

Constantes fundamentales: la última frontera para el Sistema Internacional de Unidades

J.M. López Romero and R.J. Lazos Martínez

*División de Metrología de Tiempo y Frecuencia, Centro Nacional de Metrología,
km 4.5 Carretera a los Cués, El Marqués, 76246, Querétaro, México,
e-mail: mauricio.lopez@cenam.mx*

Recibido el 10 de noviembre de 2010; aceptado el 8 de septiembre de 2011

La frase “*una misma medida para todos los hombres y para todos los tiempos*” resume el ideal que llevaría al desarrollo del Sistema Internacional de Unidades, SI. La evolución en las definiciones de las unidades de medida del SI puede considerarse, de alguna manera, como una serie de aproximaciones hacia el ideal en el que las unidades de medida son invariantes en el tiempo y en el espacio, inmutables, y susceptibles de materializaciones equivalentes, reproducibles, y accesibles, a fin de ser útiles en procesos de medición de orden práctico, industrial, tecnológico y científico. En el estado actual del desarrollo científico y tecnológico las constantes fundamentales se presentan como la última frontera para definir las unidades de medida del SI. El abandono de artefactos que sustentan las definiciones de las unidades del SI dio inicio en 1960, cuando la longitud de onda de una de las radiaciones del Kriptón 86 fue utilizada para redefinir la unidad de longitud. Por otro lado, la unidad de tiempo, definida en 1967 en términos de la separación de los niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio-133, fue otro importante paso hacia la incorporación de las constantes fundamentales en las unidades del SI. En 1982, la unidad de longitud quedó establecida en términos de la velocidad de la luz en el vacío y mediciones de tiempo. Lo anterior ilustra claramente la forma en que el SI evoluciona hacia la incorporación de constantes fundamentales, o combinaciones de ellas, para el sustento de las unidades de medida. Todas las unidades de medida del SI han pasado, de alguna u otra manera, por un proceso de redefinición con la notable excepción de la unidad de masa, el kilogramo. Actualmente, de las siete unidades base del SI, el kilogramo es la única que se sustenta en las propiedades de un artefacto específico, a saber un cilindro de platino. Sin embargo, esto último puede cambiar en el futuro próximo al fijar un valor sin incertidumbre para la constante de Planck y definir el kilogramo en términos de las fuerzas electromagnéticas generadas en una balanza electromagnética, denominada usualmente “balanza del watt”. De esta manera, la definición del kilogramo quedaría enmarcada en el contexto de la mecánica cuántica, ya que se apoyaría en la realización experimental de la unidad de tiempo, y por lo tanto en la separación hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133, la reproducción del volt en términos del efecto Josephson y la realización del ohm en términos del efecto Hall cuántico. Definiciones para el kelvin, en términos de la constante de Boltzmann, del mol en términos del número de Avogadro y la candela en términos de la eficacia luminosa de cierta radiación monocromática harían de las constantes fundamentales los puntos de apoyo del SI, a fin de aportar los sistemas de medición de muy alto nivel de exactitud necesarios en la consecución de los avances científicos y tecnológicos por venir.

Descriptor: Constantes fundamentales; Sistema Internacional de Unidades.

The phrase “*one measure for all men and all times*” summarizes the ideal that would lead to the development of the International System of Units, SI. The evolution of the definitions of the SI units of measurement may be somehow considered as a series of approximations to such an ideal in which the units of measurement are invariant in time and space, immutable, and susceptible to equivalent realizations, reproducible, and accessible to be useful in measuring processes of practical, industrial, technological and scientific purposes. In the current state of the science and technology the fundamental constants appear as the last frontier to define the SI units of measurement. The abandonment of artifacts to support the definitions of SI units began in 1960 when the wavelength of a krypton 86 radiation was used to redefine the unit of length, the meter. Moreover, the time unit, defined in 1967 in terms of the separation of the ground state hyperfine levels of the Cesium-133 atom, was another important step towards the incorporation of the fundamental constants in the SI units. In 1982, the unit of length was established in terms of the speed of light in vacuum and time measurements. This clearly illustrates how the SI evolves towards the incorporation of fundamental constants, or combinations of them, to support the units of measurement. In some way or another, all units of measurement have gone through a process of redefinition with the notable exception of the mass unit, the kilogram. Currently, among the SI seven base units, the kilogram is the only one based on the properties of a specific artifact, namely a cylinder of platinum. However, this may change in the near future by setting a value without uncertainty for Planck’s constant and by defining the kilogram in terms of electromagnetic forces generated in a balance, usually called “watt balance”. Thus, the definition of the kilogram would be framed in the context of the quantum mechanics, since it would rely experimentally on the time unit, and therefore on the hyperfine separation of the ground state of Cesium-133 atom, on the realizations of the volt in terms of the Josephson effect and on the ohm in terms of the quantum Hall effect. Definitions for the kelvin in terms of the Boltzmann constant, the mole in terms of Avogadro’s number and the candela in terms of luminous efficacy of monochromatic radiation will allow the fundamental constants to be the support of the SI in order to provide measurement systems with a very high accuracy to pursue the scientific and technological advances to come.

Keywords: Fundamental constants; International System of Units.

1. La evolución del SI

1.1. Los orígenes del SI (1880)

Hacia la última década del siglo XVIII, en las etapas finales de la Revolución Francesa, a petición de la Asamblea Nacional Francesa, la Academia de Ciencias de París realiza una serie de proposiciones con el ánimo de crear un sistema de medidas que pusiera orden al caos que había en aquel entonces debido a la gran variedad de medidas existentes en toda Francia [1]. Las ideas rectoras que guiaron a la Academia en la búsqueda de dicho sistema de medición, en donde por cierto, concurrían connotados hombres de ciencia, estaban sustentadas en que tal sistema de medición debería provenir de la naturaleza, ser perdurable e indestructible y apoyado en un sistema numérico de base diez. Nació así lo que se llamó el Sistema Métrico Decimal. Al transcurrir los años, con la transformación tecnológica, económica y social que traería consigo la revolución industrial, el Sistema Métrico Decimal se hizo universal debido al establecimiento de la Convención del Metro, creando en el mismo acto la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM por sus siglas en francés). 80 años después, en 1960, el nombre del Sistema Métrico Decimal cambiaría al de Sistema Internacional de Unidades (SI) por decisión de la CGPM.

El Sistema Métrico Decimal, antecesor del SI, fue establecido en 1880 originalmente con cuatro unidades base. Para la unidad de masa fue definido el kilogramo, para la unidad de longitud fue establecido el metro, para el intervalo de tiempo se usó el segundo y, finalmente, para la temperatura, el grado Celsius. El metro fue definido en términos de la longitud del cuadrante del meridiano terrestre que pasa por puntos específicos de París y Barcelona, estableciendo así que el metro correspondía a la diezmillonésima parte del cuadrante de dicho meridiano y materializado en una barra de platino iridiado mantenida a 0 °C. El kilogramo fue definido en términos de la masa de un cilindro específico de platino iridiado. Dicho cilindro intentaba materializar la cantidad de masa de un decilitro de agua pura mantenida a temperatura ambiente. El grado Celsius fue definido como la centésima parte de la diferencia de temperaturas entre el punto de hielo y el punto de ebullición del agua pura a nivel del mar. Para el tiempo, o mejor dicho, para el intervalo de tiempo, se mantuvo la conocida unidad astronómica de intervalo de tiempo, el segundo, definida en términos de la duración del día solar medio. Es notorio que estas cuatro unidades base del Sistema Métrico Decimal eran en la práctica, salvo la referencia a la temperatura en la definición del metro, independientes unas de otras y todas ellas basadas en artefactos (considerando a nuestro planeta como tal). El Sistema Métrico Decimal así definido satisfizo las necesidades de medición que tenían un alto impacto en la sociedad y la economía de aquel entonces, necesidades que estaban relacionadas fundamentalmente con mediciones de tipo mecánico y térmico dada la influencia de las máquinas a vapor de la época. Poco antes del nacimiento

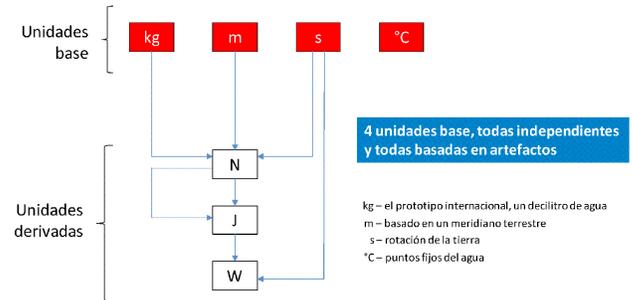


FIGURA 1. Sistema Métrico Decimal original.

del Sistema Métrico Decimal, James Clerk Maxwell había llevado a cabo hacia 1873 [2] la primera gran unificación de la física, entendiendo a las fuerzas eléctricas y magnéticas como la manifestación de una misma interacción, sin embargo, las cuatro unidades originales del Sistema Métrico Decimal no eran suficientes para atender las necesidades de medición eléctricas, por lo que dichas mediciones quedaron al margen del naciente sistema de medición.

1.2. El Sistema Métrico Decimal a partir de 1948

Fue hasta sesenta años después del nacimiento del Sistema Métrico Decimal, en 1948, que la 9ª CGPM decidió incorporar una unidad base de naturaleza eléctrica a fin de atender las necesidades de medición de tipo electromagnético. De esta manera la unidad de corriente eléctrica, el amperio, fue definida como una unidad base del Sistema Métrico Decimal. El amperio quedó definido como la intensidad de una corriente eléctrica constante que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a un metro de distancia entre sí, en el vacío, producirá entre ellos una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud. Cabe resaltar aquí que la permeabilidad del vacío μ_0 quedó de alguna manera presente en la definición del amperio ya que el valor de dicha unidad depende a su vez del valor de esta constante fundamental. Fue así que por primera vez el valor de una constante fundamental quedaba involucrada en la definición de las unidades base del Sistema Métrico Decimal.

Cabe aquí hacer algunos comentarios en relación a las denominadas constantes fundamentales. Es interesante notar que no existe una definición formal del término constante fundamental. Sin embargo, dejando de lado la hipótesis de Dirac de los grandes números [3], las constantes fundamentales se caracterizan por ser invariantes ante variaciones espaciales y temporales, esto es, sus valores no cambian en el espacio ni en el tiempo. Una constante fundamental puede ser identificada como tal dentro de los límites inherentes a los propios experimentos, esto es, los resultados experimentales son válidos para una región del espacio-tiempo a la cual se ha tenido acceso mediante observación, por lo que no debería descartarse posibles variaciones en tiempos o coordenadas espaciales fuera del alcance de los recursos experimentales. Es oportuno recordar también la existencia de relaciones

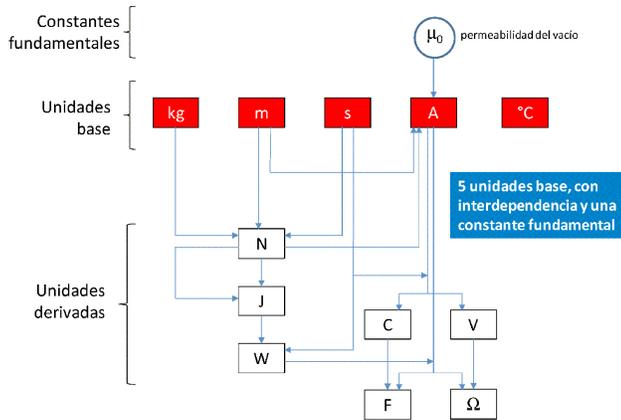


FIGURA 2. Sistema Métrico Decimal en 1948.

entre constantes fundamentales, por ejemplo, la constante universal de los gases R dividida por el número de Avogadro N_A resulta en la constante de Boltzmann k_B . Por otro lado, no existe una “jerarquía” entre constantes fundamentales, esto es, no hay un orden en cuanto qué tan fundamental es cada una de ellas. Para complicar más este escenario resulta que no es claro cuántas constantes fundamentales pueden ser identificadas como tales. El CODATA lista cientos de ellas y la lista es susceptible de modificaciones periódicas.

En 1960, durante la 11ª CGPM, el Sistema Métrico Decimal adopta el nombre Sistema Internacional de Unidades, el cual es referido internacionalmente por las siglas SI.

1.3. El SI y la estructura hiperfina del Cs-133 (1969)

Una serie de experimentos que tuvieron su origen en los trabajos de Isaac Rabi y Norman Ramsey, relacionados con mediciones de muy alta exactitud de la estructura hiperfina de elementos alcalinos (espectroscopia de RF) [4], habían conducido en la década de los 50 y de los 60 al desarrollo de los llamados relojes atómicos y a la comparación de los segundos que éstos producían, llamados segundos atómicos, con el segundo de origen astronómico, encontrando evidencia experimental de que los segundos atómicos eran por lo menos un orden de magnitud más uniformes (estables) que los segundos astronómicos. Estos resultados condujeron a que en 1967, durante la 13ª CGPM la definición de la unidad de tiempo, el segundo, fuera establecida en términos de la estructura hiperfina del átomo de Cesio-133. Específicamente, el segundo quedó definido como la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación asociada a la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133. Así, por segunda ocasión, los valores de constantes fundamentales (o una combinación de constantes fundamentales) se introducían en las definiciones de las unidades base del SI. La definición de la unidad de tiempo del SI en términos de la estructura hiperfina del Cesio-133 ha sido en extremo exitosa en el sentido de que debido a ésta y al hecho de que las técnicas de espectroscopia atómica de RF han avanzado aceleradamente en los últimos 40 años, la incertidumbre en la realización experimental de esta uni-

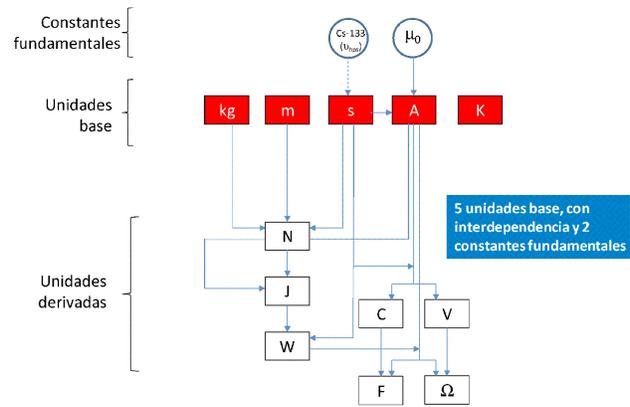


FIGURA 3. El Sistema Internacional de Unidades en 1969.

dad disminuye en promedio un orden de magnitud por década, alcanzando incertidumbres de partes en 10^{16} actualmente [5].

En lo subsiguiente nos referiremos a la separación energética de los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio-133 como una constante fundamental. Nos hemos permitido referirnos a la separación hiperfina del estado base del Cesio-133 como una constante fundamental de acuerdo a la discusión del concepto de constante fundamental presentada en la sección 1.2. En todo caso, esta afirmación puede tomarse como una propuesta de discusión entre la comunidad científica la cual no debería descartarse de manera automática.

1.4. El SI y el mol (1971)

En 1971, en la 14ª CGPM, el mol, la unidad para cantidad de sustancia, fue definida en términos del kilogramo y el Carbono-12 con el ánimo de satisfacer necesidades de medición en el área de la química, estableciendo que el mol es la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales como existen átomos en 0.012 kg de Carbono-12. Así fue que, con la incorporación de la unidad para cantidad de sustancia, se introduce al SI otra constante fundamental, el número de Avogadro N_A .

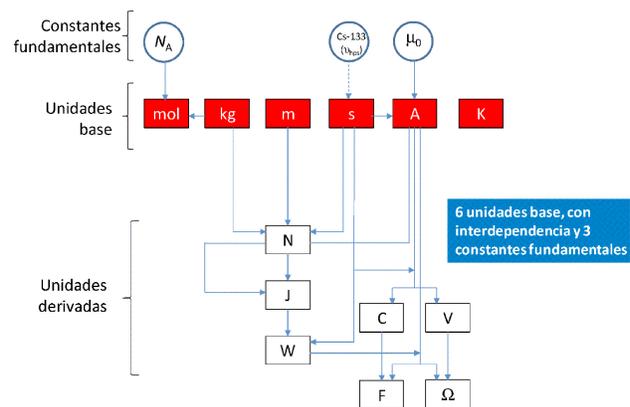


FIGURA 4. El Sistema Internacional de Unidades en 1971.

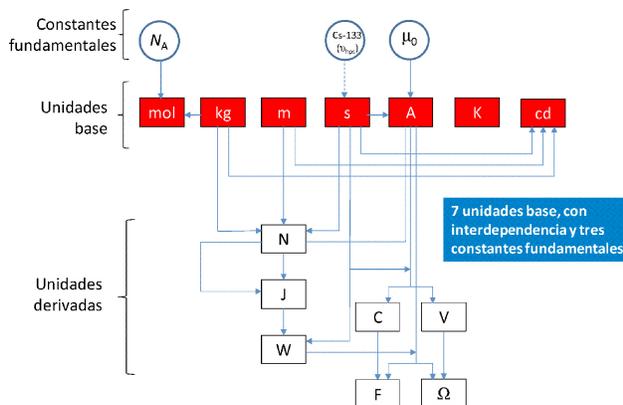


FIGURA 5. El Sistema Internacional de Unidades en 1979.

1.5. El SI y la candela (1979)

La 16ª CGPM, realizada en 1979, definió la unidad de intensidad luminosa, la candela, a efecto de satisfacer las necesidades de mediciones en las áreas de fotometría y radiometría. La candela quedó definida como la intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente luminosa que emite radiación monocromática de frecuencia de 540×10^{12} Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es $1/683$ watt por esterradián. La introducción de esta unidad haría que el SI contara con siete unidades base y tres constantes fundamentales involucradas.

1.6. El SI y la velocidad de la luz en el vacío (1983)

En 1983, se incorporaría la cuarta constante fundamental en las definiciones de las unidades base del SI, la velocidad de la luz en el vacío. En la década de los 70 se tendría un avance muy importante en la medición de frecuencias ópticas utilizando relojes atómicos por medio de los experimentos que permitían el escalamiento de la frecuencia de la transición hiperfina del estado base del Cs-133, 9.192 GHz, hasta la región visible del espectro electromagnético [6]. Estos experimentos permitieron medir de manera absoluta (con relojes atómicos) algunas frecuencias ópticas de uso común, por ejemplo la de la radiación de láseres de HeNe estabilizados por espectroscopia de saturación a las líneas de absorción de la molécula del yodo. Se dió por llamar cadenas de frecuencia [6] a este tipo de experimentos. Utilizando esta técnica se pudieron medir algunas líneas de emisión que servían como referencia para la estabilización en frecuencia de láseres. De esta manera, apoyados en la relación $c = \lambda\nu$ para la propagación de la luz en el vacío, donde la c es la velocidad de la luz, λ es la longitud de onda y ν la frecuencia de la radiación, la longitud de onda puede ser usada como referencia para mediciones de longitud con la condición de conocer c y ν . Si ν puede ser medida con alto nivel de exactitud por medio de relojes atómicos, entonces la unidad de longitud, el metro, puede ser definida como un múltiplo de λ con la condición de que c tenga un valor sin incertidumbre. Esto fue lo que hizo la 17ª

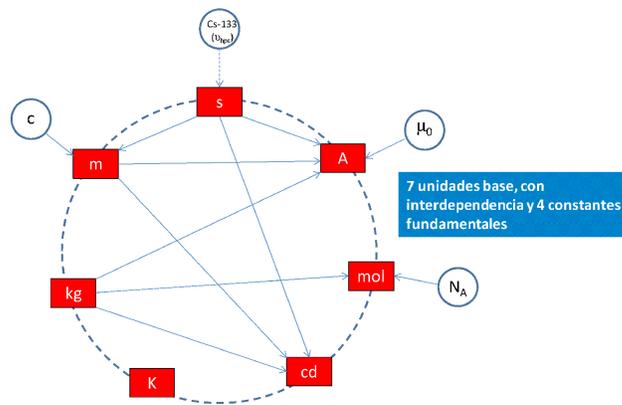


FIGURA 6. El Sistema Internacional de Unidades en 1983.

CGPM, en 1983, cuando definió el metro como la longitud del trayecto que recorre la luz en el vacío en la fracción $1/299\,792\,458$ de segundo. Puede notarse que en este enfoque el tamaño del metro depende del valor asignado a la velocidad de la luz, de manera que pierde sentido medir la velocidad de la luz utilizando el metro y el segundo como unidades de medida.

2. El SI moderno

El SI vigente involucra en las unidades base y unidades derivadas seis constantes fundamentales, cuatro de ellas de manera directa en las definiciones de las unidades base y dos más de forma indirecta en la realización experimental de unidades derivadas. Estas son: la velocidad de la luz en el vacío para el metro, la separación de los niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio-133 para el segundo, la permeabilidad del vacío para el ampere, la constante de Avogadro para la mol y, finalmente, la constante de Planck h y la carga del electrón e para el volt y el ohm. Sin embargo, la introducción de las dos últimas se ha hecho “por la puerta trasera”. La constante de Planck y la carga del electrón aparecen de manera natural en los modelos teóricos del efecto Josephson y del Hall cuántico los cuales son utilizados para realizar mediciones de muy alta exactitud de tensión y resistencia eléctrica, respectivamente. La introducción de h y e ha hecho que la coherencia del SI quede rota haciendo que la realización experimental del volt y el ohm no requieran del ampere. Nos referimos aquí a la coherencia del SI como la propiedad por la cual los valores de las unidades derivadas se obtienen a partir de los valores de las unidades base. En la Sec. 2.3 abundamos sobre la introducción de h y e en el SI por medio de los efectos Josephson y Hall cuántico. Mientras tanto, diremos que, a efecto de restablecer la coherencia del SI, existe un ánimo general en la comunidad internacional de la metrología fundamental, particularmente en el seno del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), para redefinir el SI de tal manera que las unidades base queden directamente definidas en términos de constantes fundamentales cuyos valores sin incertidumbre sean aceptados y restablecer la coherencia del SI.

2.1. Constantes fundamentales

Una constante fundamental es una magnitud física que es considerada invariante en el tiempo y en el espacio. De acuerdo al Comité de Datos para la Ciencia y Tecnología (CODATA), actualmente se identifican poco más de 300 constantes fundamentales [7]. Cabe recordar, sin embargo, que algunas constantes fundamentales pueden ser escritas en términos de otras, de manera que no todas ellas son independientes entre sí. De acuerdo a la clasificación que hace el CODATA, las constantes fundamentales pueden ser agrupadas en 4 grandes categorías, las universales, las electromagnéticas, las atómicas y nucleares y las físico-químicas. La constante de Planck, la velocidad de la luz en el vacío y la constante de gravitación de Newton son clasificadas como constantes universales. En el segundo caso se puede citar a la carga del electrón, el magnetón de Bohr, la constante Josephson y la constante de von Klitzing. En las constantes atómicas y nucleares aparece la masa del electrón, la constante de estructura fina y el radio de Bohr, entre otras muchas. Por la parte de las constantes físico-químicas puede mencionarse a manera de ejemplo la constante de Avogadro y la constante de Boltzmann. Hasta la fecha, todos los experimentos son consistentes con la suposición de que las constantes fundamentales son verdaderos invariantes, contrario a lo que en su momento P.A.M. Dirac sugiriera en su hipótesis de los grandes números. La invariancia de las constantes fundamentales no está en conflicto con el hecho de que los valores numéricos puedan cambiar dependiendo del sistema de medición elegido para expresar sus valores. Es posible redefinir el SI de tal manera que las unidades base estén ligadas directamente a los valores de sendas constantes fundamentales cuyos valores sean elegidos sin incertidumbre y consistentes con los resultados de las mejores mediciones disponibles. Esta elección haría que se preserve el valor de la unidad fijándolo y haciéndolo invariante en el tiempo y el espacio por virtud de que la unidad estaría directamente relacionada con una constante fundamental.

2.2. Los modelos teóricos

Las constantes fundamentales aparecen de manera más o menos natural en el marco del modelo teórico que describe cierta faceta de la naturaleza. Así por ejemplo, la constante de gravitación universal de Newton G aparece justamente como aquella constante que hace falta para modelar matemáticamente la forma en que la fuerza de gravedad actúa entre dos cuerpos de masa m_1 y m_2 separados por una distancia r . La velocidad de la luz c aparece de manera natural en la teoría especial y general de la relatividad. La constante de Planck h en la mecánica cuántica, la masa de las partículas elementales en el modelo estándar, y así sucesivamente. En la determinación de los valores de las constantes los experimentos tienen un papel de suma importancia ya que los modelos son ajustados a efecto de que éstos sean congruentes con los resultados de los experimentos, esto es, los experimentos aportan información sustantiva para la “calibración” del modelo. Existe

por supuesto una variedad de modelos de la física, y sólo por mencionar algunos recordaríamos a la mecánica newtoniana, la electrodinámica clásica, la mecánica cuántica, la relatividad especial y general, la teoría cuántica del campo, la electrodinámica cuántica, la cromodinámica cuántica y el modelo estándar. Asumimos que estas teorías son correctas bajo los supuestos de que son aceptadas en términos generales dentro de sus suposiciones y sus aproximaciones, a pesar de que sabemos que estrictamente son incompletas (considérese por ejemplo la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad). Sin embargo, dentro de tales limitaciones estos modelos nos ofrecen el marco de referencia para identificar y cuantificar el valor de las diversas constantes fundamentales.

2.3. El SI y las constantes de Josephson y von Klitzing (1990)

A partir de 1990 se introdujeron al SI dos constantes fundamentales, la constante de Josephson y la constante von Klitzing, las cuales, como se ha indicado anteriormente, han roto la coherencia interna del SI. Veamos con más detalle.

El efecto Josephson aparece cuando dos superconductores son débilmente acoplados permitiendo el tuneo de pares de Cooper entre ellos [8]. Experimentalmente la unión Josephson se forma cuando una muy delgada película no conductora separa dos superconductores. Cuando la unión es enfriada por debajo de la temperatura crítica T_c y se expone a una radiación electromagnética de frecuencia f , la tensión eléctrica entre los superconductores asume valores discretos dados por la relación $V_J = n f K_J$, donde n es un entero y K_J es llamada constante de Josephson. La unión Josephson permite el paso de un cuanto de flujo por cada ciclo de la frecuencia f manteniendo la coherencia de fase entre los dos superconductores. La constante Josephson K_J se asume igual al cociente $2e/h$, donde e es la carga del electrón y h es la constante de Planck. Dado que es posible medir separadamente la frecuencia y la tensión en una unión Josephson se puede, a través de este efecto, determinar el valor numérico del cociente e/h . El valor convencional de la constante de Josephson adoptado en 1990 es $483\,597.9 \times 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$ sin incertidumbre. Dicho valor es referido como $K_{J,90}$. De esta manera, es posible realizar experimentalmente el volt con muy alto nivel de exactitud sin la necesidad del ampere, ya que solamente se requiere de la unión Josephson, los relojes atómicos que generan la frecuencia de la radiación electromagnética para “iluminar” dicha unión y el valor de $K_{J,90}$. Este hecho, aunque relativamente sencillo, tiene consecuencias muy importantes en el SI, pues la adopción del valor convencional para la constante Josephson rompe con la coherencia del SI.

Por otro lado, el efecto Hall cuántico puede ser usado para realizar la unidad de resistencia eléctrica, el ohm (Ω), con muy alto nivel de exactitud, sin necesidad de recurrir al ampere. El efecto Hall cuántico fue descubierto por von Klitzing en 1980. von Klitzing y su grupo demostraron que la resistencia Hall en un transistor MOSFET sometido a muy bajas

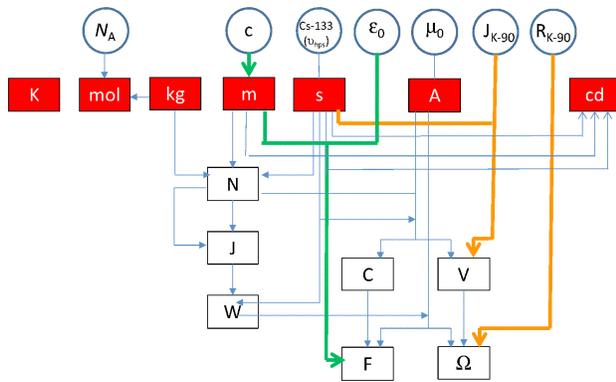


FIGURA 7. El Sistema Internacional de Unidades en 1990.

temperaturas y a campos magnéticos intensos está cuantizada [9]. Desde el descubrimiento original, se ha demostrado la existencia del efecto Hall cuántico en una variedad de semiconductores de heteroestructura crecidos con componentes de los grupos III-V, particularmente con arsenuro de galio, GaAs. El efecto Hall cuántico es fácilmente observado en heteroestructuras de la forma GaAs/GaAlAs en donde los electrones tienen un alto nivel de movilidad en la estructura bidimensional de GaAs cercana a la interface con el GaAlAs. En fechas muy recientes se ha reportado la observación del efecto Hall cuántico en grafeno [10]. La resistencia Hall R_H está dada por el cociente V_H/I_{SD} , donde V_H es la diferencia de tensión medida en caras opuestas de la GaAs y I_{SD} es la corriente en el GaAs. Los valores cuantizados de resistencia Hall pueden ser escritos como $R_H = R_K/i$, donde $R_K = h/e^2$ es llamada constante de von Klitzing, e i es un número entero. En 1990 fue asignado a la constante de von Klitzing el valor convencional de $25\,812.807\ \Omega$ exactamente, siendo éste denotado por R_{K-90} . Dicho valor constituye una referencia para medición de resistencia que no requiere de la unidad del amperio y que, similarmente al efecto Josephson, rompe la coherencia del SI.

3. ¿Por qué debe cambiar el SI?

Valores de dos combinaciones de la constante de Planck h y de la carga del electrón e , a saber $h/2e$ y h/e^2 , se usan juntamente con el SI a efecto de contar con realizaciones experimentales de muy alto nivel de exactitud del volt y del ohm, por medio del efecto Josephson y del efecto Hall cuántico, respectivamente. Este hecho sin embargo, introduce cierta incoherencia en el SI ya que dichas realizaciones experimentales del volt y el ohm no requieren del amperio, teniendo como efecto que las mediciones eléctricas queden, en un sentido estricto, al margen del SI. Por otro lado, considerando que las constantes fundamentales son verdaderas cantidades invariantes en el tiempo y el espacio, la redefinición de todas las unidades base del SI en términos de constantes fundamentales constituiría un avance muy importante para restablecer la coherencia del SI y mejorar el nivel de exactitud en las realizaciones experimentales de las unidades de medida, ya

que las unidades base del SI serían tan invariantes como las propias constantes fundamentales sobre las cuales están definidas.

3.1. Propuestas específicas de cambio

A efecto de fincar las siete unidades base del SI enteramente en constantes fundamentales se requiere que dichas constantes sean asumidas con valores exactos, sin incertidumbre. En preparación al establecimiento del nuevo SI, un posible escenario es aquel en el que las siguientes constantes fundamentales se establecen con valores fijos y sin incertidumbre, a saber:

- La frecuencia de separación hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133, $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$, es exactamente $9\,192\,631\,770$ hertz.
- La velocidad de la luz en el vacío c es exactamente $299\,792\,458$ metros por segundo.
- La constante de Planck h es exactamente $6.626\,068\,96 \times 10^{-34}$ joule segundo.
- La carga elemental e es exactamente $1.602\,176\,487 \times 10^{-39}$ coulomb.
- La constante de Boltzmann k_B es exactamente $1.308\,648\,8 \times 10^{-23}$ joule por kelvin.
- El número de Avogadro N_A es exactamente $6.022\,141\,79 \times 10^{23}$ por mol.
- La eficacia espectral luminosa K de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz es exactamente 683 lúmenes por watt.

Si damos por hecho que las constantes fundamentales son verdaderos invariantes, los valores listados anteriormente obligan a las unidades del SI a ajustarse de manera correspondiente. Esto es, el establecimiento por convención de los valores anteriores es equivalente a la adopción de las siguientes definiciones para las unidades base del SI.

- El segundo, unidad de tiempo, es tal que la frecuencia de la separación hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133 es exactamente igual a $9\,192\,631\,770$ hertz.
- El metro, unidad de longitud, es tal que la velocidad de la luz en el vacío es exactamente igual a $299\,792\,458$ metros por segundo.
- El kilogramo, unidad de masa, es tal que la constante de Planck es exactamente igual a $6.626\,068\,96 \times 10^{-34}$ joule segundo.
- El amperio, unidad de corriente eléctrica, es tal que la carga elemental es exactamente igual a $1.602\,176\,487 \times 10^{-19}$ coulomb.

- El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es tal que la constante de Boltzmann es exactamente igual a $1.380\ 648\ 8 \times 10^{-23}$ joule por kelvin.
- El mol, unidad de cantidad de sustancia de entidad elemental específica, que puede ser un átomo, molécula, ión, electrón, o cualquier otra partícula o grupos específicos de tales partículas, es tal que el número de Avogadro N_A es exactamente igual a $6.022\ 141\ 79 \times 10^{23}$ por mol.
- La candela, unidad de intensidad luminosa en una dirección dada, es tal que la eficacia espectral luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz es exactamente 683 lúmenes por watt.

Las unidades base del SI así definidas ponen de manifiesto explícitamente que sus valores dependen enteramente de las constantes fundamentales mencionadas. En el seno del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) existe un ánimo favorable para que el SI sea redefinido de esta manera en el futuro próximo.

3.2. Implementación del nuevo SI

En el caso altamente probable que el CIPM apruebe la propuesta descrita, el SI se implementaría de la siguiente manera.

3.2.1. El segundo

La implementación de la unidad de tiempo en el nuevo SI se haría con espectroscopia de RF de la estructura hiperfina del estado base del átomo de cesio-133, exactamente igual como se hace hasta ahora [11]. Cabe indicar que debido a que la definición se refiere a un átomo de Cesio en reposo a temperatura 0 K y libre de interacciones con el resto del universo se deben considerar correcciones que tomen en cuenta los efectos sistemáticos presentes en la realización experimental de la unidad por medio de los llamados patrones primarios de frecuencia. Entre los efectos sistemáticos más importantes se pueden mencionar los debidos a la radiación ambiental por temperatura (radiación de cuerpo negro), efectos relativistas y efecto Zeeman. Los experimentos para la manipulación de átomos con luz hacen posible la utilización de átomos ultra fríos de Cesio-133 en la realización experimental de esta unidad logrando muy altos niveles de exactitud.

3.2.2. El metro

La definición de la unidad de longitud del nuevo SI, es en el fondo la misma que se tiene por el momento, de manera que la implementación experimental de dicha definición se haría de la misma forma en que actualmente se realiza (siguiendo la *mise en pratique* al respecto), esto es, a través de mediciones de la frecuencia de láseres estabilizados utilizando para tal efecto relojes atómicos de Cesio [12]. El advenimiento

reciente de los peines de frecuencia [13] ha abierto una amplia gama de posibilidades para la realización experimental de la unidad de longitud. De hecho, gracias a los peines de frecuencia, en los procesos de estabilización de los láseres no solamente pueden usarse referencias atómicas, sino también cavidades resonantes ultra estables, teniendo así la posibilidad de materializar la unidad en prácticamente cualquier color cercano al visible.

3.2.3. El kilogramo

El efecto de fijar el valor numérico exacto para la constante en Planck como $h = 6.626\ 068\ 96 \times 10^{-34}$ joule segundo $= 6.626\ 068\ 96 \times 10^{-34}$ kg m² s⁻¹, junto con el hecho de que el metro y el segundo son previamente definidos, significa definir del kilogramo. Esta definición implica que un kilogramo es la masa de un cuerpo cuya frecuencia de de Broglie es $(299\ 792\ 458)^2 / (6.626\ 068\ 96 \times 10^{-34})$ hertz, o aproximadamente $1.356\ 392\ 733 \times 10^{50}$ hertz. Lo anterior es consecuencia de que la frecuencia de de Broglie ν para una partícula de masa m es $\nu = mc^2/h$, lo cual toma en cuenta la relación masa-energía de Einstein $E = mc^2$ y la relación energía-frecuencia $E = h\nu$. La realización experimental de la definición del kilogramo se haría por medio de patrones eléctricos cuánticos (efecto Josephson y efecto Hall cuántico) a través de la comparación directa de potencia eléctrica y mecánica utilizando el experimento llamado balanza del watt [14]. Este experimento se discutirá con más detalles en la Sec. 3.3.

3.2.4. El ampere

En la definición del ampere del nuevo SI se establece que $e = 1.602\ 176\ 487 \times 10^{-19}$ C exactamente. De esta manera se tiene que el ampere es la corriente eléctrica correspondiente al flujo de $1 / (1.602\ 176\ 487 \times 10^{-19})$ cargas elementales por segundo. Experimentos de tuneo de electrones, cuya frecuencia de paso es controlada por relojes atómicos, constituyen una posibilidad en la realización experimental de esta unidad. Ahora bien, es oportuno indicar que esta definición fija el valor de e pero deja libre el valor de la permeabilidad del vacío μ_0 , valor que debe ser ahora determinado experimentalmente.

3.2.5. El kelvin

La definición de la unidad de temperatura termodinámica del nuevo SI asume que la constante Boltzmann tiene el valor $k_B = 1.380\ 648\ 8 \times 10^{-23}$ J/K. Esto implica que el kelvin es igual al cambio de la temperatura termodinámica que resulta de un incremento de energía térmica $k_B T$ de $1.380\ 650\ 4 \times 10^{-23}$ joule. De esta manera, se tiene que la temperatura termodinámica del punto triple del agua es una cantidad que debe ser determinada experimentalmente. La realización experimental de la definición del kelvin en el nuevo SI se haría utilizando la termometría primaria. Así por ejemplo, sería posible realizar la unidad de temperatura termodinámica para valores muy cercanos al 0 K utilizando ga-

ses ultra fríos de Cesio-133 y determinando los valores de temperatura por el método de tiempo de vuelo [15]. En general los experimentos que involucran el principio de equipartición de la energía constituirían los métodos para la realización experimental de la unidad. En dicho principio, la energía E promedio por cada grado de libertad en las partículas que componen un cuerpo en equilibrio termodinámico a temperatura T puede escribirse como $E = k_B T/2$, donde k_B es la constante de Boltzmann.

3.2.6. El mol

La definición de la unidad de cantidad de sustancia en el nuevo SI la haría independiente de la unidad de masa y enfatizaría que la naturaleza de ambas unidades es fundamentalmente diferente. La nueva definición para el mol tendría el efecto de que la masa molar del Carbono-12 no sería más 0.012 kg/mol por definición sino que dicho valor debe ser determinado experimentalmente.

3.2.7. La candela

La definición de la candela en el nuevo SI es fundamentalmente la misma que se tiene por el momento, sin embargo se expresa de tal manera que su estructura sea la misma que la de las definiciones de las otras unidades base.

3.3. La balanza del watt

El principio de operación de la balanza del watt se fundamenta en la equivalencia entre la potencia eléctrica y la potencia mecánica, misma que puede ser aprovechada en la realización experimental de la definición del kilogramo en el nuevo SI [16]. En términos breves, dicho experimento requiere de una fase estática y una fase dinámica. En la fase estática (ver Fig. 8) una corriente eléctrica constante I circula por una bobina la cual es atravesada en su sección transversal por un flujo magnético B constante. De esta manera se produce una fuerza en la bobina que es balanceada por el peso mg de la masa m colocada en el platillo del brazo opuesto de la balanza. En condición de equilibrio se cumple la relación $I \cdot \int dl \times B = mg$, donde dl está relacionado con la longitud del segmento de la bobina.

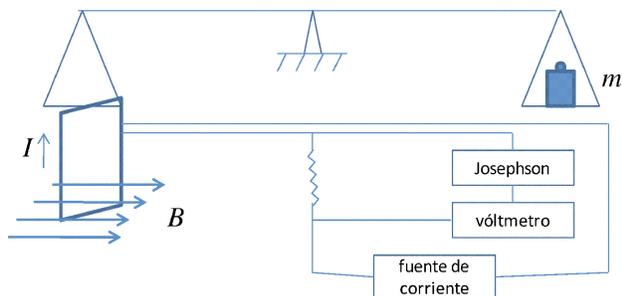


FIGURA 8. Fase estática del experimento con la balanza del watt.

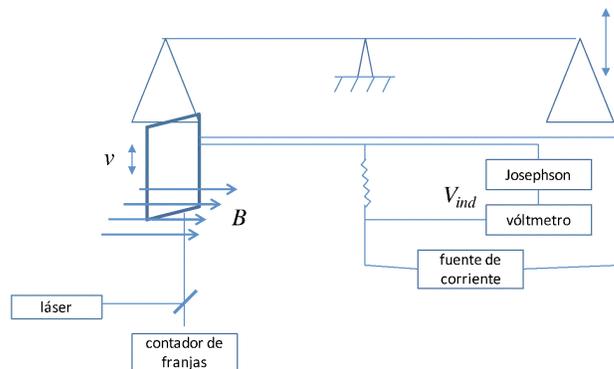


FIGURA 9. Fase dinámica del experimento con la balanza del watt.

En la fase dinámica (ver Fig. 9) se mide la fuerza electromotriz V_{ind} inducida en la bobina cuando ésta se mueve respecto al campo magnético B con una velocidad v , produciendo así un cambio en el flujo magnético que la cruza. En esta fase dinámica se cumple que

$$V_{ind} = v \cdot \int dl \times B.$$

Ahora bien, suponiendo que el valor de la integral es el mismo tanto en la fase dinámica como en la estática, siguiendo a R. Davis [17], la potencia mecánica $P_{mec} = mgv$ es igual a la potencia eléctrica $P_e = V_{ind}I$, de manera que se tiene la relación $mgv = V_{ind}I$. La fuerza electromotriz V_{ind} y la corriente eléctrica I se miden utilizando como referencias el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico, respectivamente, dentro de la convención de 1990 [9].

En dicha convención el valor de la constante de Josephson K_{J-90} se asume como $483\,597.9 \times 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$ exactamente. Su valor en unidades del SI puede expresarse en términos de la constante de Planck h y la carga del electrón e como:

$$K_J = \frac{2e}{h}. \tag{1}$$

De esta relación resulta un valor para K_J de

$$(483597.891 \pm 0.012) \times 10^9 \text{ HzV}^{-1}.$$

Entonces el valor de la tensión eléctrica expresado en el marco de la convención mencionada, V_{90} , puede escribirse en términos de una tensión eléctrica en unidades del SI, V , por medio de

$$V_{90} = \frac{K_{J-90}}{K_J} V. \tag{2}$$

Similarmente, la constante de von Klitzing toma un valor por convención de $25\,812.807 \Omega$ exactamente, dicho valor se representa como R_{K-90} . Por otro lado, su valor en unidades del SI puede escribirse como:

$$R_K = \frac{h}{e^2}, \tag{3}$$

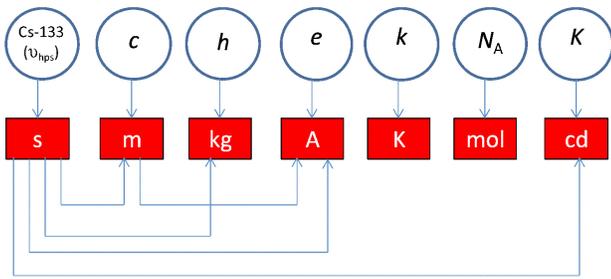


FIGURA 10. Posible nuevo escenario para el Sistema Internacional de Unidades.

con un valor numérico en el SI de $(25\,812.807\,4434 \pm 0.000\,084)\,\Omega$.

Por ello, el valor de la resistencia eléctrica expresada en términos de la citada convención, Ω_{90} , puede escribirse en términos de la unidad de SI de resistencia eléctrica, Ω , como:

$$\Omega_{90} = \frac{R_K}{R_{K-90}} \Omega. \quad (4)$$

Es notable que de esta manera las expresiones de las unidades del SI de las mediciones de V_{ind} y de I introducen la constante de Planck y la carga del electrón.

Finalmente, la velocidad de desplazamiento v de la bobina se mide por interferometría láser utilizando un reloj atómico como referencia en la medición para la frecuencia de batido (el láser es previamente estabilizado en frecuencia y su color (frecuencia) es también medido con relojes atómicos); el valor de la aceleración local de la gravedad g se determina preferencialmente por interferometría de ondas de materia; el valor de la masa en unidades del SI puede expresarse como:

$$m = h \frac{1}{4qv} (IV_{\text{ind}})_{90} k_{J-90}^2 R_{K-90}. \quad (5)$$

En esta última relación queda de manifiesto claramente que la masa m depende del valor de la constante de Planck h y de cantidades que pueden ser medidas directamente en el experimento. Apoyados en esta relación se hace necesario fijar el valor de h para redefinir el kilogramo en términos de esta constante fundamental y dejar finalmente atrás la vieja definición sustentada en un cilindro de metal.

4. Conclusiones

En los últimos 40 años una serie de descubrimientos y desarrollos relacionados con la mecánica cuántica han transformado radicalmente nuestra visión sobre la metrología fundamental y el Sistema Internacional de Unidades. La estabilización de láseres por medio de la espectroscopia de saturación [18] fue el comienzo de esta revolución, la cual llevaría a la decisión de fijar el valor de la velocidad de la luz en el vacío como condición para definir la unidad de longitud en términos de dicha constante. Le siguieron otros importantes resultados, entre los cuales se puede citar al efecto Josephson, al efecto Hall cuántico, a la manipulación de átomos con luz y a los peines de frecuencia. Esta nueva realidad de la física constituye una fuerte motivación para redefinir el Sistema Internacional de Unidades en términos de constantes fundamentales, acercándose así de manera casi filosófica a las motivaciones que condujeron al nacimiento del Sistema Métrico Decimal, hace 120 años, “*una misma medida para todos los hombres y para todos los tiempos*”. De esta forma, las constantes fundamentales representan los puntos de apoyo últimos del SI, verdaderos invariantes (hasta donde el estado actual de la ciencia permite saber), a fin de desarrollar los sistemas de medición de muy alto nivel de exactitud como condición necesaria para la consecución de los avances científicos y tecnológicos por venir.

1. W. Kula, “*Las medidas y los hombres*” (editorial Siglo XXI, 1980).
2. J. Clerk Maxwell, “*A Treatise on Electricity and the Magnetism*” (publicado en 1872 por Clarendon Press, Oxford).
3. P.A.M. Dirac, “*Cosmological Models and the Large Numbers Hypothesis*” (Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, Volume 338, Issue 1615). pp 439-446.
4. F. Ramsey Norman, “*Molecular beams*” (Oxford University Press, 1956).
5. V. Gerginov *et al.*, “*Uncertainty evaluation of the caesium fountain clock PTB-CsF2*” *Metrologia* **47** (2010) 65-79.
6. J.L. Hall, “*Defining and measuring optical frequencies: the optical clock opportunity - and more*” (Nobel Lecture, December 8, 2005).
7. The NIST reference on constants, units and uncertainty <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
8. B.D. Josephson, “*The discovery of tunnelling supercurrents*”. *Rev. Mod. Phys.* **46** (1974) 251-254.
9. K. von Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, “*New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance*” *Phys. Rev. Lett.* **45** (1980) 494-497.
10. K.S. Novoselov *et al.*, “*Room-temperature quantum Hall effect in Graphene*”, *Science* **315** (2007) 1379.
11. T.P. Heavner *et al.*, “*NIST-F1: recent improvements and accuracy evaluations*”, *Metrologia* **42** (2005).
12. Mise en pratique of the definition of the metre, <http://www1.bipm.org/en/committees/cc/ccl/mep.html>
13. T.W. Hansch, “*Passion for precision*” (Nobel Lecture, December 8, 2005).
14. R.L. Steiner, E.R. Williams, R. Liu, and D.B. Newell, “*Uncertainty Improvements of the NIST Electronic Kilogram*”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56** (2007) 592-596.

15. E. de Carlos *et al.*, “*Temperature characterization of cold atoms in a cesium fountain clock*”, to be published.
16. http://www.bipm.org/en/scientific/elec/watt_balance
17. R.S. Davis, “*Possible new definitions of the kilogram*”, *Phil. Trans. R. Soc. A* **363** (2005) 2249-2264
18. E. de Carlos López and J.M. López Romero, “*High resolution spectroscopy and its application on the frequency stabilization of semiconductor lasers*”, *Rev. Mex. Fís.* **50** (2004) 569-578.