 *Hz* (exacto).

K_{cd} = 683 lm/W (exacto).

k = 1,380 648× 10^{-23} J/K (exacto).

N_A = 6,022 140 8 × 1023 mol^{-1} (exacto).

Una constante importante en magnetismo es el Magnetón de Bohr, ecuación (7a), donde m_e es la masa del electrón, la cual no está fijada, por lo que μ_B dependerá de su medición. Ésta se determina experimentalmente a partir de la constante de Rydberg, R_∞, y α, ecuación (7b).

$$\mu_B = eh/4\pi m_e \quad (7a)$$

$$m_e = 2hR_\infty / c\alpha^2 \quad (7b)$$

Los campos magnéticos y sus unidades

Podemos definir tres términos o vectores magnéticos para describir la magnetización de un material:

H = Campo magnético aplicado mediante imanes permanentes o bobinas eléctricas (electroimanes), etc.

M = Magnetización del medio o del material bajo el campo magnético.

B = Inducción magnética o densidad de flujo magnético. También lo denominaremos, en el presente artículo, como campo magnético total, ya que comprende al aplicado (o externo, H) y al generado por la magnetización, M, inducida por H.

Breves consideraciones conceptuales

Cuando se aplica un campo magnético, H, a un material, éste responde produciendo un campo magnético (ΔH) inducido, la magnetización, M. Esta magnetización es una medida del momento magnético por unidad de volumen de material, aunque también se puede expresar por unidad de masa. El campo magnético que se aplica al material se llama campo aplicado (H). Un parámetro importante es la inducción magnética (B), que es el flujo total de líneas de campo magnético que atraviesa un área de sección transversal unitaria del material.[10] Estas líneas de fuerza corresponden tanto al campo magnético aplicado, H, como a las que se generan por la magnetización del material presente, M, lo que nos permite escribir la relación:

$$B \equiv H + M \qquad (8)$$

En la Figura 1 se esquematizan todos estos hechos. En 1a, se representa una esfera imaginaria en el vacío entre dos polos de un imán. El número de líneas que pasan por esa unidad de volumen representa la intensidad del imán, el campo H. En 1b y 1c se ha reemplazado la esfera imaginaria por una que contiene un material, pudiendo observar como la magnetización del material, M, deforma las líneas del campo magnético: incrementando el número de líneas que atraviesan la esfera (1b) o disminuyéndolo (1c). Esto es, incrementando el campo magnético ($\Delta H > 0$) en el interior del material, $B > H$, o disminuyéndolo ($\Delta H < 0$), $B < H$. En el primer caso se trata de un material paramagnético, mientras que en el segundo se trata de uno diamagnético. Esta variación ΔH dentro del material es la magnetización del mismo, $M = \Delta H$.

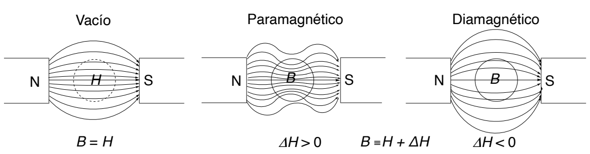


Figura 1. Visualización del campo aplicado H (izquierda) en función del número de líneas por unidad de volumen (esfera imaginaria) y de la inducción magnética B en presencia de materiales para- y diamagnéticos (ver texto).

En este sentido, la inducción magnética, B, la podemos considerar como el campo magnético total dentro del material o campo interno, el cual es el que realmente soporta el material. Por esta razón, es bastante común referirse a la inducción magnética como el campo B. Obviamente, en el vacío (en ausencia de material, $M = 0$), B y H coinciden numéricamente, aunque tengan diferentes unidades. De hecho, la inducción magnética, B, tiene las unidades gauss, G, y Tesla, T, (1T = 10^4 G) en los sistemas CGS y SI, respectivamente. Mientras que, para el campo H usamos las unidades oersted, Oe, y amperios/metro, A/m, (1Oe = 79,58 A/m) para el CGS y SI, respectivamente. Estas últimas unidades crean cierta sorpresa y confusión. Ello se debe a las dos formas de crear o definir teóricamente el campo magnético, H. En el sistema CGS es creado por *polos magnéticos ficticios*, mientras que, en el SI lo crea una *corriente eléctrica*. La relación entre *el polo magnético* y *la corriente eléctrica* solo afecta al sistema de unidades. En el caso del SI, se considera un bucle o espira de radio R y corriente I (Figura 2a).

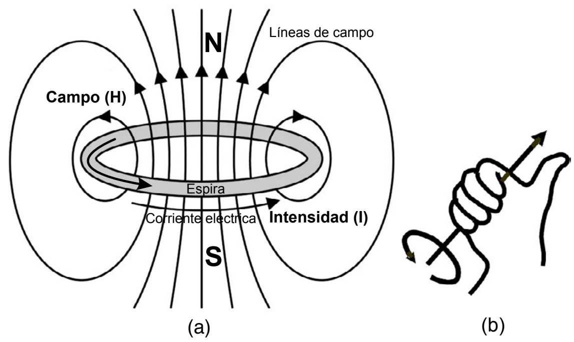


Figura 2. (a) Una espira con corriente eléctrica de intensidad I creando líneas de campo magnético perpendiculares al plano de esta y pasando por el centro de la espira. (b) Regla de la mano derecha con el pulgar indicando la dirección del campo y el resto de los dedos indicando la dirección de la corriente.

Como resultado, se produce un campo magnético, H, en el centro del bucle, dado por la ecuación (9), y un momento magnético, μ, dado por la ecuación (10). Por lo que, las unidades de H en el SI son A/m, y la del momento magnético A·m^2.

$$H = I/2\pi R \text{ [Amperios/metro, A/m]} \qquad (9)$$

$$m = I{\cdot}\acute{A}rea \text{ [A·m}^2\text{]} \qquad (10)$$

Magnetización y susceptibilidad magnética

La intensidad de la magnetización, M, es el momento magnético por unidad de volumen (magnetización volúmica). Este momento magnético total es la suma vectorial de todos los posibles momentos magnéticos por metro cúbico dado por la ecuación (11a). Los momentos magnéticos surgen de las corrientes circulantes, las cuales las podemos imaginar como pequeñas espiras de tamaño atómico con sus electrones orbitando en el interior del material. De forma análoga a la Figura 2a, el momento es normal al plano del bucle y en una dirección tal que el campo H generado por la corriente pasa a través del bucle de acuerdo con la regla de la mano derecha (Figura 2b).

$$M = \frac{(\sum_i \mu_i)}{\text{unidad de volumen}} = \frac{\mu}{V} \text{ [A/m]} \qquad (11a)$$

En el sistema SI, las unidades de la magnetización volúmica son [A·m^2] por metro cúbico (A·m^2/m^3 = A / m), lo mismo que el del campo magnético H. Los investigadores rara vez conocen los volúmenes de sus muestras, por lo que en general usan sus masas. Por esta razón, la magnetización por unidad de masa M_m es más útil.[11] Se obtiene dividiendo la magnetización volúmica, $M = M_v$, por la densidad, ρ, de la muestra expresada en unidades del SI, kilogramos por metro cúbico, ecuación (11b).

$$M_m[\text{A m}^2\text{ kg}^{-1}] = \frac{M_v\ (\text{A m}^{-1})}{\rho\ (\text{kg m}^{-3})} \qquad (11b)$$

Se puede obtener la magnetización molar, M_{mol}, multiplicando la magnetización másica por el peso molecular, PM, del compuesto (11c).

$$M_{mol}\text{ [A m}^2\text{ mol}^{-1}] = M_m(\text{A m}^2\text{ kg}^{-1}) \cdot PM(\text{kg mol}^{-1}) \qquad (11c)$$

Obviamente, cuanto mayor sea el campo externo aplicado, H, mayor magnetización, M, del material. En caso de querer caracterizar las propiedades de magnetización de los compuestos es importante eliminar la dependencia del campo

https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2110

aplicado dividiendo la ecuación (8) por *H*. Obtenemos así la ecuación (12a), donde la relación *M/H* se denomina susceptibilidad magnética, χ, ecuación (12b), y *B/H* es la permeabilidad magnética, κ,(12c). Tanto la permeabilidad como la susceptibilidad nos indican la capacidad del medio en magnetizarse, lo cual afecta a *B* pero no a *H*.

$$\frac{B}{H} \equiv 1 + \frac{M}{H} \quad (12a) \qquad \chi = \frac{M}{H} \quad (12b) \qquad \kappa = \frac{B}{H} \quad (12c)$$

La susceptibilidad magnética, χ, suele ser la cantidad primaria medida para un nuevo compuesto. La susceptibilidad volúmica se define como la relación entre la magnetización volúmica de la muestra y el campo *H* aplicado, en el límite de un campo muy pequeño, ecuación (13a):

$$\chi_v = lim_{H\to 0}\frac{M_v}{H} \text{ (adimensional)} \qquad (13a)$$

La susceptibilidad volúmica es adimensional porque las unidades de la magnetización volúmica, M_v, y el campo magnético, *H*, son las mismas (ecuaciones 9 y 11a). Sin embargo, en el laboratorio, medimos la magnetización en unidades de masa y calculamos la magnetización por mol, por lo que las correspondientes susceptibilidades másica y molar se definen según (13b) y (13c) en el SI, cuyas unidades son las de la inversa de la densidad y del volumen molar, respectivamente.

$$\chi_m[\mathrm{m^3\ kg^{-1}}] = lim_{H\to 0}\frac{M_m}{H} \qquad (13b)$$

$$\chi_{mol}[\mathrm{m^3\ mol^{-1}}] = lim_{H\to 0}\frac{M_{mol}}{H} \qquad (13c)$$

La permeabilidad κ (también representada por μ) relaciona *B* y *H*, ecuación (12c), y tiene las mismas unidadesque la permeabilidad en el vacío, μ_0, [henrios/metro, H/m].

Es interesante observar la conexión entre las unidades magnéticas del SI y la energía. Un momento magnético, μ, en presencia del campo *B*, experimenta una fuerza que tiende a alinear al momento paralelamente al campo. La energía *U* de interacción entre el momento, μ, y el campo, *B*, viene dada por la ecuación de Zeeman (14), siendo la energía mínima cuando el momento y el campo son paralelos.

$$U = -\mu \cdot B \qquad (14)$$

A partir de esta ecuación podemos observar que las unidades del momento μ [A·m²] también pueden expresarse como la relación entre la energía y el campo ($\mu = U/B$), un julio por tesla: [$\mathrm{A{\cdot}m^2 = J/T}$].

Analicemos brevemente las unidades de los parámetros anteriores en el sistema CGS-EMU. En la ecuación (15) se indican las magnetizaciones volúmica, másica y molar, respectivamente, las cuales se determinan mediante el mismo procedimiento utilizado anteriormente para el SI, con los siguientes resultados:

$$M_v[\mathrm{emu\ cm^{-3}}] = \frac{(\sum_i \mu_i)}{\text{unidad de volumen}} = \frac{\mu}{V} \qquad (15a)$$

$$M_m\ [\mathrm{emu\ g^{-1}}] = M_v\ (\mathrm{emu\cdot cm^{-3}}) / \rho(\mathrm{g\cdot cm^{-3}}) \qquad (15b)$$

$$M_{mol}[\mathrm{emu\ mol^{-1}}] = M_m(\mathrm{emu\cdot g^{-1}}){\cdot}PM(\mathrm{g\cdot mol^{-1}}) \qquad (15c)$$

En el sistema CGS, es bastante habitual expresar la magnetización volúmica en unidades de [emu/cm³]. Esta es una nomenclatura desafortunada, ya que induce a creer que el [emu] es la unidad del momento magnético en el CGS-EMU, y no lo es. Tan solo se quiere indicar que la magnetización se da en el sistema EMU, con el cm³ identificando que se trata de la magnetización volúmica. Del mismo modo, las magnetizaciones másicas y molares en unidades CGS se escriben comúnmente como "emu·g⁻¹" y "emu·mol⁻¹", respectivamente, o también como "cm³·g⁻¹·G" y "cm³·mol⁻¹·G". Compárense con las del SI (ecuaciones 11a-c). Alternativamente, la magnetización molar es comúnmente expresada en Magnetones de Bohr, μ_B, según la equivalencia: $\mu_B = 5585\ \mathrm{cm^3{\cdot}mol^{-1}{\cdot}G}$, la cual se obtiene al sustituir los valores de las constates del sistema CGS en la ecuación (7a).

La unidad del momento magnético en el CGS la podemos determinar a partir de la ecuación de Zeeman (14). Esto es $\mu = U/B$ [ergios/G], la cual es 1000 veces más pequeño que la unidad del momento en el SI [A·m²] o [J/T] tal como se indica en (16).

$$1\frac{\mathrm{erg}}{\mathrm{G}} = \frac{10^{-7}\mathrm{J}}{10^{-4}\mathrm{T}} = 10^{-3}\mathrm{A\ m^2} \qquad (16)$$

Es interesante observar la ecuación (10), que define el momento como producto de las corrientes por el área (*intensidad·área*), y preguntarse ¿se obtiene el mismo resultado para los sistemas CGS y SI según esta definición? Rápidamente nos damos cuenta de que $1\ \mathrm{A{\cdot}cm^2} \neq 10^{-3}\ \mathrm{A{\cdot}m^2}$, puesto que $1\ \mathrm{m^2} = 10^4\ \mathrm{cm^2}$. La desigualdad surge porque la unidad de corriente CGS-EMU no es el amperio, sino el "abamperio", igual a 10 amperios.[1] Este ejemplo revela una grave desventaja del sistema gaussiano; sus unidades para variables eléctricas CGS-ESU (carga, corriente, voltaje y resistencia, las cuales no vamos a discutir aquí) son todas diferentes de las unidades SI en el uso diario.[12] Por lo tanto, la magnetización volúmica CGS tiene unidades de [erg G⁻¹ cm⁻³], generalmente expresadas como [emu/cm³].

Las susceptibilidades másicas y molares se definen en términos de M_g y M_{mol} como anteriormente.

$$\chi_m\ [\mathrm{cm^3\cdot g^{-1}}] = lim_{H\to 0}\frac{M_m}{H} \qquad (18a)$$

$$\chi_{mol}\ [\mathrm{cm^3\cdot mol^{-1}}] = lim_{H\to 0}\frac{M_{mol}}{H} \qquad (18b)$$

Las unidades para las susceptibilidades másicas y molares son una vez más las de la inversa de la densidad y del volumen molar, respectivamente, tal como se puede observar para las correspondientes susceptibilidades del SI [ver ecuación (13)].

Relaciones entre B, H y M

Se han propuesto dos expresiones para la inducción magnética *B* en un medio polarizable. La de Arnold Sommerfeld (1948)

[1] El CGS se subdividió en dos subsistemas: CGS-EMU (preferido en estudios electromagnéticos y materiales magnéticos) y CGS-ESU (usado históricamente para cálculos de electrostática). Las unidades eléctricas del sistema EMU contienen al prefijo "ab", de absoluto –abamperio (o Biot), abVoltio, abCulombio, etc.– mientras que las del ESU conllevan el prefijo "estat", de estático –estatamperio (o Franklin), estatVoltio, etc.–. El factor de conversión entre estas unidades es el valor de la velocidad de la luz, $c \approx 3{\cdot}10^{10}$ cm/s, por lo que son unidades con varios órdenes de magnitud diferente: 1 abA = c·1 estatA, 1 abV = (1/c)·1 estatV, 1 abC = c·1 estatC, etc. Su conversión al SI es: 1 abA = 10 A, 1 abV = 10^{-8} V, 1 abC = 10 C.

definido según ecuación (17) y la de Arthur Kennelly (1936), definido según ecuación (18). Mientras que la convención de Sommerfeld ha sido adoptada por la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP) y generalmente usada en el sistema CGS, la de Kennelly es seguida tradicionalmente por los ingenieros eléctricos y usada en el SI.

$$B = H + 4\pi M \; ; [B \rightarrow G, H \rightarrow Oe, M \rightarrow emu/cm^3] \quad (17)$$

$$B = \mu_0(H+M) \; ; [B \rightarrow T, H \rightarrow A/m, M \rightarrow A/m] \quad (18)$$

En el SI, la constante μ_0 (permeabilidad del vacío) es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ henrios/m. La unidad de B es el tesla, por lo que $\mu_0 H$ y $\mu_0 M$ vienen en teslas.

En el sistema CGS, μ_0 es igual a la unidad, lo que hace que B, H y M sean numéricamente equivalentes (ecuación 17); sin embargo, cada uno mantiene diferentes unidades: Gauss, Oersted y emu/cm^3 (o erg/G·cm^3), respectivamente.

Aquí radica gran parte de la confusión, porque en CGS, B y H se usan indistintamente, y es bastante común encontrar artículos de investigación con el hecho incorrecto de asignar la unidad gauss a H (o su equivalencia en teslas). Sin embargo, dado que numéricamente son iguales, el error es solo conceptual y no genera confusión respecto a los cálculos.

En el caso del sistema SI las conversiones de unidades dan valores numéricamente diferentes. Por ejemplo, el campo de la tierra es 0,4 Gauss o 0,4 Oe. Sin embargo, en SI tenemos:

Para B: 0,4 G (CGS)= $4 \cdot 10^{-5}$ T (SI)

Para H: 0,4 Oe (CGS)= 31,8 A/m (SI)

Como se puede ver en este ejemplo, B y H nos dan el mismo valor en el sistema CGS, mientras que en el SI los valores son diferentes. Además, es mucho más fácil convertir gauss a tesla (moviendo el punto decimal 4 lugares) que convertir Oersted a A/m. Por lo tanto, no es demasiado sorprendente que esta sea la práctica habitual utilizada por los investigadores en magnetismo para expresar todos los campos (B y H) en tesla o gauss.

Tabla 1. Principales unidades para los sistemas CGS y SI con su factor de conversión. (A= amperio; cm = centímetro; emu = unidad electromagnética; g = gramo; kg = kilogramo; m = metro; H = henry; T = Tesla; G = gauss; Wb = weber; Mx = maxwell; erg = ergio; J = julio; N = newton)

Termino Magnético	Símbolo	CGS	SI	Factor de conversión CGS → SI
Inducción Magnética	B	G	T Wb/m^2	10^{-4}
Campo Magnético	H	Oe	A/m	$(10^3/4\pi)^b$
Magnetización Volúmica	$M=M_v$	erg/G· cm^3 (emu/cm^3)‖	A/m J/T·m^3	10^3
Magnetización Volúmica	$4\pi M$	Gauss (G)	A/m	$(10^3/4\pi)^b$
Magnetización Másica	M_m	emu/g	A·m^2/Kg Wb·m/Kg	1 $4\pi\ 10^{-7}$
Momento Magnético	μ	erg/G (emu)‖	A·m^2 J/T	10^{-3}
Polarización Magnética	$J = \mu_0 M$	G	T Wb/m^2	10^{-4}
Susceptibilidad Volúmica	c_v	Adimensional (emu/cm^3)	Adimensional H/m= Wb/A·m	4π $(4\pi)^2\ 10^{-7}$
Susceptibilidad Másica	c_m	cm^3/g‖ (emu/g)	m^3/Kg H·m^2/Kg	$4\pi\ 10^{-3}$ $(4\pi)^2\ 10^{-10}$
Susceptibilidad Molar	c_{mol}	cm^3/mol‖ (emu/mol)	m^3/mol H·m^2/mol	$4\pi\ 10^{-6}$ $(4\pi)^2\ 10^{-13}$
Permeabilidad	k	Adimensional (emu) ‖	H/m Wb/A·m N/A^2	$(4\pi \cdot 10^{-7})^b$
Flujo magnético	Φ	Mx G·cm^2	Wb T m^2 = V·s	10^{-8}

‖ El término "emu" es una indicación del sistema CGS-EMU y no es una unidad en el sentido convencional. Algunas veces se usa como momento magnético (emu = erg/G) y otras toma las dimensiones de volumen (emu = cm^3). [b] Para el cálculo del factor de conversión se ha usado el valor de $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m = $4\pi \cdot 10^{-7}$ Wb/A·m. Sin embargo, puesto que desde 2019 μ_0 es un valor experimental, el factor de conversión debería contener su valor, $\{\mu_0\}$. En este sentido el factor de conversión para las siguientes magnitudes sería: permeabilidad, $k \rightarrow [\{\mu_0\}$H/m]; campo magnético, $H \rightarrow [10^{-4}/\{\mu_0\}$ A/m] y magnetización volúmica, $4\pi M \rightarrow [10^{-4}/\{\mu_0\}$ A/m], donde $\{\mu_0\}$ se refiere sólo al valor numérico de μ_0 (sin unidades).

En realidad, cuando se indica un campo magnético aplicado de, digamos, 0,1 T, realmente se quiere decir $\mu_0 H$ = 0,1 T en el SI. Sin embargo, esto rara vez se indica. Nótese que, en el SI, *B* y *H* tienen dimensiones y valores numéricos diferentes (tesla y A/m, respectivamente); pero *B* y $\mu_0 H$ (tesla) sí tienen las mismas dimensiones, dado que $\mu_0 \equiv$ H/m $\equiv$ N/A^2.

El producto $\mu_0 M$ se denomina polarización magnética, también denominada intensidad de la magnetización (expresada en tesla) y se representa por la letra *J* (=$\mu_0 M$), por lo que la expresión (18) se escribe a veces como (19).

$$B = \mu_0 H + J \qquad (19)$$

Ambas convenciones (ecuaciones (17-19)) no presentan conflicto si se reconoce que la magnetización, *M*, y la polarización magnética, *J*, son magnitudes diferentes, aunque son la misma en el sistema CGS.

A partir de la ecuación (17), vemos que la magnetización volúmica también tiene las unidades de oersted (como *H*), por lo que 1 Oe = 1 erg G^{-1} cm^{-3} = 1 emu cm^{-3}. Sin embargo, también se puede observar que $4\pi M$ tiene la unidad de gauss (como *B*). Esta heterogeneidad de unidades no ocurre en el sistema SI, ecuación (18).

Tal como hemos indicado en la ecuación (12c), otro parámetro que demuestra el tipo de material magnético y su afectación por el campo magnético es la permeabilidad (κ) de un material. Al dividir las ecuaciones (17) y (18) por el campo aplicado, *H*, como en (12a), obtenemos las ecuaciones (20) y (21), respectivamente, para la permeabilidad magnética, κ, pudiendo observar su relación directa con la susceptibilidad.

$$\kappa(CGS) = 1 + 4\pi\chi_{CGS} \qquad (20)$$

$$\kappa(SI) = \mu_0(1 + \chi_{SI}) \qquad (21)$$

En el sistema CGS, la permeabilidad tiene las mismas unidades que la susceptibilidad (adimensional); mientras que, en el SI tiene las mismas unidades que μ_0 $\left(\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{M}} \equiv \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \equiv \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{A{\cdot}m}}\ \text{con Wb} = \text{weber}\right)$. Todo lo anterior queda resumido resumido en la Tabla 1.[5]

Algunas consideraciones sobre la equivalencia entre sistemas

Tal como se indica en la Tabla 1, las unidades para medir el flujo magnético, Φ, [el cual es el producto de la densidad de flujo magnético, *B*, y área, A: $\Phi = B{\cdot}A$] es la unidad weber (Wb) en el SI y el maxwell (Mx) en el sistema CGS. El factor para convertir Wb en Mx es de 10^8, porque el flujo es el producto de la densidad de flujo y el área, y el área es el cuadrado de la unidad de distancia y por lo tanto 10^4 (el cuadrado de 10^2, factor de conversión de distancia lineal, *i.e.*, metros en centímetros) y por 10^4 por la conversión tesla en gauss.

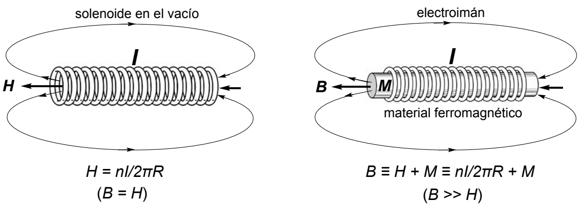
Nótese que, el factor de conversión entre la susceptibilidad del SI y del CGS, además de las potencias de 10 que surgen de la conversión de unidades base (1 cm^3·mol^{-1} = 10^{-6} m^3·mol^{-1}), aparece el factor 4π, debido a la existencia de este factor en la ecuación (17) y su ausencia en la ecuación (18). Por esta razón, en el sistema CGS, la susceptibilidad molar en unidades de cm^3·mol^{-1} es igual a $4\pi{\cdot}10^{-6}$ veces la susceptibilidad molar del SI, ecuación (22).

$$\chi_{mol}(\mathrm{cm^3{\cdot}mol^{-1}}) = 4\pi{\cdot}10^{-6}\ \chi_{mol}(\mathrm{m^3{\cdot}mol^{-1}}) \qquad (22)$$

Terminamos esta sección indicando las siguientes sugerencias: (a) aquellos autores que ven un inconveniente expresar el campo magnético, *H*, en A/m, podrían usar teslas si el campo lo expresan como el producto $\mu_0 H$. (b) Similarmente, pueden usar teslas para la magnetización, *M*, si esta se expresa como $\mu_0 M$ o como polarización magnética, *J*. En ambos casos se puede transformar teslas en gauss (1 T = 10^4 G).

Diferencias entre H y B

La intensidad del campo magnético (campo aplicado), *H*, y la inducción magnética, *B*, son conceptos relacionados pero distintos en electromagnetismo. Tal como indica la ecuación (12c) la relación *B/H* se denomina permeabilidad magnética, κ, la cual está relacionada con la susceptibilidad mediante las ecuaciones (20) y (21). En general, la susceptibilidad de los paramagnéticos habituales (a temperaturas no muy bajas) es pequeña ($\chi \ll 1$), por lo que, en el sistema CGS, $\kappa \to 1$, con lo que *B* y *H* presentan valores similares, aunque conceptualmente diferentes (en el SI, $\kappa \to \mu_0$, y $B \approx \mu_0 H$). Sin embargo, *B* y *H* pueden ser muy diferentes a temperaturas extremadamente bajas o en presencia de materiales ferromagnéticos. Como ejemplo, la Figura 3a muestra un solenoide de *n* espiras de radio *R* e intensidad *I* en el vacío, el cual crea el campo magnético *H*. En la Figura 3b se ha introducido un material ferromagnético (como un cilindro de hierro), el cual presenta una magnetización, *M*, que puede superar con creces al propio campo *H*, generando un campo total *B* muchísimo más grande que el aplicado *H*. En esta idea se basa la construcción de potentes electroimanes.



(a) (b)

Figura 3. (a) Campo *H* generado por un solenoide en el vacío. (b) Campo *B* generado por un electroimán usando el mismo solenoide que (a) y un material ferromagnético (ver texto).

A continuación, se revisan y comparan algunos conceptos implicados.

Intensidad del campo magnético (H)

(a) Representa la fuerza que genera un campo magnético en un punto dado.

(b) En el sistema SI, se mide en Amperios por metro (A/m), mientras que en el sistema CGS se mide en Oersted (Oe).

(c) En el sistema SI, se define en términos de corriente, como en un solenoide largo con *n* vueltas por metro y una corriente de *I* amperios (Figura 1a y 3a).

(d) En el sistema CGS, se define en términos de monopolos magnéticos teóricos.

Densidad de flujo magnético (B)

(a) Representa la cantidad de flujo magnético que atraviesa una unidad de área perpendicular al campo (suma del efecto de todos los campos presentes, *M* y *H*).

(b) En el sistema SI, se mide en tesla (T), mientras que en el sistema CGS se mide en gauss (G).

(c) En el sistema SI, se relaciona con H y la magnetización (M) mediante la ecuación $B=\mu_0(H+M)$.

(d) En el sistema CGS, la relación es $B=H+4\pi M$.

¿Son B y H lo mismo en el vacío?

En el sistema CGS-EMU, B es lo mismo que H en el vacío, tanto dimensional como numéricamente, a pesar de que se les asignan nombres de unidades diferentes (gauss para B y oersted para H), puesto que $M = 0$ en el vacío (ecuación 17).

En el SI, $B=\mu_0 H$ en el vacío ($M = 0$, ecuación (18)), con lo que antes de 2019, con μ_0 fija, la relación era exacta. En cambio, con el SI revisado (después de 2019), μ_0 es experimental; por tanto, la relación es conceptualmente distinta. B es el campo físico fundamental asociado a fuerzas sobre cargas en movimiento, mientras que H es un campo auxiliar definido operativamente mediante materiales y circuitos. En ausencia de materia (en el vacío), ambos describen el mismo fenómeno físico (el mismo campo), aunque con distintas convenciones dimensionales. Tal como defendía Birge (1935), *"Las dimensiones no determinan la naturaleza de una cantidad física; definen nuestro modo de describirla"*.

El magnetismo: el "antisistema"

Aunque el SI ha triunfado casi por completo en muchos campos de la física y la ingeniería, el magnetismo sigue siendo una excepción notable, donde el sistema de unidades electromagnéticas (EMU) de centímetros-gramos-segundo (CGS), tal como lo formularon William Thomson, James Clerk Maxwell y otros, sigue siendo de uso bastante común para la expresión de datos magnéticos. Si comparamos el centímetro y el gramo del sistema CGS con el metro y el kilogramo del sistema SI (100 y 1000 veces más grandes, respectivamente) no es de extrañar que los factores de conversión entre ambos sistemas sean de varios órdenes de magnitud. Por ejemplo, la fuerza tiene las dimensiones de masa·longitud/tiempo, por lo que en el CGS la unidad de fuerza, la dina, es $1000 \times 100 = 10^5$ veces más pequeña que el Newton, la unidad de fuerza en el SI. La unidad de energía en el CGS es el ergio, una dina por cm, por lo que es $10^5 \times 10^2 = 10^7$ veces más pequeña que el julio, la unidad de energía en el SI. Todo lo cual, produce una cierta incomodidad trabajar con unos números tan pequeños, por lo que los investigadores en magnetismo consideraban al SI, en palabras de **Olivier Kahn**: *"El SI es el sistema legal, pero la legalidad no es ciencia. De hecho, este sistema es particularmente inapropiado en el magnetismo molecular y, como la mayoría de los investigadores involucrados en este campo, preferimos usar el sistema CGS-EMU"* (Olivier Kahn, 1999).[13] Esta resistencia al SI persiste en algunos ámbitos actualmente.

Convivencia conflictiva: SI *vs.* CGS-EMU

Esta persistencia del magnetismo en el sistema CGS-EMU se debe a una combinación de factores históricos, filosóficos y prácticos relacionados con la tradición y la comodidad percibida en el manejo de datos magnéticos. Algunos de ellos se indican a continuación.[14]

Razones históricas: El magnetismo ha usado el CGS durante más de un siglo (≈1870–1970). Toda la teoría electromagnética —desde Maxwell hasta Landau y Lifshitz— se formuló en unidades CGS. En este sistema los campos B y H tienen la misma dimensión y se expresan en unidades familiares (gauss y oersted, respectivamente). Muchísimos artículos clásicos, tablas y parámetros de materiales magnéticos se publicaron en CGS. Cambiar al SI implica retraducir medio siglo de conocimiento acumulado, algo poco práctico para comunidades muy consolidadas.

Simplicidad matemática en magnitudes magnéticas: En el sistema CGS-EMU, las relaciones fundamentales del magnetismo son más "sencillas". Los investigadores en magnetismo siguen valorando la simplicidad conceptual de la relación $B = H + 4\pi M$ dentro del marco CGS. Aquí, todas las magnitudes (B, H, M) tienen la misma dimensión, y χ (susceptibilidad) es adimensional. En cambio, en el SI, en la ecuación $B = \mu_0(H + M)$ aparece μ_0 (con unidades) y, por tanto, las magnitudes tienen diferentes dimensiones: B (tesla = $N{\cdot}A^{-1}{\cdot}m^{-1}$), H y M ($A{\cdot}m^{-1}$). Es decir, en el CGS-EMU, la magnetización y el campo se comparan directamente, mientras que en el SI hay que pasar a través de μ_0.

Magnitudes más accesibles: En magnetismo del estado sólido los valores de magnetización en CGS suelen ser del orden de centenas o miles de gauss, lo que resulta numéricamente cómodo. En cambio, en el SI, esas magnitudes se convierten en valores con muchos ceros o exponentes. Por ejemplo, la imanación de saturación del hierro en el CGS es 1.700 G, mientras que en el SI es $\approx 1{,}7\ T/\mu_0 \approx 1{,}36{\cdot}10^6$ A/m. Esta diferencia dimensional hace que se prefiera seguir usando gauss y oersted.

Calibrado de instrumentación: Muchos instrumentos de laboratorio (magnetómetros, susceptímetros, etc.) históricamente se calibraron en unidades CGS. Aunque los modelos modernos ofrecen conversión automática al SI, la mayoría de las bases de datos y curvas de calibración originales permanecen en gauss y emu. Cambiar al SI implicaría reescalar todas las mediciones históricas y perder comparabilidad con décadas de datos.

No obstante, su uso y convivencia con el SI también produce ciertos inconvenientes, tales como:

Conversión no trivial SI ↔ CGS: los factores irracionales y la variabilidad experimental de μ_0 complican la equivalencia exacta entre ambos sistemas. El SI implica un tratamiento distinto de los campos magnéticos y requiere la introducción de la permeabilidad del vacío, lo cual no ocurre en el CGS-EMU, ya que esta constante es igual a la unidad.

Confusión entre B y H: en el CGS son dimensionalmente iguales (aunque con diferentes unidades: gauss y oersted), mientras que en SI no lo son.

Errores por el uso de "emu" como unidad: "emu" no es una unidad, sino simplemente un indicador de unidades electromagnéticas. A pesar de ello, y que es erróneo su uso como tal, expresiones como "emu/cm^3" para el momento magnético, μ, son bastante comunes (en lugar de sus verdaderas unidades "erg·G^{-1} o "erg·Oe^{-1}). Similarmente, la susceptibilidad volúmica a menudo se expresa en "emu" o "emu por centímetro cúbico", un estado de confusión que se origina por el mal uso de "emu" como unidad para el momento magnético.

Ambigüedad entre M y 4πM: la coexistencia de dos formas numéricamente distintas para la magnetización causa errores frecuentes. Así, por ejemplo, la magnetización (momento magnético por unidad de volumen) se expresa comúnmente como

https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2110

M en "emu por centímetro cúbico" o como $4\pi M$ en unidades de gauss (véase ecuación 17). Son dimensionalmente equivalentes, pero difieren numéricamente en el factor 4π. Esta doble definición a menudo conduce a malentendidos y errores. Algo similar ocurre en el SI en donde, por motivos prácticos, muchos investigadores usan teslas como la unidad de H (la cual podrían usar si en su lugar escribieran $\mu_0 H$), o se refieren erróneamente a B en lugar de H.

Conclusiones

La historia de los sistemas de unidades revela cómo la física, la ingeniería, la matemática y la filosofía se entrelazan en la construcción de un lenguaje universal para describir el mundo. Esta historia la podemos resumir en estas cinco aportaciones:

(a) El CGS aportó la primera visión absoluta y coherente del electromagnetismo.

(b) Heaviside introdujo criterios de elegancia y racionalidad.

(c) Giorgi concibió la estructura tetradimensional y la filosofía que subyace al SI moderno.

(d) El SI de 1960 unificó la metrología global.

(e) El SI de 2019 cerró el círculo, arraigando todo el sistema en constantes fundamentales de la naturaleza y la medición experimental de μ_0.

En este proceso, el magnetismo ha jugado un papel singular. Ha sido campo de batalla entre tradiciones, fuente de confusiones y escenario de debates ontológicos sobre la identidad física de B y H. El magnetismo, con su resistencia histórica al SI, nos recuerda que las unidades no son meros instrumentos de cálculo, sino que son parte del andamiaje conceptual con el que entendemos el mundo. La historia de su evolución es, en último término, la historia de nuestra búsqueda de un lenguaje perfecto para la naturaleza.

Finalmente, y para ser positivista, la coexistencia de CGS y SI en el magnetismo, lejos de ser un inconveniente insalvable, puede ser una fortaleza si se utiliza con comprensión rigurosa y precisión. El CGS conserva su valor pedagógico y práctico, mientras que el SI garantiza coherencia metrológica global.

Bibliografía

[1] J. Crangle, M. Gibbs, *Phys. World* **1994**, *7*, 31-32, https://doi.org/10.1088/2058-7058/7/11/29.

[2] P. Quincey, R. J. C. Brown, *Metrologia* **2017,** *54*, 454-460, https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7160.

[3] G. Giorgi, *Atti dell'Associazione Elettrotecnica Italiana* **1901,** 5, 402–418, https://doi.org/10.1007/ BF02709460.

[4] G. Giorgi, *IEEE Magn. Lett.* **2018**, 9, 1205106, https://doi.org/10.1109/LMAG.2018.2859658.

[5] A. Thompson, B.N. Taylor, *NIST Special Publication 811*, Gaithersburg **2008.**

[6] *The International System of Units*, Bureau Int. des Poids et Mesures, Sèvres, France, **2019**.

[7] R. S. Davis, *Am. J. Phys.* **2017,** *85*, 364, https://doi.org/10.1119/1.4976701.

[8] R. B. Goldfarb, *IEEE Magn. Lett.* **2017**, *8*, 1110003, https://doi.org/10.1109/LMAG.2017.2777782.

[9] R. B. Goldfarb, *IEEE Magn. Lett.* **2018**, *9*, 1205905, https://doi.org/10.1109/LMAG.2018.2868654.

[10] R. B. Goldfarb, en *Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization*, (Eds.: V. Franco, B. Dodrill), Springer, Cham, **2021**, 3-11, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70443-8_1.

[11] C. P. Landee, M. M. Turnbull, *J. Coord. Chem.* **2014**, *67*, 375-439, https://doi.org/10.1080/00958972.2014.889294.

[12] N. Fletcher, G. Rietveld, J. Olthoff, I. Budovsky, M. Milton, *NCSL Int. Meas.* **2014**, *9*, 30-35, https://doi.org/10.1080/19315775.2014.11721692.

[13] O. Kahn, *Molecular Magnetism*, VCH Publishers, New York, **1993**.

[14] R. B. Goldfarb, *IEEE Magn. Lett.* **2018**, *9*, 1205905; https://doi.org/10.1109/LMAG.2018.2868654.

Francesc Lloret Pastor

Departamento de Química Inorgánica
Instituto de Ciencia Molecular, Facultat de Química, Universitat de València
C-e: francisco.lloret@uv.es
ORCID: 0000-0003-2959-0879

F. Lloret es Catedrático de Química Inorgánica de la Universidad de Valencia. Ha publicado cerca de 700 artículos (índice h = 86). Su trabajo ha desempeñado un papel clave en el desarrollo del Magnetismo Molecular. Ha sido galardonado por la RSEQ (Premio a la Excelencia Investigadora 2005 y Reconocimiento a una Carrera Distinguida 2022) y por la Sociedad Francesa de Química con el Premio Catalán-Sabatier 2018. Es Dr Honoris Causa por la Universidad de Bucarest (2014) y miembro de la Academia Europea desde 2014. En 2024 ganó el Premio Europeo de Divulgación Científica con el libro "*Un Mundo Magnético: la omnipresencia de los imanes*".

Rafael Ruiz García

Instituto de Ciencia Molecular, Facultat de Química, Universitat de València
C-e: Rafael.Ruiz@uv.es
ORCID: 0000-0001-9440-0491

Rafael Ruiz García es investigador doctor del Instituto de Ciencia Molecular (ICMol). Tras obtener su doctorado en la Universitat de València en 1995 bajo la dirección de los Catedráticos Francesc Lloret y Miguel Julve, realizó sendas estancias postdoctorales en los grupos de investigación del Profesor Olivier Kahn (Université de Paris-Sud, Francia) y del Profesor Dante Gatteschi (Università di Firenze, Italia), dos centros extranjeros de reconocido prestigio en el área del magnetismo molecular. Su investigación actual se centra en la química de coordinación como herramienta de diseño de materiales magnéticos moleculares multifuncionales para tecnologías emergentes en nanociencia y nanotecnología.