

ARTÍCULO ORIGINAL

HISTORIA, PRESENTE Y SUGERENCIA DE FUTURO PARA EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)*

History, present and suggestion for the future of the international system of units (SI)

Francisco González de Posada

Académico de Número de la Sección de Ingeniería de la Real Academia de Doctores de España

francisco.gonzalezdeposada@gmail.com

RESUMEN

Artículo conmemorativo de los 150 años de la Convención del Metro, con notas de su historia, destacando la participación española y el éxito alcanzado por el Sistema Internacional de Unidades (SI). Se ofrecen unas reflexiones críticas sobre éste con la intención de dotarlo de mayor científicidad, de manera que supere el nivel de toma de decisiones 'por consenso' y la expresa arbitrariedad mediante el uso de la Teoría Dimensional, sistema científico hipotético deductivo.

PALABRAS CLAVE: Metrología, Sistema Internacional de Unidades, Análisis Dimensional, Teoría Dimensional, Magnitudes, Unidades.

ABSTRACT

This article commemorates the 150th anniversary of the Metre Convention, providing historical context and highlighting Spanish participation and the success of the International System of Units (SI). The paper also offers critical reflections on the SI with the aim of strengthening its scientific foundations moving beyond consensus-based decision-making and the inherent arbitrariness of Dimensional Theory, a hypothetical-deductive scientific system.

KEYWORDS: Metrology, International System of Units, Dimensional Analysis, Dimensional Theory, Magnitudes, Units

* Sesión académica de la RADE celebrada el 05-11-2025 con el título *El 150 Aniversario de la Convención del Metro en el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas*. <https://www.rade.es/pagina.php?item=1977>

1. INTRODUCCIÓN

El 20 de mayo de 1875 se firmó en París el Tratado Internacional denominado “Convención del Metro” que sentó las bases del actual Sistema Internacional de Unidades (SI). Se constituyó en elemento primicial y primordial para el desarrollo de la Metrología como ciencia fundamental para el desarrollo científico y tecnológico.

Se describe sintéticamente la historia de la Metrología destacando expresamente el papel desempeñado por científicos españoles, con la consideración de que ha sido verdaderamente excepcional, sobre todo en relación con el poco aporte que la ciencia española ha ofrecido a los desarrollos de otros campos de la ciencia.

El presente año 2025 fue declarado “Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología cuánticas” (IYQ 2025) por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 7 de junio de 2024. La revolución cuántica conmocionó, desde el año 1900 (y no sólo desde 1925), todo el edificio de la Física, y con ello la Matemática y la Filosofía, sus dos pilares, con significativas presencias en el CIPM.

Por nuestra parte participamos en estas efemérides bajo la perspectiva del gran filósofo español Ortega y Gasset con su “Conmemorar es recordar con vistas al futuro”.

Se dedica este trabajo al largo centenar de notables físicos e ingenieros que han dedicado considerables esfuerzos, desde sus conocimientos y sus esperanzas, a la constitución de un sistema internacional de unidades. Entre ellos no han faltado egregios españoles, entre los que nos honra citar a Gabriel Císcar (Oliva, Valencia, 1760; Gibraltar, 1829), Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero (Barcelona, 1825; Niza, 1891), Leonardo Torres Quevedo (Santa Cruz de Iguña, Cantabria, 1852; Madrid, 1936) y Blas Cabrera Felipe (Arrecife, Lanzarote, 1878; México, 1945).

Para la firma del Tratado de la Convención del Metro, Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero fue determinante en su negociación, y posteriormente en su puesta en marcha como presidente (1875-1891). En este año 2025 se cumplen los 200 años de su nacimiento, efeméride también digna de consideración y recuerdo.

Por otra parte, Blas Cabrera Felipe, físico español, desempeñó singulares papeles en el Comité Internacional de Pesas y Medidas, en el que ocupó el cargo de Secretario. Esta institución le facilitó la vida en el exilio de París (1937-1941) antes de marchar al exilio final en 1941 a México donde falleció en 1945. A los cincuenta años de su muerte, entre otras numerosas celebraciones le dedicamos un monumento en su ciudad natal, Arrecife (Lanzarote), que se inauguró el día 20 de mayo de 1995, hace 30 años, como puede observarse también 20 de mayo como la Convención del Metro.

Conmemoramos así el 150 aniversario, y del Comité Internacional de Pesas y Medidas, organismo encargado de dirigir el proceso del establecimiento y de la definición de las unidades del Sistema Internacional que se ha consolidado a lo largo de este tiempo: 1) por su eficacia en el logro de un sistema de unidades, su unificación; y b) por el alto grado de universalidad alcanzado por el mismo.

2. OBJETO PRINCIPAL

El trasfondo de este artículo refiere al deseo de ofrecer la *Teoría Dimensional*, desde el éxito en sus aplicaciones a las diferentes teorías físicas, al análisis del Sistema Internacional de Unidades SI, una vez establecido en ella el concepto de dimensión de las magnitudes consideradas en las diferentes teorías físicas y deducidos para cada una de ellas los elementos dimensionales fundamentales: 1) orden dimensional de la teoría; 2) bases posibles; 3) base usual; y 4) fórmulas dimensionales de todas las magnitudes en las diferentes bases.

Desde esa luz puede concretarse el objeto primordial, señalar la necesidad de un estudio analítico crítico del Sistema Internacional de Unidades SI desde una mirada científizada, a la luz de la *Teoría Dimensional*.

El SI presenta dos caracteres, aparentemente al menos, antagónicos:

1. El éxito de su uso generalizable y generalizado, de difusión creciente.
2. La convicción intrínseca explícita de que se construye *ex novo*, tanto al margen (quizás mejor, de modo paralelo) de teorías físicas como de teorías matemáticas, según se manifiesta expresamente en el Documento de 2018 reiterando la categoría formal “por convenio”. Así, pues, el Sistema Internacional de Unidades SI no se ha deducido mediante un tratamiento científico hipotético-deductivo que conduzca a un sistema científicamente consistente.

Y manifiesta un hecho notable: la construcción ha sido realizada por notables físicos, ingenieros y militares de talla mundial durante unos 225 años (historia que se sintetiza más adelante) y en la que han colaborado relevantes científicos españoles, tanto en sus primeros momentos², 1798, como en la institucionalización internacional³, 1875, y desde entonces hasta el presente.

Nuestra presencia activa en este campo consiste en ofrecer un contraste del SI con el sistema básico dimensional que ofrece la *Teoría Dimensional* para dotar al SI de valor

² Caso de Gabriel Císcar y Císcar.

³ Caso de Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero.

intrínsecamente científico. Es decir: el objetivo final consiste en dotar de científicidad al SI. De manera concreta, puede afirmarse que necesita fundamentarse en teorías matemáticas hipotético-deductivas sobre los elementos primordiales básicos: 1) Teoría matemática de las magnitudes físicas, 2) Teoría matemática de las leyes físicas, 3) Teoría matemática de las teorías físicas; y 4) Teoría matemática del concepto de dimensión de las magnitudes físicas.

3. NOTAS DE HISTORIA DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Unas breves notas acerca de la historia del problema de las unidades y de la Organización Internacional nacida con la Convención del Metro que le ha dado una respuesta, exigiría, al menos, tres capítulos, que aquí no es posible abarcarlos con suficiente desarrollo.

Primer capítulo. La historia institucional, desde la Reunión de París de 1788-89 hasta el presente de la Conferencia Internacional de Pesas y Medidas (CGPM). Es decir, una perspectiva prioritariamente institucional más que propiamente científica.

Segundo capítulo. La historia intrínseca de los contenidos, acerca del quehacer de la institución.

Tercer capítulo. La contribución española, para destacar la presencia y la actividad española en la historia institucional, presencia y actividad que han sido de suma relevancia. Así, dejamos constancia, una vez más, de nuestra tradicional españolidad.

Los problemas implicados hacen referencia a magnitudes, cantidades, unidades y medidas, sin importar las teorías físicas ni mucho menos el concepto de dimensión, que ha quedado al margen a lo largo de esta historia. El problema central es el de la medida, o las medidas, y, consecuentemente, el de la unificación de las unidades, consiguiendo un sistema internacional. No, por tanto, directa ni propiamente, la sumisión a una teoría de las magnitudes.

El intento pionero de acordar un sistema internacional de unidades de medidas de cantidades de unas magnitudes físicas, que se considerarían fundamentales (para la vida ciudadana en común, no necesariamente para la ciencia) tuvo lugar en 1798 y 1799 en la denominada Comisión de Pesos y Medidas organizada por el Instituto de Francia, con las finalidades siguientes: 1) la intención de establecer un sistema de unidades único, internacional, con pretensiones de que fuera mundial, de pesas y medidas; 2) la creación de un 'sujeto político supranacional' para su garantía; 3) la búsqueda de unificación de las 'unidades fundamentales' con fijación de patrones respectivos; y 4) con un objetivo prioritariamente comercial. Se concluiría con el establecimiento del Sistema Métrico Decimal que se consideró como culminación de la Ilustración, fase de la historia constituida tras el establecimiento del sistema newtoniano-kantiano cosmológico, concluida la 'etapa

históricamente considerada como intensamente revolucionaria' (1789-1794) de la establecida como 'Revolución francesa'.

3.1. Prehistoria. Prolegómenos, en y para Francia, durante la Revolución

Con referencia al Sistema Internacional de Medidas, sin recurrir a tiempos antiguos sino referidos a los inicios de la Ilustración, permite situar el comienzo de esta prehistoria en la expedición científica al Ecuador⁴ para la determinación de la forma y tamaño de la Tierra. Allí, Louis Godin, académico francés director de la expedición geodésica al Virreinato del Perú, construyó una nueva *toesa* -la "toesa del Perú"⁵-, unidad patrón referida en Francia hasta la reunión del Instituto de Francia de 1798 en la que se pretendió imponer el *metro* como unidad de medida de longitud, unidad básica, con referencia (supuestamente exacta) a la Naturaleza⁶ ("diezmillonésima parte de la longitud de un cuadrante de meridiano terrestre").

El metro sería medida universal para el mundo de la Ciencia, del Comercio y de la Industria. Y de alguna manera constituiría una respuesta de fraternidad humana y de búsqueda de unidad. Se necesitaría, entonces, el logro de un patrón que no sufriera alteraciones en los diversos lugares y en el transcurso del tiempo. Se intentaba, se prefería, un arco terrestre, referido al cuarto de meridiano como diezmillonésima parte, en torno al paralelo 45 y al nivel del mar: la respuesta fue el meridiano Dunkerque-Barcelona, mejor que las observaciones en el Ecuador.

La ley de 23 de septiembre de 1795 hizo obligatorio el *metro* en París desde el 22 de diciembre.

3.2. Protohistoria. Intento de internacionalización

Con objeto de establecer el *metro definitivo internacional*, Talleyrand, ministro de Estado francés, implantando el *nuevo sistema métrico* invitó a los entonces países aliados y amigos de Francia en solicitud de sabios para que concurrieran con los comisionados franceses citados al Instituto Nacional de Francia para fijar nuevas pesas y medidas. Se reunieron en París en

⁴ González de Posada (2025): *Louis Godin y Jorge Juan: pioneros de la ciencia moderna en España*, Edicions Locals Augusto Beltrá Editor.

⁵ En la magnífica obra de Cadarso (2021) se cuela la tenebrosa visión francesa de la expedición al Ecuador, de manera que escribe: "La Condamine quiso hacer adoptar en su momento la 'toesa del Ecuador' que él había construido en 1735 con arreglo a la de Châtelet, y que por haber sido mejor conservada era "una copia más auténtica que la original". Sería 'patrón' de longitud para Francia por Declaración Real de 16 de mayo de 1766. La referencia a La Condamine se hace reiterativa. Ya hemos señalado con intensidad la desvirtuación francesa de la jefatura de la Expedición en nuestra tesis doctoral en Historia y reciente libro *Louis Godin y Jorge Juan: pioneros de la ciencia moderna en España* (2025).

⁶ González de Posada (2021): "La memoria elemental 'Sobre los nuevos pesos y medidas fundados en la Naturaleza' de Gabriel Císcar, documento germinal de la metrología española".

septiembre de 1798. Comienza así una etapa internacional que ocupa el cénit de la era que, a nuestro juicio, puede considerarse como Protohistoria del Sistema Métrico Decimal.

El 22 de junio de 1799 se depositaron los patrones del metro y del kilogramo, en platino, en los Archivos Nacionales franceses, fecha que se considera como acto fundacional del sistema métrico⁷.

Se trataba básicamente de la determinación del metro y del kilogramo. Por ley de 10 de diciembre de 1799 se dispuso que el *metro* y el *kilogramo* de platino depositados en los Archivos de la República fueran los ‘patrones definitivos’ respectivamente de longitud y peso (masa). Se tuvo conciencia general acerca de que la principal ventaja del nuevo sistema era la escala decimal. Mediante disposición consular de 4 de noviembre de 1800 se acuerda que a partir del 24 de septiembre de 1801 el sistema métrico decimal sería obligatorio en toda la República.

La definición elegida del *metro* fue: “la diezmillonésima parte de la longitud de un cuarto del meridiano terrestre que pasa por París y une Dunquerque con Barcelona”⁸.

La idea de que la unidad básica fuera ‘natural’ obligaba a determinar las dimensiones de la Tierra encontrando una longitud natural, tomándose el cuarto de meridiano con preferencia a cualquier otra fracción, a causa de su carácter único de ángulo recto. Aunque la definición fuera general, la medida tendría que ser necesariamente particular. Y se eligió como arco de meridiano a medir el comprendido entre Dunkerque y Barcelona, basado en que sus extremidades se encontraban al nivel del mar. Pero estaba vivo el problema del aplanamiento de la Tierra, y, por tanto, el problema de fijar un metro “verdadero y definitivo” y los metros prototipos.

Así, Cadarso escribiría⁹: “La fundación del Sistema Métrico Decimal se confunde con la de la Revolución Francesa: comienza y acaba con ella, de manera que la sanción legal de los patrones definitivos se realiza cuatro días antes de la terminación de la Revolución. Aquí acaba verdaderamente la historia de los orígenes del Sistema Métrico Decimal: ‘las unidades son definidas por sus patrones’”. Sin embargo, no sería obligatorio en Francia hasta el 1 de enero de 1840.

En el segundo tercio del siglo XIX asumen especial relevancia internacional las Academias de Ciencias de París y de San Petersburgo, así como la Real Sociedad de Londres. Junto a

⁷ Ibáñez e Ibáñez de Ibero (2019), p. 316. En su *Resumen de los trabajos preparatorios de la Comisión Internacional. 1871-1872*. CEM.

⁸ *Ibíd.* De hecho, estaba pendiente la triangulación.

⁹ Cadarso (2021), p. 47. El uso de negritas es nuestro.

ellas, en el tiempo, se crea en España la de Ciencias Naturales en 1834 y finalmente en 1847 la de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La reunión de la Comisión prevista para el 8 de agosto de 1870 se suspendió al estallar la guerra francoalemana¹⁰. Concluida esta guerra, finalmente sería convocada en París en 1872 una Comisión Internacional con delegados representantes de 30 estados. Un estudio de gran relevancia histórica sobre el desarrollo de las gestiones y realizaciones en esta etapa ‘pre-Convención del Metro’ es la importante e interesante obra manuscrita de Ibáñez e Ibáñez de Ibero¹¹.

En esta reunión se crean con carácter provisional una Comisión Internacional, un Comité Permanente y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas. Y se marca el objetivo de unificar y dar al Sistema Métrico carácter de uso internacional.

La historia de la Organización Intergubernamental de la Convención del Metro, que concentra su actividad en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, aunque no escrita formalmente como historia al modo usual, queda perfectamente establecida en los Anexos del Documento¹² *Sistema Internacional de Unidades SI*, la fuente más significativa como fundamentos temporales de los sucesivos acontecimientos.

3.3. La Convención del Metro, 1875. Primera fase de la historia

En París, el 1 de marzo de 1875, se celebra la *Conferencia Diplomática del Metro*. De ella conviene destacar las siguientes ideas.

- a. Como asunto primordial, se perseguía acordar el establecimiento del *metro* como unidad fundamental basada en dos de sus características: (la supuesta condición de) unidad natural y (la deseada de) unidad universal.
- b. Se establece el Sistema Métrico Decimal como general y obligatorio para los países firmantes.

¹⁰ O guerra franco-prusiana, 1870-71, entre el Segundo Imperio Francés y el Reino de Prusia. El 16 de julio de 1870 el Parlamento francés había declarado la guerra a Prusia.

¹¹ Ibáñez (2019): *Resumen de los trabajos preparatorios de la Comisión Internacional*. CEM.

¹² CEM (2019). Edición española de la 9ª edición de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, Organización Intergubernamental de la Convención del Metro. Se deja constancia del texto impreso: “Este documento ha sido redactado después de obtener la autorización del BIPM, que conserva plenamente los derechos de autor internacionalmente protegidos. El BIPM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la idoneidad, exactitud, integridad o calidad de la información y los materiales ofrecidos en cualquier traducción. La única versión oficial es la publicada por el BIPM. El Centro Español de Metrología publica la traducción al español de esta edición del Sistema Internacional de Unidades, tanto en formato impreso como electrónico en www.cem.es con autorización expresa del BIPM.”

- c. Destaca la figura de Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero¹³, que sería elegido primer presidente del CIPM, cargo que desempeñaría entre 1875 y 1891¹⁴.

La historia propiamente da comienzo el 20 de mayo de 1875, día en que se firmó en París, por los representantes de 17 Jefes de Estado, el denominado Tratado de la Convención del Metro por el que se crea una organización científica internacional con objeto de que mediante una estructura permanente facilite a los estados miembros ejercer una acción común sobre todas las cuestiones que se relacionan con las unidades de medida, de forma que se garantice la unificación mundial de las mediciones físicas.

Esta organización internacional científica se ha desarrollado mediante un conjunto de organismos que se estructuran de la siguiente manera:

1. Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) integrada por representantes de los Gobiernos de los países firmantes del Tratado,
2. Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) bajo la autoridad del CGPM que informa a ésta previamente a cada reunión de la misma.
3. Oficina Internacional de Pesas y Medidas (*Bureau* y/o BIPM), laboratorio científico permanente, que es supervisado por el CIPM.
4. Comités Consultivos creados por el CIPM que reúnen a expertos mundiales en cada campo particular de la Metrología, que se constituyen en consejeros sobre las cuestiones científicas y técnicas. Estudian los progresos y problemas científicos y técnicos que se relacionan e influyen en la Metrología, de modo que: a) preparan recomendaciones para su discusión en el CIPM; b) organizan las comparaciones internacionales de patrones; y c) aconsejan al CIPM acerca de los trabajos científicos que deben efectuarse en el BIPM.

Estos Comités tendrían relación con los laboratorios de metrología de los diferentes países.

3.4. Segunda fase de la historia

El proceso de ampliación y caracterización de las seis primeras unidades básicas culminó en la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas, París octubre de 1960, donde se acepta el Sistema Internacional de Unidades (SI), compuesto por seis unidades fundamentales, dos unidades suplementarias y veintisiete unidades derivadas. Parece conveniente reproducir las definiciones de las unidades fundamentales como figuran en el Artículo primero de la Ley española de 8 de noviembre de 1967.

¹³ Minibiografías de los españoles aquí citados pueden verse en la obra *Personajes españoles relevantes en el campo de la metrología* (2022) del Instituto de la Ingeniería de España.

¹⁴ Año en que falleció, en Niza. La presencia española se garantizaría posteriormente con Francisco de Paula Arrillaga, ingeniero de montes, y Eduardo Saavedra, ingeniero de caminos, quienes ocuparían la cabecera de las formalidades en el período posterior.

	Unidades	Símbolos
Longitud	metro	m
Definición: El metro es la longitud igual a 1.650.763,73 longitudes de onda, en el vacío, de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles $2p_{10}$ y $5d_5$ del átomo de kriptón 86.		
Masa	kilogramo	kg
Definición: El kilogramo masa es la masa del prototipo de platino iridiado, sancionado por la III Conferencia General de Pesas y Medidas en 1901 y depositado en el Pabellón de Breteuil, de Sévres.		
Tiempo	segundo	s
Definición: El segundo es la fracción $1/31.556.925,9747$ del año trópico para enero de 1900, cero a doce horas del tiempo de efemérides.		
Intensidad de corriente eléctrica	amperio	A
Definición: El amperio es la intensidad de corriente eléctrica constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados en el vacío a una distancia de un metro uno de otro, produce entre estos dos conductores una fuerza igual a $2 \cdot 10^{-7}$ Newton por metro de longitud.		
Temperatura termodinámica	grado Kelvin	°K
Definición: El grado Kelvin es el grado de la escala termodinámica de las temperaturas absolutas, en la cual la temperatura del punto triple del agua es 273,16 grados. Se puede emplear la escala Celsius, cuyo grado es igual al grado Kelvin y su punto cero corresponde a 273,15 grados de la escala termodinámica Kelvin.		
Intensidad luminosa	candela	cd
Definición: La candela es la intensidad luminosa en una dirección determinada de una abertura perpendicular a esta dirección, que tenga una superficie de $1/60$ centímetros cuadrados y radie como un radiador integral (cuerpo negro) a la temperatura de solidificación del platino.		

3.5. La actualidad, 2018. Redefiniciones de las unidades básicas. Tercera fase de la historia.

El CIPM está formado por dieciocho miembros, cada uno de un Estado distinto; en la actualidad se reúnen todos los años. Los miembros del Comité envían a los Gobiernos de los Estados firmantes de la Convención del Metro un informe anual sobre la situación administrativa y financiera del BIPM. La misión principal del Comité es asegurar la uniformidad mundial de las unidades de medida, ya sea actuando directamente o presentando propuestas a la CGPM.

Ya en el siglo XXI se plantea el problema de la redefinición de algunas de las unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades SI de manera que los hitos principales de este proceso pueden significarse institucionalmente por las siguientes referencias¹⁵:

¹⁵ CEM (2019), p. 41.

23ª CGPM, 2007, posible redefinición de algunas unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades SI.

24ª CGPM, 2011, posible revisión futura del Sistema Internacional de Unidades, SI.

25ª CGPM, 2014, futura revisión del Sistema Internacional de Unidades SI.

26ª CGPM, 2018, revisión del Sistema Internacional de Unidades SI (para su entrada en vigor el 20 de mayo de 2019).

La actualidad de la Organización Intergubernamental de la Convención del Metro, que concentra su actividad en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM según siglas en francés) viene determinada por las decisiones adoptadas en el año 2018. La referencia aquí utilizada es la edición en español del Centro Español de Metrología¹⁶ del Documento “El Sistema Internacional de Unidades SI”.

En la actualidad se manifiesta el gran logro alcanzado por mediación de las ‘constantes definitorias’, como resume en las siguientes tablas:

Tabla 1. Las siete constantes definitorias del SI y las correspondientes siete unidades definidas por ellas

Constante definitoria	Símbolo	Valor numérico	Unidad
Frecuencia de la transición hiperfina del Cs	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
Velocidad de la luz en el vacío	c	299 792 458	m s ⁻¹
Constante de Planck	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
Carga elemental	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Constante de Boltzmann	k	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J K ⁻¹
Constante de Avogadro	N_{A}	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol ⁻¹
Eficacia luminosa	K_{cd}	683	lm W ⁻¹

Tabla 2. Unidades básicas del SI

Magnitud básica		Unidad básica	
Nombre	Símbolo habitual	Nombre	Símbolo
tiempo	t	segundo	s
longitud	$l, x, r, \text{etc.}$	metro	m
masa	m	kilogramo	kg
corriente eléctrica	I, i	amperio	A
temperatura termodinámica	T	kelvin	K
cantidad de sustancia	n	mol	mol
intensidad luminosa	I_{v}	candela	cd

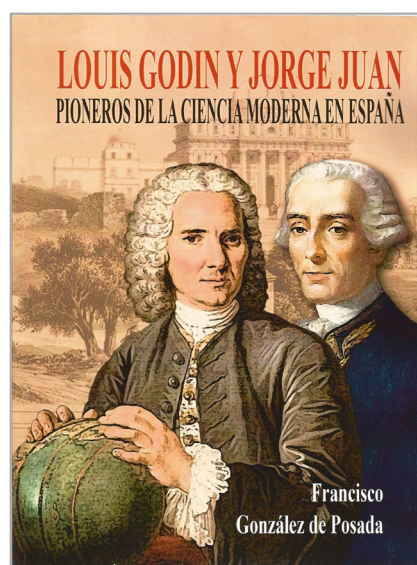
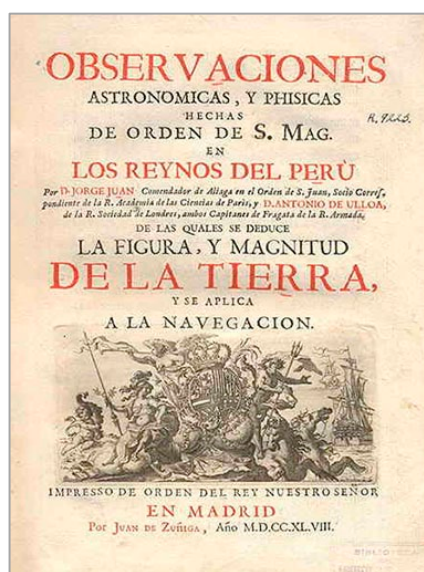
¹⁶ CEM (2019).

Esta redefinición de 2018/2019 del Sistema Internacional de Unidades se considera hito fundamental para el desarrollo (a través de la definición de unidades sobre la base de constantes físicas fundamentales y efectos de naturaleza inherentemente cuántica) del conjunto de técnicas y métodos de análisis de información basados en leyes específicamente asociadas al comportamiento cuántico de la naturaleza que se conoce como Metrología Cuántica.

4. NOTAS DE LA HISTORIA ESPAÑOLA

4.1. Prehistoria: Louis Godin y Jorge Juan

Dada la generalizada referencia que se hace a la expedición geodésica al Ecuador organizada por la *Académie des Sciences* de Francia, dirigida por Louis Godin y en la que participaron los marinos españoles Jorge Juan y Antonio de Ulloa, es obligado dejar constancia de este primer hecho prehistórico del Sistema Métrico Decimal.



4.2. Protohistoria. Gabriel Císcar, pionero de la Metrología en España, 1800-1821

Tras los acontecimientos históricos de la Revolución francesa expuestos en el Capítulo I de esta Segunda Parte con los primeros intentos para la unificación de medidas, el Instituto de Francia consideró oportuno organizar en 1798 en París una Reunión con la finalidad de establecer el *sistema métrico decimal* con carácter universal. Y aquí jugó un importante papel el marino español Gabriel Císcar que nos dejó interesantes recuerdos y sugerencias en sus obras: *Memoria elemental sobre los nuevos pesos y medidas fundados en la naturaleza*

(1800) y *Apuntes sobre medidas, pesos y monedas, que pueden considerarse como una segunda parte de la Memoria Elemental* (1821).

Primero. ‘Nuevo’ sistema. Se trata de *nuevas unidades* de medidas especiales (longitud, superficie y volumen) y de pesos. La novedad se refería no tanto al hecho de ser nuevos sino de constituir novedad radical, por la pretensión de validez de uso universal común. A fin de cuentas, relativo al marco de las ya tradicionales magnitudes básicas establecidas por Newton de espacio y masa. En este marco queda pendiente la tercera de las concebidas como categorías fundamentales desde Aristóteles a Newton, el tiempo.

Segundo. Carácter decimal de las nuevas unidades. Será el logro máximo, en perspectiva matemática, considerado desde este momento inicial: la organización de las unidades según un sistema decimal, tanto en el sentido creciente como en el decreciente para todas las magnitudes.

Tercero. Sistema ‘fundado en la Naturaleza’, consideración máxima desde la perspectiva de la Física.

4.3. La ley española de 1849

Se promulga en 1849 la “Legislación de Pesas y Medidas del Sistema Métrico Decimal”. Según ella “La unidad fundamental de este sistema será igual en longitud a la diezmillonésima parte del arco del meridiano que va del Polo Norte al ecuador y se llamará *metro*”. Y “Las demás unidades de medida y peso se forman del metro”.

Con el título, ciertamente extenso, de “Manifestación de fe en el *metro*: su (supuesto) carácter natural y su (establecida) condición de única unidad fundamental de pesas y medidas” hemos participado en la conmemoración del 175 aniversario de la “LEGISLACIÓN DE PESAS Y MEDIDAS DEL SISTEMA MÉTRICO DECIMAL”, ley para el establecimiento de “un solo sistema de medidas y pesas en todos los dominios españoles”, de 19 de julio 1849, decretada por las Cortes y sancionada y rubricada por Isabel II, organizada por el Centro Español de Metrología con tan fausto motivo.

4.4. Con Ibáñez de Ibero nace la historia general: la Convención del Metro, 1875

Resulta un tanto sorprendente que una España científicamente apartada de la ciencia europea desde que se instaura la ‘ciencia moderna’ haya estado tan firmemente integrada en el proceso internacional de la Convención del Metro, no sólo en las catalogadas como prehistoria y protohistoria sino desempeñando papeles de primera categoría a lo largo de su historia. En nuestro compromiso personal con la colocación de la ciencia española en el lugar que le corresponde, haciendo patria sin estéril ni vacío patriotismo, debe dejarse

constancia de que en este tema estuvo siempre en convergencia con Europa. Veamos sucintamente¹⁷.

4.5. La ley de 8 de julio de 1892, segunda ley española

El 20 de mayo de 1875 se había firmado la Convención del Metro y nombrado presidente a Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero. Éste, a su regreso de París, se preocupó en España de dotar de colecciones de pesas y medidas a todos los Ayuntamientos que carecieran de ellas¹⁸. En 1880 entrega en la Oficina Internacional de Breteuil los tipos de metro y kilogramo de platino pertenecientes a la Comisión Española para ser comparados con los prototipos internacionales. El 15 de julio de 1889 Ibáñez preside su última sesión de la Comisión. El 7 de noviembre de 1890 toma posesión como Director General del Instituto Geográfico y Estadístico el vocal de la Comisión Francisco de Paula Arrillaga. El 29 de enero de 1891 muere en Niza Carlos Ibáñez.

En 1892 se promulga la segunda ley española en la que se establece que “La unidad fundamental del sistema será la longitud del metro prototipo construido ... según el Convenio de París de 1875...”

4.6. La problemática española hasta 1950: la figura de Blas Cabrera

Destacamos aquí que en el Comité Internacional formaba parte en representación de España Leonardo Torres Quevedo¹⁹, ingeniero de Caminos y académico de Ciencias, “el más prodigioso inventor de su tiempo” según Maurice d’Ocagne, presidente de la Sociedad Matemática de Francia.

A la reunión del *Bureau International des Poids et Mesures* de 1929 debe asistir como Delegado de España, el vocal de la Comisión, que sustituiría a Don Leonardo en 1928, Blas Cabrera Felipe²⁰, físico y también académico de Ciencias, en el momento de su ‘consagración internacional’, según hemos comentado con reiteración en diferentes publicaciones, en conexión con su hijo Nicolás Cabrera Sánchez, por su ingreso en la Academia de Ciencias de París, y, sobre todo, por su integración en el Comité Solvay.

En este período de Torres Quevedo y Blas Cabrera como Delegados de España en el CIPM se inicia la constitución de Comités Consultivos, de manera que crece paulatinamente la

¹⁷ Para mayor extensión e intensidad podrá verse el libro en elaboración *Blas Cabrera en el Comité Internacional de Pesas y Medidas* que, con la colaboración de la Prof. Dra. Dominga Trujillo Jacinto del Castillo, preparamos para conmemorar el 150 aniversario de la Convención del Metro (1875-2025).

¹⁸ Puede verse el Capítulo V de Cadarso (2021).

¹⁹ Son numerosas las obras que hemos dedicado a este ingeniero de Caminos.

²⁰ En la actualidad estamos cerrando, con la colaboración de la profesora Dominga Trujillo Jacinto del Castillo, la obra *Blas Cabrera en el Comité Internacional de Pesas y Medidas*.

importancia de los papeles a desempeñar por el CIMP y el Bureau, con una creciente presencia de físicos e ingenieros.

4.7. La tercera ley española, 1967

En 1967 se promulga la nueva “Ley de Pesas y Medidas” de 8 de noviembre que declaraba de uso legal en España el Sistema Internacional de Unidades de Medidas SI. Compuesto por seis unidades fundamentales, dos unidades suplementarias y veintisiete unidades derivadas.

5. LA FORMA DE LA TOMA DE DECISIONES: “POR CONVENCIÓN” Y “CONSENSO”

Centraremos la atención de manera rigurosa reproduciendo unas consideraciones explícitas del propio CIPM.

1. La característica primordial, a nuestros efectos presentes, es el establecimiento de las unidades básicas “por convención”.

El Sistema Internacional de Unidades o sistema internacional es un sistema constituido por siete unidades básicas: metro, kilogramo, segundo, kelvin, amperio, mol y candela, que definen las correspondientes magnitudes físicas fundamentales y que han sido elegidas por convención.²¹

En torno al concepto de unidad en el marco de la Conferencia Internacional se ha escrito:

Por convenio la unidad elegida es la cantidad de magnitud a la cual atribuimos el valor unitario. Este valor es elegido normalmente por convención y con el consenso internacional²².

Es decir, se destacan expresamente las dos características sustantivas del procedimiento para su elección y establecimiento: convención y consenso internacional.

Con otras palabras, podría concretarse algo más:

En principio la elección de unidades es convencional y en gran parte arbitraria. No hay razones convincentes para elegir una unidad con prioridad sobre otra, pero es totalmente necesario indicar, que un conjunto de unidades no debe ser elegido de una manera arbitraria, sino que su elección nos debe llevar al encuentro de un conjunto coherente. Se dice que un sistema de unidades es coherente cuando su conjunto es capaz de simplificar la expresión de las leyes físicas o al menos de un

²¹ CEM (2019).

²² Cadarso Montalvo (2021), p. 181.

determinado número de leyes, pero hay que tener en cuenta que, si se radicaliza la elección en un sentido determinado, ésta definida tendencia nos puede conducir a diferentes sistemas²³.

La coherencia así concebida sería, en su caso, una consecuencia fortuita *a posteriori* del modo utilizado -convención y consenso- para ir estableciendo los elementos del sistema, pero, por este proceder, no se habría deducido un ‘sistema coherente’ a partir de las teorías físicas.

2. Ofrece definiciones operacionales de las unidades básicas [Una pequeña observación lingüística: *base* debería ser científica, es sustantivo, y dirige hacia sustantivo, carácter que parece lo es por sí], *fundamentales* [orienta más bien a adjetivo, algo que se le concede o se le afecta].

El Sistema Internacional de Unidades SI define siete unidades básicas o unidades físicas fundamentales, las cuales son descritas por una definición operacional y son independientes desde el punto de vista dimensional.²⁴

3. Afirmación no justificada (científicamente) de que sean independientes desde el punto de vista dimensional, asunto que propiamente no se trata en absoluto.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) define siete unidades básicas o unidades físicas fundamentales, las cuales son descritas por una definición operacional y son independientes desde el punto de vista dimensional.²⁵

4. Constituyen, al menos en el presente, un sistema cerrado de 7 unidades fundamentales asociadas a 7 magnitudes fundamentales.

Estas unidades básicas del SI y sus magnitudes físicas son el metro para la longitud, el kilogramo para la masa, el segundo para el tiempo, el amperio para la intensidad de corriente eléctrica, el kelvin para la temperatura, la candela para la intensidad luminosa y el mol para la cantidad de sustancia.²⁶

Esta condición de ‘sistema cerrado de siete unidades básicas’ no es una consecuencia científica sino propiamente una afirmación gratuita, “por convenio”. Es decir, se presenta al margen de algún fundamento teórico (hipotético-deductivo matemático) que deduzca el orden de basicidad 7 para las magnitudes y unidades de la Física.

²³ *Ibid.*

²⁴ CEM (2019).

²⁵ *Ibid.*

²⁶ *Ibid.*

5. Afirmación relativa al uso del *Análisis Dimensional* para la obtención y caracterización de las magnitudes secundarias.

Todas las demás unidades utilizadas para expresar magnitudes físicas se pueden derivar de estas unidades básicas y se conocen como unidades derivadas. La derivación se lleva a cabo por medio del análisis dimensional.²⁷

Esta nueva nota caracterizadora del Sistema Internacional afirma indirectamente que no ha hecho uso del *Análisis Dimensional* tradicional para todo lo fundamental (lo registrado en las 4 primeras notas) que se ha descrito en los puntos precedentes, y expresamente que se utiliza para la obtención de lo derivado (o consecuentemente secundario).

Así, una vez más, se entroniza, aunque sin pretensiones porque en este ámbito no ha interesado de hecho, el *Análisis Dimensional* como método, según su origen bridgmaniano (criticado por Palacios y Bunge), para ‘ayudar’ a la constitución de un marco que sea en algún sentido presupuestamente científico, aunque no se conceda a ‘lo dimensional’ (carente en su existencia tradicional de un sistema hipotético-deductivo matemático que se sitúe al principio de las magnitudes y teorías físicas) ningún papel en los fundamentos del Sistema Internacional.

Los patrones materializan las unidades definidas internacionalmente.

Este panorama conduce, en su condición de conceptos básicos metrológicos, a la consideración clásica en los más de 200 años de Metrología a centrarse en “las magnitudes base, sus unidades y sus patrones”²⁸.

6. UNAS PRIMERAS CONSIDERACIONES CRÍTICAS

A modo de síntesis, como expresión crítica a las notas constitutivas precedentes, que resultan así indirectamente manifestadas, pueden fijarse las siguientes cuestiones de relevancia.

1. El ámbito intelectual subyacente desde el origen hasta el presente se ha centrado en las unidades *per se*, independientemente de las teorías físicas y de los elementos fundamentales de éstas de naturaleza matematizable: magnitudes, leyes, teorías y dimensión. Así, las unidades en el panorama general del Sistema Internacional se constituyen en elementos primarios desplazando la teoría de las magnitudes.

²⁷ *Ibid.*

²⁸ Cadarso Montalvo (2021), p. 184.

2. La construcción generativa de las consideradas como unidades básicas se ha realizado “por convenio” hasta la constitución del “sistema de unidades básicas o fundamentales” establecido.
3. No se ha tenido en cuenta el *Análisis Dimensional* para deducir o al menos justificar la construcción del sistema, aunque se afirma recurrir a él para la obtención de las ‘unidades derivadas’ desde las básicas o fundamentales.
4. Las unidades, con su extraña consideración de entidades primarias, adquieren el papel de entidades primordiales o principales.
5. La denominación -y condición- de básicas también la adquieren “por convenio”.²⁹
6. En ningún momento de la carrera de fondo de más de dos siglos (con numerosísimas publicaciones elaboradas en las muchas y extensas reuniones) se ha pretendido buscar fundamento en la esfera de la científicidad. El trasfondo impulsor lo constituía la utilidad para el comercio, la industria y la ciencia. Y la máxima expresión de esta utilidad radicaba en la unificación del sistema para todos los estados, en su internacionalidad. Las unidades (y sus patrones) que eran necesarias, debían ser prácticas y servir de modo internacional, aunque no fueran necesariamente científicas u obtenidas mediante método científico.

La formulación de una pregunta surge de inmediato: ¿Por qué resulta tan útil, tan preciso, tan coherente, tan relevante, aceptado por todo el cuerpo de las ciencias y las técnicas, ... sin rechistar, con creciente validez, ... y tantas personas con sobrados conocimientos trabajando en este ámbito, ... y se reitera “por convenio”; es decir, desde la nada o bien desde la absoluta carencia de fundamentos de teorías matemáticas que le den garantía científica?

A modo de avance, nuestro objeto consiste en dar al SI sentido científico hipotético-deductivo en consonancia con la Física. El problema básico es que ésta “no ha resuelto adecuadamente” el campo de ‘lo dimensional’, territorio propio del SI en sus fundamentos.

En tanto que análisis crítico científico, conviene introducir otras dos ideas: 1) La fundamentación debe hacerse mediante una teoría (supuesta al menos) de las magnitudes físicas y sus unidades asociadas; y 2) Como criterio básico no basta, en consecuencia, la elección *per se* de unas determinadas magnitudes (y/o unidades) fundamentales “por convenio”.

Para contrastar con lo que se expone como objeto conviene señalar que nuestro planteamiento: a) No es por convención ni por acuerdo internacional sino por desarrollo matemático hipotético-deductivo; b) Los conceptos de referencia no son magnitudes,

²⁹ En nuestra consideración el orden del sistema básico de las teorías físicas queda exactamente determinado por vía deductiva. De ordinario son posibles distintos sistemas en cada teoría física, de los cuales uno de ellos puede considerarse como *usual*, el considerado como más útil de entre las posibles.

unidades y patrones, sino teoría matemática de las magnitudes físicas, teoría matemática de las leyes físicas, teoría matemática de las teorías físicas y teoría matemática deducida de la dimensión, teorías que exigen como conceptos propios los de magnitud, cantidad, unidad y medida.

7. ¿ESTÁ ACABADO EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)?

A la luz de la historia hasta el presente corresponde un análisis crítico, papel propio de un trabajo académico, acerca del estado actual en la perspectiva del pasado hacia el futuro.

Tras la manifestación de que se ha alcanzado notable éxito, cabe la pregunta: ¿está acabado, cerrado, el SI?

7.1. Características 'positivas' del SI

Como de interés práctico, en tanto que trasfondo filosófico-científico, aunque no transparezca oficialmente, se reconocen dos principios a los que se somete: a) Una *única* Realidad; y b) Una *única* Física. Obviamente este 'interés práctico' no tiene por qué coincidir con la realidad física ni tampoco con el panorama que ofrece la física en la actualidad.

Pueden destacarse positivamente, además, las siguientes notas.

1. Expresión 'de acuerdo', de diálogo, de entendimiento, "por convención".
2. Logro de unificación del sistema SI: "Todo en un sistema para todos".
3. Utilidad.
4. Internacionalidad progresiva.

7.2. Características 'negativas' del SI

1. El modo de toma de decisiones: "por convenio", "por consenso", no por deducción teórica físico-matemática de manera hipotético-deductiva.
2. Así, carece de pretensiones de estricta científicidad. Notable deficiencia teórica. (Julio Palacios y Mario Bunge).
3. Se ha construido al margen del *Análisis Dimensional* que se conocía en cada momento.
4. "La elección de unidades es convencional y en gran parte arbitraria".
5. Elemento primario del SI: unidad, siendo este secundario, derivado. Elemento primicial, primordial fundamental o básico: magnitud

6. Grave error ‘inglés’ por la confusión de los conceptos de magnitud y cantidad (“quantity”). Único término lingüístico para dos conceptos: el de ‘clase’ y el de ‘sus elementos’.
7. La dimensión de las magnitudes no se deduce, como correspondería por la inclusión de las magnitudes en las leyes de las correspondientes teorías, sino que ‘se asigna’.
8. “Establecidas por convenio [las unidades de base], se consideran dimensionalmente independientes entre sí”.

8. INTENTOS CIENTÍFICOS

Ante el panorama descrito mediante las caracterizaciones críticas precedentes hemos dado y estamos dando los siguientes pasos.

1. Construcción de una *Teoría Dimensional* compuesta por cuatro teorías matemáticas: de las magnitudes físicas, de las leyes físicas, de las teorías físicas y de la dimensión. Y su aplicación a las teorías físicas clásicas.
2. El *Análisis Dimensional* ante las grandes revoluciones, relatividad y cuántica, en la física del siglo XX. Aplicación de la *Teoría Dimensional*.
3. La posible cientifización del SI. Contraste de la *Teoría Dimensional* de las magnitudes, leyes, teorías físicas y dimensión con el Sistema Internacional de Unidades.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZNAR GARCÍA, J. V. (2013-14): *La unificación de los pesos y medidas en España durante el siglo XIX. Los proyectos para la reforma y la introducción del Sistema Métrico Decimal*. Tesis doctoral leída en 1997 en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universitat de València, dirigida por Dr. Antonio E. Ten Ros. Tomos I y II. Madrid: CEM.
2. BARENBLATT, G.I. (1987): *Dimensional Analysis*. New York: Gordon and Breach.
3. BRIDGMAN, P.W. (1922): *Dimensional Analysis*. Yale University Press, New York. AMS. (2ª ed. revisada, 1931). [Versión española de F.A. González Redondo (1990), con supervisión de F. González de Posada. Madrid: Grupo de Trabajo de Análisis Dimensional].
4. BUCKINGHAM (1924): “Dimensional Analysis”. *Phil. Mag.* 48, 141-145.
5. BUNGE, M. (1967a): *Scientific Research*. New York: Springer-Verlag [ed. castellana *La investigación científica*. Barcelona: Ariel. 1969. 2ª ed. corregida 1985. [Trad. Miguel A. Sacristán].
6. - (1967b): *Foundations of Physics*. New York: Springer-Verlag.
7. - (1971): “A Mathematical Theory of the Dimensions and Units of Physical Quantities”, en Bunge M. (ed.): *Problems in the Foundations of Physics*. Springer-Verlag, New York.
8. CADARSO MONTALVO, M. (2021): *Un análisis de la evolución de la metrología en España*. [Tesis doctoral (1977)]. Madrid: Centro Español de Metrología.

9. CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA (2012): *Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. (3ª edición). Madrid.
10. - (2019): *El Sistema Internacional de unidades (SI)*. 9ª edición. Madrid.
11. - (2020): *Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida y su modificación por el Real Decreto 493/2020/ de 28 de abril*. Madrid.
12. - (2024): *Resumen de los trabajos preparatorios de la Comisión Internacional para la realización de los prototipos internacionales y la creación de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (1871-1872)*. 3ª edición. Madrid.
13. CÍSCAR Y CÍSCAR, G. (1800): *Memoria Elemental sobre los Nuevos Pesos y Medidas Decimales fundados en la Naturaleza*. Madrid: Imprenta Real.
14. - (1821): *Apuntes sobre medidas, pesos y monedas*. Madrid:
15. ELLIS, B. (1964): "On the Nature of Dimensions". *Philosophy of Science*, 31, 357-380.
16. ESNAULT-PELTERIE, R. (1951): *Analyse dimensionnelle et Métrologie*. Soc. R. des Ing. et des Industriels. París.
17. FERMI, E. (1980): "Metrology and Fundamental Constants". *Proceedings of the International School of Physics*. North Holland Publishing Company, Amsterdam, N.Y. Oxford.
18. GODIN, L. (1736): "La Longueur du Pendule simple, qui bat les Secondes du Temps moyen, observée à Paris & au Petit Goave en l'Isle Saint Domingue" en *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*. Paris: Imprimerie Royale,
19. GONZÁLEZ DE POSADA, F. (1981a): "Hacia una nueva fundamentación del Análisis Dimensional". *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 75, 969-991.
20. - (1984a): "Los conceptos de métrica, longitud y magnitudes espaciales referenciales en Análisis Dimensional. (El espacio geométrico como pre-física)". *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol.78, 3º. 1984. (11 pág.).
21. - (1992c): "Nuevos conceptos básicos en Teoría Dimensional: hipótesis magnitudinales, principios ecuacionales y leyes relacionales" en *Anuario Científico 1991* del Grupo de Trabajo de Análisis Dimensional. Universidad Politécnica de Madrid. I.S.B.N: 84-87596-09-06, 11-13.
22. - (1994a): *Breviario de Teoría Dimensional*. ISBN: 84-605-0968-0. Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid.
23. - (2002): "Fundamentals of Dimensional Theory", con la colaboración de F.A. González Redondo. En *Journal of New Energy (USA)*. Vol. 6, No 4, 45-61.
24. - (2007c): "Las ciencias físico-matemáticas: de Jorge Juan a Gabriel Císcar", en *La Ciencia en la España Ilustrada*, 79-164. ISBN: 978-84-85559-96-1. Instituto de España. Madrid.
25. - (2021a): *Louis Godin (1704-1760): pionero de la ciencia moderna en España*. Tesis doctoral Universidad de Cádiz.
26. - (2021c): *La memoria elemental "Sobre los nuevos pesos y medidas fundados en la naturaleza", de Gabriel Císcar, documento germinal de la metrología española*. Madrid: Centro Español de Metrología.
27. - (2022b): *El 'Sistema Métrico Español' de Gabriel Císcar: los "apuntes sobre medidas, pesos y monedas"* Madrid: Instituto de la Ingeniería de España.
28. - (2024a): "Manifestación de fe en el **metro**: su (supuesto) carácter natural y su (establecida) condición de única unidad fundamental de pesas y medidas" En Conmemoración del 175 aniversario de la "Legislación de Pesas y Medidas del Sistema Métrico DecimaL", CEM.
29. - (2025a): *Teoría Dimensional. Teoría algebraica de las magnitudes físicas. Antecedentes, construcción, extensiones y aplicaciones*. Tesis doctoral presentada en la Universidad de Castilla-La Mancha.

30. - (2025b): *Teoría Dimensional. El Análisis Dimensional ante las grandes revoluciones, relatividad y cuántica, en la física del siglo XX*. Tesis doctoral presentada en la Universidad de Alcalá de Henares.
31. - (2025c): *Louis Godin y Jorge Juan pioneros de la ciencia moderna en España*. Novelda: Editions Locals.
32. GONZÁLEZ REDONDO, F.A. (1993): *El Análisis Dimensional en la obra de Mario Bunge*. Tesis doctoral en Filosofía de la Ciencia dirigida por F. González de Posada. Facultad de Filosofía. Universidad Complutense de Madrid.
33. - (2000): *Historia del Análisis Dimensional*. Tesis doctoral en Matemáticas dirigida por F. González de Posada. Universidad Politécnica de Madrid.
34. IBÁÑEZ E IBÁÑEZ DE IBERO, C. (1871-1872): *Resumen de los trabajos preparatorios de la Comisión Internacional para la realización de los prototipos internacionales y la creación de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas. 1871-1872*. Madrid: CEM.
35. INSTITUTO DE LA INGENIERÍA DE ESPAÑA (2019): *La Metrología también existe*. Madrid: Centro Español de Metrología CEM.
36. - (2020): *Unidades de medida*. CEM.
37. - (2022): *Personajes españoles relevantes en el campo de la metrología*. Madrid: CEM.
38. ISAACSON, E. (1975): *Dimensional Methods in Engineering and Physics*, London: Edward Arnold.
39. KYBURG, H.E. (1997): "Quantities, Magnitudes, and Numbers". *Philosophy of Science*, 64: 411-444.
40. MARTÍN ARRANZ, M (2024): *Nuevo sistema legal de pesas y medidas puesto al alcance de todos*. Reedición de la 13ª edición, publicada originalmente en 1876. CEM.
41. MINISTERIO DE COMERCIO, INSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS (1868): *Ley de pesas y medidas de 19 de julio de 1849, reglamento para su ejecución y disposiciones oficiales de carácter general, referentes al planteamiento del sistema métrico-decimal*. Madrid.
42. MINISTERIO DE INSTRUCCIÓN PÚBLICA Y BELLAS ARTES (1907): *Ley de pesas y medidas de 8 de julio de 1892*. Madrid: Imprenta de la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico.
43. PALACIOS, J. (1956): *Análisis Dimensional*. Madrid: Espasa-Calpe. [Edición en francés: *L'Analyse Dimensionnelle*. París: Gauthier Villars, 1960. Edición en inglés: *Dimensional Analysis*. New York-London: MacMillan, 1964. 2ª edición en español: *Análisis Dimensional*. Madrid: Espasa-Calpe, 1964].
44. PICADO ALFARO, M. (2012): *El Sistema Métrico Decimal en libros de texto de matemáticas durante la segunda mitad del siglo XIX (1849-1892)*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
45. PICADO, M. y RICO, L. (2011): "La introducción en España del sistema métrico decimal: un estudio de los textos de Gabriel Císcar y José Mariano Vallejo", en *Actas do I Congreso Ibero-Americano de Historia de Educação Matemática*, pp. 449-458. Caparica, Portugal.
46. PRIETO, E. (2007): *Breve historia de la Metrología*. Madrid.
<http://www.cem.es/cem/metrologia/historia>.
47. SAN JUAN, R. (1947): *Teoría de las magnitudes físicas y sus fundamentos algebraicos*. Madrid: Bermejo. [Anteriormente en *Rev. R. Acad. Cien. Ex., Fís., Nat.* 39 -1945- y 40 -1946. A partir del capítulo VI titula: *Teoría de las magnitudes escalares derivadas y sus fundamentos algebraicos*].
48. SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (1987): *Unidades físicas*. Eudema Universidad.
49. SENA, L. A. (1979) *Unidades de las magnitudes físicas y sus dimensiones*. Moscú: Editorial Mir.
50. TARRACH, R. (1998): "La Física de las Constantes y la Naturaleza de las Magnitudes físicas". *Revista Española de Física*, vol. 2, nº 4.
51. TEN, A. (1996): *Medir el Metro, La historia de la prolongación del arco de meridiano Dunkerque-Barcelona, base del Sistema Métrico Decimal*. Universitat de València.