SOBRE LA EXTENSIÓN DEL SISTEMA METRO-SEGUNDO (SMS) DE UNIDADES A LAS UNIDADES ELECTROMAGNÉTICAS

Arq. Norberto E. Meyer
Ing. S. Enrique Puliafito
Instituto de Estudios para el Medio Ambiente (IEMA)
Ing. Roberto F. Morales
Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Introducción:

En astronomía a menudo se emplea un sistema de unidades que utiliza como unidades primarias a las unidades de longitud y de tiempo. En este caso se define a la constante universal de gravitación (G) como un número puro (adimensional). Como consecuencia, la unidad de masa resulta ser una unidad derivada.

En el sistema metro-segundo (SMS), la masa se expresa mediante el producto MG *(donde* M *es masa), el cual es numéricamente altamente preciso, aún cuando tanto la unidad de masa* (kg) *así como* G ($m^3kg^1\ s^2$) *sean relativamente imprecisos. Se propone extender el sistema SMS de unidades a las restantes magnitudes físicas, eléctricas y magnéticas. Indicamos algunas ventajas, la didáctica entre ellas, que avalan el uso del sistema SMS, así como algunas restricciones. Se señalan los criterios de selección de las unidades de longitud y tiempo como básicas y se indica con algún detalle la conversión de las unidades del sistema SI al sistema SMS, para el caso de las unidades de masa y de cantidad de corriente. Se propone una unidad eléctrica con las unidades de ¡a masa (en SMS). Se acompaña una tabla de conversión de unidades para las principales magnitudes, las que se presentan asimismo en una tabla de doble entrada. También se presentan las principales constantes físicas y electromagnéticas en unidades SMS.*

La física reconoce cierto número de magnitudes tales como longitud, tiempo, masa, etc. Al efecto de realizar comparaciones, ha sido necesario establecer unidades de medición en correspondencia con esas magnitudes. Un conjunto concreto de unidades de medición utilizado por la física, constituye un sistema coherente.

Algunas unidades de medición son fundamentales (o primarias) y otras son derivadas (o secundarias). Las unidades de medición fundamentales están establecidas sin hacer referencia a otras unidades de medición, tal como sucede, por ejemplo, para el metro como unidad de medición de longitud, o el segundo como unidad de medición de tiempo. Las unidades de medición derivadas se construyen con la participación de dos o más unidades de medición fundamentales, tal como la unidad de medición de la velocidad, la que está constituida por la unidad de medición de longitud dividida por la unidad de medición del tiempo. En general la medición de una magnitud cualquiera, se constituye con las unidades fundamentales según la fórmula dimensional.

$$(B) = (A_1)^{x1} (A_2)^{x2} \ldots (A_n)^{xn}$$

donde (B) es la unidad de medición derivada, (A_1) *a* (A_1) son las unidades de medición fundamentales, "n" es el número de unidades de medición fundamentales y "x" es un número positivo o negativo y entero o fraccionario, incluido el cero.

Así por ejemplo, para la velocidad “v” se tiene:

$$v = ms^{-1}$$

en donde el exponente de m es la unidad.

La cantidad de unidades de medición fundamentales se establece por convención, debiendo ser "n" al menos igual a la unidad, y como máximo igual a la cantidad total de unidades de medición utilizadas. Así, el Sistema Internacional *(SI)* de unidades se basa en las unidades de medición de longitud (m), de tiempo (s), de masa *(kg),* de intensidad de corriente *(A),* de temperatura *(K)* y de intensidad de la luz *(cd).* En cambio, la física cuántica utiliza como única unidad de medición básica una unidad de longitud, la cual surge de considerar a la constante de Planck barrada "$\hbar$" y a la velocidad de la luz *"c"* como adimensionales e iguales a la unidad. En astronomía, por su parte, suele utilizarse como únicas unidades básicas las unidades de longitud y de tiempo, lo que se obtiene considerando que la constante gravitacional universal "G" es adimensional[1]. Esto implica que en astronomía se trabaja con el producto altamente preciso de *MG* (donde M es masa)[2].

Las unidades derivadas se pueden representar mediante un sistema de coordenadas, donde a cada unidad de medición básica le corresponde una coordenada y cada unidad derivada, queda determinada por la intersección de los valores que toma cada coordenada. Para el caso de una a tres unidades de medición básicas, las unidades de medición derivadas se pueden representar mediante las coordenadas físicas reales, mientras que para representar una cantidad de cuatro o más unidades de medición fundamentales se debería recurrir a coordenadas en un espacio imaginario.

Para representar tres unidades de medición fundamentales, por ejemplo las unidades de longitud, tiempo y masa, se debe recurrir a un volumen, lo que complica su representación en el papel. Por el otro extremo, si bien la representación de una única unidad fundamental, la de longitud, sólo requiere de la línea, la conceptualización de este sistema de unidades es de una relativamente alta abstracción. Un sistema constituido por dos unidades de medición fundamentales podría representarse fácilmente en el plano y, para el amplio público, sería de una menor abstracción (véase el Gráfico 1).

Si bien un sistema con dos unidades básicas facilita la representación de las unidades de las magnitudes en un sistema de dos coordenadas cartesianas (en el plano, en definitiva), con las consecuentes ventajas didácticas, esto no sería razón suficiente para proponer el uso de tal sistema.

Veremos que existen razones fundamentales para esa propuesta. Específicamente, la relativamente elevada incertidumbre con que se miden la unidad de masa, el kilogramo *(kg)* y la constante universal *(G),* aconseja hallar otra forma más precisa de medir la magnitud masa.

Para construir un sistema "binario" de unidades de medición, parece razonable elegir como unidades de medición fundamentales a dos de entre las unidades de longitud, tiempo y de masa. En primera instancia pudiera suponerse que la más "concreta" de las magnitudes, aquella que se puede "ver" y "tocar", es la masa, por lo cual ésta sería una de las magnitudes a considerar al efecto de la selección de las unidades de medición fundamentales. Continuando el análisis concluiremos que la percepción y comprensión de los conceptos de longitud y de tiempo, no son menos reales que los de masa. Más aún, veremos que físicamente la medida de la masa es la más imprecisa de las tres y, además, la materialidad de la masa se desdibuja cuando consideramos que el concepto implica realmente las nociones más abstractas, de masa inercial y masa gravitacional.

Además, como hace notar Deeds[3], "El kilogramo es la única unidad básica *SI* (Sistema Internacional) aún definida por un artefacto material. El kilogramo prototipo internacional, hecho de aleación de platino-iridio, es guardado en una bóveda del Bureau International des Poids et Mesures en Sèvres, próximo a París" y agrega, "...masas macroscópicas no han sido determinadas con mayor aproximación que 8 partes por millón y habitualmente no más de 100 partes por millón". Dada la elevadísima imprecisión del conocimiento de la masa patrón en comparación con la precisión (fracciones de partes por millón) del conocimiento de otras unidades, Weeds propone definir eventualmente el kilogramo en función de la masa de alguna partícula fundamental, mencionando además algunas otras propuestas. Específicamente, Weeds menciona la propuesta de Taylor de "...que el kilogramo y el Ampere deberían, ambos, ser unidades secundarias, derivadas del Volt (definido usando la unión Josephson) y el Ohm (definido usando el efecto Hall cuántico) a través del Joule y el Newton..."

Finalmente, y como mencionamos anteriormente, ya en astronomía es habitual (aún cuando no exclusivo) trabajar con unidades metro y segundo y considerar el kilogramo como unidad derivada[1].

Pero extendamos el análisis a las otras unidades del sistema *SI.* Si consideramos que desde el punto de vista de la relatividad restringida, el campo magnético puede considerarse como un campo electrostático observado desde un marco referencial en movimiento, es válido considerar la unidad de medición del flujo magnético como no básica. La unidad de la intensidad de la luz en el sistema *SI,* la candela, es una unidad práctica pero que no tiene el mismo carácter fundamental de las otras unidades de medición. Similares conceptos son válidos para el caso de la unidad de temperatura, el grado Kelvin (y las unidades de medición de los ángulos en los espacios bi y tridimensionales).

Por otra parte, se han realizado diversas propuestas de un sistema unificado de tiempo-longitud[4] basado en un estándar de frecuencia en conjunción a la adopción, por convención, de un valor definido de la velocidad de la luz. Esto es al menos técnicamente posible, por cuanto actualmente es factible realizar con suficiente precisión comparaciones directas de frecuencias de radiación de microonda para definir el estándar de tiempo y la medición de radiación óptica para la determinación del estándar de longitud.

Este conjunto de argumentos, nos lleva a proponer que se considere las unidades de medición de longitud y de tiempo como básicas y a todas las restantes (específicamente incluyendo la unidad de corriente eléctrica), como derivadas.

Las cantidades de unidades prácticas, sumando las propias de cada disciplina científica y técnica, son muy elevadas y específicamente en el orden de centenares. Para esas magnitudes muchas de las unidades son idénticas (por ejemplo, tal es el caso de la unidad de largo, ancho y alto) y otras son adimensionales, por lo cual no poseen símbolos de unidad. Pero una vez analizadas, las magnitudes físicamente significativas son sorprendentemente pocas y se representan parcialmente en el Gráfico 1. En ese Gráfico, sobre el eje horizontal, se representan convencionalmente los exponentes de la unidad de longitud y sobre el eje vertical, se representan los exponentes de la unidad de tiempo.

Expresando algunas unidades, tal como el Coulomb, en unidades mecánicas *(MKS),* los exponentes son números fraccionarios relativamente complejos, mientras que la utilización del Sistema Metro-Segundo *(SMS)* presenta la ventaja de que en todos los casos los exponentes son números enteros (véase la tabla nº 1).

Pasaremos ahora a describir las unidades del ámbito físico expresados en el *SMS.* Por una parte describiremos el concepto para el caso de las magnitudes más significativas, indicándose en la Tabla nº 1 las unidades convencionales y su conversión a unidades *SMS* así como su valor. En la Tabla nº 2 se indican algunas de las principales constantes físicas expresadas en unidades binarias *(SMS).*

Las magnitudes presentadas no incluyen a aquellas que en el sistema *SI* usen solamente las unidades metro y segundo tales como velocidad y aceleración, sino que únicamente se presentan aquellas unidades más complejas que incluyen al menos una de las unidades *kg.* y *A* (Ampere) o sus derivadas, tal como, por ejemplo, las magnitudes fuerza y cantidad de carga eléctrica. Sí se hablará brevemente de las unidades básicas en el *SMS;* las unidades de longitud, el metro *(m)* y de tiempo, el segundo (s).

Los valores utilizados de las magnitudes y constantes son los recomendados en 1986 por el Committee on Data for Science and Technology of the International Council of Scientific Unions[5].

En la descripción se indica el nombre principal de la magnitud, la unidad y los exponentes de las unidades de longitud y de tiempo, los que adquieren así el carácter de "símbolo" de la magnitud, tal como en el caso de la magnitud masa con las unidades $m^3\, s^2$, donde ese "símbolo" será (3-2).

Las unidades básicas de longitud y de tiempo:

Longitud -l- (10)-metro (m)

Tiempo -t- (01)-segundo (s)

Si bien la unidad de longitud, el metro *(m)* con el símbolo propuesto *(10)* y la unidad de tiempo, el segundo *(s)* con el símbolo propuesto *(01),* son unidades primarias, tanto en el *SI* como en el *SMS,* ambas están relacionadas al haberse establecido por convención un valor fijo para la velocidad de la luz.

$$\textit{Velocidad de la luz } c\ (1\text{-}1) = 299\ 792\ 458\ ms^{-1}$$

y, habiéndose definido en la 13ª Conferencia General sobre Pesas y Medidas (1967) que el segundo es la duración de 9 192 631 770 períodos de radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado de un átomo de ${}_{55}Cs^{133}$ (el isótopo de Cesio con el número de masa 133), el metro queda definido como:

$$1\ (m) = \frac{c\ (ms^{-1}) \times (s)}{299792458}$$

El valor *c* es asimismo importante, por cuanto participa en la definición de la constante dieléctrica del vacío e_0. En el *SI* la permeabilidad magnética del vacío μ_0, la constante dieléctrica del vacío e_0 y la velocidad de la luz en el vacío *c* están relacionadas por la expresión:

$$\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1 \qquad \mathbf{1)}$$

Veremos más adelante que ϵ_0 y μ_0 juegan un rol preponderante en la definición de las unidades electromagnéticas.

Indicaremos ahora con algún detalle la forma de expresar otras magnitudes con esas unidades. Específicamente, lo ejemplificaremos para el caso de las otras dos magnitudes requeridas en mecánica y electromagnetismo, y que son unidades fundamentales en el *SI;* las unidades de masa y de corriente eléctrica.

Básicamente, el procedimiento de conversión del *SI* al *SMS* consiste en expresar las unidades del electromagnetismo (en definitiva en el sistema *MKSA)* en unidades mecánicas (en el sistema *MKS)* y luego expresar a éstas (o las unidades que originariamente son unidades mecánicas) en unidades de longitud y de tiempo (en el sistema *SMS).*

Como ya se dijo, el paso de las unidades mecánicas *MKS* a unidades *MS* (o sistema *SMS)* se logra considerando que la constante gravitacional universal sea adimensional. Vale decir, que básicamente proponemos trabajar con el producto *G.M* en vez de trabajar con la magnitud *M.* Consecuentemente deberemos explicar por qué consideramos que esto arroja resultados precisos cuando tanto la constante G, así como la unidad de masa (el *kg.* patrón) solamente se conocen con una relativamente alta imprecisión.

Sabiendo que tanto la constante *G* como la magnitud *M* se miden en forma relativamente imprecisa, el producto *GM* potenciaría esa imprecisión. No debemos pensar en *GM* como el producto de *G* por *M,* sino que debemos pensar en G/W globalmente como una magnitud unitaria. Esta magnitud es en sí altamente precisa al trabajar directamente con unidades altamente precisas, cuales son las unidades de longitud y de tiempo.

Veamos con algún detalle el ejemplo de cómo se ha logrado una muy elevada precisión en astronomía[6].

En astronomía la fuerza gravitacional queda expresada por:

$$F = \frac{h^2 M_1 \; M_2}{r^2} \qquad 2)$$

donde la masa unitaria es la masa solar y la distancia unitaria es la distancia entre el sol y la tierra. Con esas unidades, h^2 equivale a G, siendo *h* la constante Gaussiana (adimensional) que tiene el valor altamente preciso de:

$$h = 0{,}017\ 202\ 098\ 95$$

Con esto ejemplificamos que es posible lograr sistemas de unidades altamente precisas (no obstante, la imprecisión retorna si se convierten las unidades astronómicas de masa y de distancia a las unidades kg. y metro).

La constante gravitacional universal es:

$$G = 6{,}672\ 59\ (85) \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$$

y también:

$$G = 6{,}672\ 59\ (85) \times 10^{-11}\ (adimensional)$$

La incertidumbre estimada para G era de aproximadamente 1.10^{-4} y nuevas mediciones indican que la incertidumbre podría ser tan alta como 6.10^{-4}. Tan elevado error se debería a procesos de disipación en las balanzas de torsión utilizadas para realizar las mediciones, estimándose que podría ser posible retroceder a mediciones anteriores más precisas o diseñar suspensiones libres de disipación[7, 8].

A su vez, la unidad de medida de masa, al medirse mediante artefactos materiales en aire, también presentan elevadas incertidumbres de unas 10 partes por millón y, más generalmente, de unas 100 partes por millón, por lo que, comúnmente, el orden de la incertidumbre de G es del orden de la incertidumbre de la unidad de masa.

Aquí es importante señalar, que si bien en las ecuaciones los valores absolutos se ven afectados por las imprecisiones, no se ven afectadas las variaciones relativas y, además, al definir la unidad de masa mediante unidades básicas de alta precisión, como lo son el metro y el segundo, se busca justamente aumentar la precisión en la medición de la masa, eventualmente, estableciendo por definición la unidad de masa afectada por Γ

Pasamos ahora a establecer la unidad derivada de masa demostrando el paso del sistema MKΣ al sistema ΣMΣ:

masa-m-(3-2)-kilogramo (kg.) $= 6{,}672\,59\ (85) \times 10^{-11} (m^3 s^{-2})$

La fuerza gravitacional se expresa con:

$$F = M_1 a_1 = \frac{G M_1 M_2}{r^2} \qquad 3)$$

donde M_1 y M_2son dos masas consideradas puntuales que interactúan gravitacionalmente, r^2 (m^2) es la distancia entre ambas masas elevada al cuadrado, $a_1 (m\ s^{-2})$ es la aceleración que evidencia (en este caso) M_1 debido a la acción gravitacional de M_2 y G es la constante de proporcionalidad que relaciona a las restantes magnitudes.

De hecho tenemos que:

$$\mathbf{G} = \frac{a_1 r^2}{M_2} \qquad 4)$$

en donde, M_2 se mide en *kg*, *G* tendrá un valor *n* y las unidades son (en el sistema *MKS):*

$$G\ (m^3\ s^{-2}\ kg^{-1})$$

De la ecuación 4) surge asimismo que si *G* es considerado adimensional, las unidades de M_2 deben ser asimismo las unidades de $a_1\ r^2$, es decir, $m^3 s^{-2}$.

Conceptualmente esto significa que, de definir a M_2 como una masa con la unidad *kg,* pasamos a interpretar a M_2 por el efecto que produce en M_1 , cual es que M_2 determina en M_1 , que se encuentra a la distancia *r,* una aceleración con un valor *G.*

En el sistema *SMS,* en donde Ges un coeficiente adimensional será:

$$M = a(ms^{-2})r^2(m^2) = 6{,}672\,59\,(85) \times 10^{-11} \times X\,(m^3s^{-2})$$

y cuando:

$$a = 6{,}672\,59\,(85) \times 10^{-11}\,(ms^{-2})$$

resulta:

$$X = 1\,(m^3s^{-2})$$

entonces, la G-ava parte de 1 (n^3s^{-2}) equivale a una masa de 1 *kg.,* con lo cual:

1 kg. *(en sistema MKS)* equivale a 6,672 59 (85) X 10^{-11} (m^3s^{-2}) *(en SMS)*

Obsérvese que el concepto implica la existencia de una unidad de masa que es:

$$1\,(m^3s^{-2}) = \frac{1\,(kg.)}{6{,}672\,59\,(85) \times 10^{-11}}$$

Para terminar volvamos brevemente a la ecuación 3):

$$M_1a_1 = \frac{GM_1\,M_2}{r^2} \qquad 3)$$

en donde una de las masas está afectada por *G.* Podemos convertir la igualdad al sistema *SMS* afectando las masas restantes, una en el término izquierdo y otra en el término derecho, con *G* (dimensional), con lo que queda claro que aún considerando a GM como un producto, si bien en las ecuaciones los valores absolutos se ven afectados por la imprecisión de *G,* no se ven afectadas las variaciones relativas.

$$GM_1a_1 = \frac{GM_1\,GM_2}{r^2} \qquad 5)$$

Pasaremos ahora a analizar la unidad de corriente eléctrica, el Ampere *(A)*.

Corriente eléctrica -I- (2-l)-Ampere (A) = 2,583 14 X 10^{-9} $(m^2 s^{-2})$

El Ampere es una unidad básica en el sistema *SI* (y en el sistema *MKSA)* y se define como la intensidad de una corriente invariante que, circulando por dos conductores paralelos de largo infinito y una sección circular despreciable, colocadas a un metro de distancia el uno del otro en el vacío, induce entre estos conductores una fuerza igual a 2 x 10^{-7} Newton por metro de longitud.

En el sistema *SI* (y *MKSA),* esta definición encuentra una representación en la ecuación de la fuerza electromagnética:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad \frac{2I_1I_2}{r} \qquad 6)$$

El procedimiento para convertir la unidad de corriente básica, el Ampere (en *SI* y *MKSA),* a una unidad expresada en metro y segundo *(SMS),* requiere, en primer término, expresar el Ampere con las unidades mecánicas metro, kilogramo y segundo (sistema *MKS),* para expresar luego la unidad *Kg* en unidades metro y segundo *(SMS).*

Maxwell había propuesto un sistema electromagnético de unidades con las unidades básicas 10^9 cm, 10^{-11} *g y s,* en el cual la unidad de corriente es:

$$1 \text{ Ampere} = (10^9 \text{ cm})^{1/2} (10^{-11} g)^{1/2} s^{-1} = 10^{-1} cm^{1/2} g^{1/2} s^{-1} = 10^{-1} \text{ uem}$$

*(de corriente eléctrica) **

la cual podemos expresar con las unidades metro, kilogramo y segundo (Sistema *MKS)*

$$1A = 10^{-7/2}\, m^{1/2}\, kg^{1/2}\, s^{-1}$$

reemplazando ahora la unidad kg. por su equivalente en unidades *SMS*

$$1A = 10^{-7/2}\, m^{1/2}\, [(6{,}672\,59\,(85) \times 10^{-11})(m^3\, s^{-2})]^{1/2}\, s^{-1}$$

* *Un razonamiento similar al que sigue, puede hacerse partiendo del sistema de unidades cgs-electrostáticas, en el cual 1A =* $3.10^9\ cm^{1/2}\ g^{1/2} s^{-2}$.

con lo que en definitiva:

$$1A = 2{,}583\ 14 \times 10^{-9}\ m^2\ s^{-2}$$

Obsérvese que hemos expresado la unidad *A* en unidades metro y segundo, con la imprecisión propia del valor G, pero debe tenerse en cuenta que, aparte de las consideraciones ya antes realizadas en relación a la imprecisión, debemos considerar que el factor aparentemente preciso de $10^{-7/2}$, realmente está afectado por la imprecisión con que podemos medir la unidad de masa, el *kg,* la cual habitualmente es de unas 100 partes por millón.

Para finalizar, repetiremos que toda otra unidad no expresada en unidades metro-segundo, puede ser llevada a estas, con una secuencia similar a la efectuada para el caso del Ampere.

En el siguiente apartado propondremos una unidad del electromagnetismo similar a la unidad de masa. Cabe aclarar que esto no debe interpretarse como una búsqueda de unificación de la gravedad y del electromagnetismo.

Cuando se compara la ecuación descriptiva de la fuerza de gravedad:

$$F_g = \frac{GM_1 M_2}{r^2} \qquad 3)$$

con la ecuación descriptiva de la fuerza electrostática en el vacío:

$$F_q = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad 7)$$

resalta la similitud de ambas expresiones, con lo cual cabe suponer que en ambos casos se podría operar con unidades de forma similar.

Ya hemos visto que la fuerza de gravedad puede representarse con:

$$(GM_1)\, a_1 = \frac{(GM_1)\,(GM_2)}{r^2} \qquad 5)$$

en donde *(GM)* es la masa expresada en unidades metro-segundo.

Por otra parte, en la ecuación de la fuerza electrostática de 1), la constante dieléctrica del vacío ε_0 es:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c} \qquad 8)$$

en donde *c* es la velocidad de la luz en el vacío y la permeabilidad magnética de vacío μ_0 es:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2} \qquad 9)$$

en donde, reemplazando *N* y A^2 por sus equivalentes en el sistema *SMS,* tendremos:

$$\mu_0 = 4\pi \qquad 10)$$

con lo cual, en SMS:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \qquad 11)$$

y reemplazando ahora ε_0 en 7), obtenemos (en *SMS):*

$$F_q = \frac{c^2 q_1 q_2}{r^2} \qquad 12)$$

La unidad de carga eléctrica, el Coulomb (C), es igual al Ampere-segundo *(As),* con lo cual en el sistema *SMS:*

$$1(C) = 1\,(As) = G^{1/2} q = 2{,}583\,14 \times 10^{-9}\,(m^2\,s^{-1})$$

con lo que, en definitiva, podemos escribir:

$$(GM_1)a_{q1} = \frac{(G^{1/2} q_1 c)\,(G^{1/2} q_2 c)}{r^2} \qquad 13)$$

En esta ecuación ($G^{1/2}\, q_1 c_0$) tiene las mismas unidades de *(GM)* y tiene el valor:

$$(G^{1/2}\, C).c = 7{,}744\ 06 \times 10^{-1}\ (m^3\, s^{-2})$$

La relación entre esta unidad eléctrica y el Kg. (en *SMS)* es

$$\frac{G^{1/2}\, Cc}{(Gkg)} = 1{,}16058 \times 10^{10}$$

Cabe, finalmente, señalar el valor de la relación entre la fuerza electrostática y la fuerza gravitacional. Así tenemos que para la interacción entre dos electrones, la fuerza gravitacional será:

$$F_g = (Gm_{e1})a_{e1} = \frac{(Gm_{e1})(Gm_{e2})}{r_2} = \frac{m_{e1}\, m_{e2}}{r_2}\ (SMS)$$

y la fuerza electrostática será:

$$F_e = (Gm_{e1})a_{e1} = \frac{(G^{1/2}e_1c)(G^{1/2}e_2c)}{r^2} = \frac{(e_1c)(e_1c)}{r^2}(SMS)$$

donde *e(SMS)* es la carga eléctrica unitaria:

$$e(SMS) = 1{,}602\ 17733\ (49) \times 10^{-19}\ C(SMS) = 4{,}138\ 64... \times 10^{-28}\ m^2\, s^{-1}$$

con lo cual:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{(ec)^2}{m_e^{\,2}} = 4{,}166\ 68 \times 10^{42}$$

La raíz de ese valor es:

$$\frac{ec_0}{m_e} = 2{,}041\ 24 \times 10^{21}$$

que contiene la importante relación entre la carga eléctrica y la masa del electrón (carga específica). La forma en que presentamos esa relación, al estar la carga elemental e multiplicada por la velocidad de la luz c, mantiene el carácter de constante fundamental, con la ventaja de que la relación es adimensional, con lo cual su valor no varía en función de las unidades utilizadas.

Cabe preguntarse ahora si el sistema *SMS* podrá reemplazar al sistema *SI.*

Creemos que en el uso común diario, esto no sucederá, al menos no en mucho tiempo. Pero sí creemos que la propuesta tiende a una mayor unificación entre las unidades mecánicas *(MKS)* y las eléctricas *(MKSA),* con lo cual el técnico encontrará que su utilización presentará notables ventajas. Además, no por ser un aspecto menor, dejaremos de mencionar el aspecto didáctico que surge de la representación de las unidades de las magnitudes en una sencilla planilla de doble entrada.

Un tema no tratado aquí, pero que merecería atención sería la búsqueda de unidades más fundamentales que el metro y el segundo; posiblemente según el camino señalado por Planck quien definió la masa, longitud y tiempo que llevan su nombre.

MAGNITUD	SI	SÍMBOLO SMS	UNIDADES	SISTEMA SI- MKSA	SISTEMA MKS	SISTEMA SMS
UNIDADES BÁSICAS						
LONGITUD	l	10	metro m	1m	1m	1m
TIEMPO	t	01	segundo s	1s	1s	1s
UNIDADES DERIVADAS						
UNIDADES MECÁNICAS (Dinámica)						
MASA	m	3-2	kilogramo kg.	1 kg.	1kg.	1kg= $6,67259(85)\times10^{-11}$ m^3 s^{-2}
FUERZA	F	4-4	Newton N	1N=1kg. ms^{-2}	1N=1kg. ms^{-2}	1N= $6,67259(85)\times10^{-11}$ m^4s^{-4}
IMPULSO	δ	4-3	(F.t) Ns	1 kg. ms^{-1}	1 kg. ms^{-1}	Ns= $6,67259(85)\times10^{-11}$ m^4 s^{-3}
POTENCIA	P	5-5	WATT W	1W=1kg. m^2s^{-3}	1W=1kgm^2s^{-3}	1W= $6,67259(85)\times10^{-11}m^5s^{-5}$
ENERGÍA	W	5-4	JOULE J	1J=1kg. m^2 s^{-2}	1J=1kg. m^2 s^{-2}	1J= $6,67259$ $(85)\times10^{-11}$ m^5s^{-4}
UNIDADES ELÉCTRICAS						xG= $6,67259\times10^{-11}kg^{-1}m^3s^{-2}$ $xG^{1/2}$= $8,16859\times10^{-6}kg^{-1/2}m^{3/2}s^{-1}$
CORRIENTE ELÉCTRICA	I	2-2	AMPERE A	1 A	1A=$10^{-7/2}kg^{1/2}m^{1/2}$ s^{-1}	1 A = $2,58314\times10^{-9}$ m^2 s^{-2}
CARGA ELÉCTRICA	Q	2-1	COULOMB C	1 C =1As	1C=$10^{-7/2}$ $kg^{1/2}$ $m^{1/2}$	1 C= $2,58314\times10^{-9}$ m^2 s^{-1}
TENSION ELÉCTRICA	U	3-3	VOLT V	1 V =1W/1A	1V=$10^{7/2}$ $kg^{1/2}$ $m^{3/2}$ s^{-2}	1 V= $2,58314\times10^{-2}$ m^3 s^{-3}
CAPACIDAD ELÉCTRICA	C	-12	FARAD F	1F=1C/1V	1F=10^{-7} m^{-1} s^2	1F= 10^{-7} m^{-1} s^2

MAGNITUD	SI	SÍMBOLO SMS	UNIDADES	SISTEMA SI- MKSA	SISTEMA MKS	SISTEMA SMS
RESISTENCIA ELÉCTRICA	R	1-1	OHM Ω	$1\Omega = V/A$	$1\Omega = 10^7\ ms^{-1}$	$1\Omega = 10^7\ ms^{-1}$
AUTO INDUCTANCIA	L	10	HENRY H	$1\ H = Vs/A$	$1H = 10^7\ m$	$1\ H = 10^7\ m$
FLUJO MAGNÉTICO	ϕ	3-2	WEBER Wb	$1\ Wb = 1Vs$	$1Wb = 10^{7/2} kg^{1/2} m^{3/2} s^{-1}$	$1\ Wb = 2{,}58314 \times 10^{-2}\ m^3\ s^{-2}$
DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO	B	1-2	TESLA T	$1T = 1Wb/m^2$	$1T = 10^{7/2}\ kg^{1/2}\ m^{-1/2}\ s^{-1}$	$1T = 2{,}58314 \times 10^{-2}\ ms^{-2}$

Tabla 1: Se indican algunas de las principales magnitudes expresadas en los sistemas SI-MKSA, su equivalencia en el sistema MKS y su conversión al sistema SMS (básicamente multiplicando el kg. (en el sistema MKS) por G).

Valores recomendados en 1986 para las constantes físicas fundamentales Hoja 1

	SVU	SMS				
Magnitud			Símbolo	Valor	Unidades	Incertidumbre relativa ppm
CONSTANTES UNIVERSALES						
Velocidad de la luz en el vacío	.	.	c	299 792 458	ms^{-1}	exacto
Permeabilidad del vacío	.		μ_o	$4\pi \times 10^{-7} = 12{,}566\ 370\ 614...\times10^{-7}$	NA^{-2}	exacto
		.	μ_o	$4\pi = 12{,}566\ 370\ 614$		exacto
Permitividad del vacío	.		ε_o	$1/\mu_o c^2 = 8{,}854\ 187\ 817...\times10^{-12}$	Fm^{-1}	exacto
		.	ε_o	$1/\mu_o c^2 = 8{,}854\ 187\ 817...\times10^{-19}$	$m^{-2}\ s^2$	
Constante de gravitación de Newton	.		G	$6{,}672\ 59(85) \times 10^{-11}$	$m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$	128
Constante de Planck	.		h	$6{,}626\ 075\ 5(40) \times10^{-34}$	Js	0.60
		.	h	$4{,}42130...\times10^{-44}$	$m^5\ s^{-3}$	
$h/2\pi$	.		$\hbar$	$1{,}05457266\ (63)\ 10^{-34}$	Js	0.60
		.	$\hbar$	$7{,}036\ 72...\times10^{-45}$	$m^5\ s^{-3}$	
Masa de Planck $(hc/G)^{1/2}$	.		m_p	$2{,}176\ 71\ (14)\times10^{-8}$	kg.	64
		.	m_p	$1{,}442\ 41\ (...)\times10^{-18}$	$m^3\ s^{-2}$	
Long. de Planck $h/m_p C=(hG/c^3)^{1/2}$	.	.	L_p	$1{,}616\ 05\ (10)\times10^{-35}$	m	64
Tiempo de Planck $l_p/C=(hG/c^5)^{1/2}$	.	.	t_p	$5{,}390\ 56\ (34)\times10^{-44}$	s	64
CONSTANTES ELECTROMAGNÉTICAS						
Carga elemental	.		e	$1.602\ 177\ 33(49) \times 10^{-19}$	C	0.30
		.	e	$4.138\ 64...\times 10^{-28}$	$m^2\ s^{-1}$	....

Hoja 2

	SVU	SMS	Símbolo	Valor	Unidades	Incertidumbre
CONSTANTES ATÓMICAS						
Constante de estructura fina	.	.	α	7,297 353 08(33)x10^{-3}		0.045
Inversa de la constante de estructura fina	.	.	α^{-1}	137,035 989 5 (61)		0.045
ELECTRÓN						
Masa	.		m_e	9,109 389 7 (54)x10^{-31}	kg	0.59
		.	m_e	6,078 32...x10^{-41}	$m^3 s^{-2}$	
Carga Específica	.		$-e/m_e$	-1,75881962 (53)x10^{11}	Ckg^{-1}	0.30
		.	$-e/m_e$	-6,808 86...x10^{12}	$m^{-1} s$	
Masa eléctrica específica						
		.	$-ec/m_e$	-2,041 24...x10^{21}		

Tabla 2: Se indican algunas de las principales constantes universales expresadas en Unidades Universales (SU) y MKSA, así como su equivalente expresado en Unidades Metro-Segundo (SMS).

L(m) T(s)	-1		0		1		2		3		4		5	
-5													Potencia Watt	P 5-5 W
-4											Fuerza Newton	F 4-4 N		
-3									Tensión eléctrica Volt	U 3-3 V	Impulso (F.t)	t 4-3 Ns		
-2							Corriente Eléctrica Ampere	I 2-2 A	Masa Kilogramo	m 3-2 kg.				
-1					Resistencia eléctrica OHM	R 1-1 Ω	Carga eléctrica Coulomb	Q 2-1 C						
0			Número	00 n	Longitud Metro	l 10 m								
1	Conductancia Siemens	G -11 S	Tiempo Segundo	t 01 s										
2	Cap. eléctrica Farad	C -12 F												

Gráfico N° 1: En una tabla de doble entrada se representan algunas de las principales magnitudes en el Sistema Metro-Segundo (SMS), indicando los exponentes de las unidades básicas del sistema. Para cada magnitud se indica el nombre con el símbolo convencional y el símbolo en el sistema SMS (dado por el par de los exponentes), así como la unidad de la magnitud y su símbolo. Obsérvese (Ver Tabla 1)que, por ejemplo, los exponentes de la masa y del flujo magnético son los mismos.

Bibliografía

1. *-dtv-Lexikon der Physik*-4-19-Deutscher Taschenbuch Verlag-1970-Munich.

2. *Encyclopaedia Britannica*-V8- 15ª edición-p-292.

3. W. E. *Deeds-PHYSICS TODAY* May 1993-15, 91.

4. *PHYSICS TODAY,* November 1983, 118, 120.

5. E. Richard Cohen, Barry N. Taylor-*The Fundamental Physical Constants PHYSICS TODAY-August* 1988 BG9.

6. *Comunicación personal.*

7. *Nature* 377, 573.

8. *Physics Today,* June 1995, 9.

Agradecimientos:

Los autores agradecen al Dr. Richard Branham (CRICyT), su asesoramiento en relación a las unidades de medición utilizadas en astronomía, a los Ingenieros Carlos M. Puliafito y Roberto Inzirillo (IEMA) por su asesoramiento referido a las unidades electromagnéticas en el sistema c.g.s. y al Dr. Luis Arenas por sus aportes a la estructuración del artículo.