



DISPOSITIVOS QUE PROPULSARON LA EVOLUCIÓN DE LA BALANZA

M.T. CARRASCAL-MORILLO¹, C. GARCÍA-GARCÍA², C. BERNAL-GUERRERO³

¹Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Grupo de Investigación en Biomecánica. Departamento Mecánica
C/ Juan del Rosal 12, Madrid (España)

²Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales
C/ Juan del Rosal 12, Madrid (España)

³Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Grupo de Investigación en Resistencia de Materiales. Departamento de Construcción y Fabricación
C/ Juan del Rosal 12, Madrid (España)

(Recibido 15 de septiembre de 2020, para publicación 7 de enero de 2021)

Resumen – Sabemos que el uso de la balanza se remonta al año 2500 a.C. en Egipto, pero fue la civilización romana la que le dio un gran impulso tecnológico convirtiéndola en el instrumento para pesar que ha llegado a nuestros días. A lo largo de los siglos otros inventores como Leonardo da Vinci añadieron elementos que colaboraron en su perfeccionamiento. En el siglo XVIII Gilles de Roberval inventó una nueva forma de balanza aumentando significativamente la precisión del instrumento. Ya en el siglo XIX el fabricante francés Joseph Beranger combinó los inventos de sus predecesores y fabricó un nuevo prototipo con un indicador de aguja que se sigue utilizando hoy en día. Sin embargo, el mayor avance fue el indicador hidrostático que permitió conseguir un indicador más preciso. En la actualidad la incorporación de los sistemas computerizados y las nuevas básculas de bioimpedancia eléctrica han elevado su nivel de precisión. En este artículo vamos a evaluar la huella que dejaron estos elementos mecánicos en la precisión de los aparatos y su impacto en el momento histórico.

Palabras clave – Balanza egipcia, balanza romana, mecanismo de Roberval, balanza analítica.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las primeras actividades ligadas a la evolución cultural del ser humano fue el comercio. El comercio se ha considerado a lo largo de la historia como un progreso en todas las civilizaciones. El Neolítico es el periodo de la historia en el que apareció y se generalizó la agricultura y el pastoreo de animales, dando origen a las sociedades agrarias y a la aparición de los primeros poblados y asentamientos. Historiadores y arqueólogos coinciden en que la economía Neolítica (8500 años a.C.) de pequeños poblados no hubiera podido subsistir sin el esfuerzo cooperativo, ya que la organización social era muy precaria [1]. Según el arqueólogo francés Jean Guilaine «la verdadera ruptura [en la historia], no fue la escritura, como se ha dicho con frecuencia, sino la agricultura». A partir del momento en que se introduce la agricultura, se queman los bosques, se transforma el paisaje y se depende del clima para las cosechas. Es Oriente Próximo, hacia el 8500 a.C., la primera región donde se encuentran pruebas de la transición de unas sociedades de cazadores-recolectores a otras de productores; desde allí se extendió a Europa, Egipto, Oriente Medio y sur de Asia. Así, los prósperos agricultores, establecidos en los oasis y en los valles de los grandes ríos del Oriente Próximo, estarían más inclinados a comerciar sus abundantes cosechas con otras comunidades de pescadores, cazadores o pastores, que las pobres comunidades neolíticas de Europa [2].

Las primeras unidades de peso en las antiguas civilizaciones estarían vinculadas a la teoría del hombre-medida que después desarrollarían los sofistas griegos. Así, la unidad de peso podía ser establecida en base a la fuerza que ejercía un hombre normal, probablemente el jefe del clan, cuando cargaba algún objeto y el patrón de medida el peso que este levantara con las dos manos. De esta manera las manos se asimilarían a los platillos de una balanza [3]. No hay datos de la invención de la balanza ni de qué pueblo la

utilizó por primera vez, pese al interés de los arqueólogos en afirmar que es un útil de invención egipcia, dato conocido por los papiros encontrados en Tebas y datados sobre el año 3200 a.C.

2. BALANZA EGIPCIA

El comercio en Egipto, según las excavaciones realizadas, comenzó en el periodo predinástico (5500 a 3200 a.C.) y se mantuvo hasta el periodo romano (30 a.C. a 640 d.C.). Aproximadamente en el año 3500 a.C. el comercio en Egipto era una de las actividades más relevantes, especialmente en todo lo referente al intercambio de los productos. Ya el Génesis (7:23-28) nos relata cómo José fue vendido por sus hermanos por veinte piezas de plata a “una caravana de ismaelitas que venían de Galaad con sus camellos cargando especias, bálsamo y mirra” para llevarlo a Egipto. El antropólogo W.J. Perry ha llegado a la conclusión de que los antiguos egipcios emprendieron una búsqueda incesante, por todo el mundo conocido, de oro, piedras preciosas, ámbar y otras sustancias supuestamente mágicas para asegurar la fertilidad de sus campos y su propia buena suerte, factor importante en la difusión de la civilización y sociabilidad de las comunidades campesinas.

Las primitivas balanzas egipcias consistían en una barra horizontal que colgaba de una cuerda, en cuyos extremos se sostenían también mediante cuerdas sendos platillos, para colocar en uno, la mercancía y en el otro, una pesa de valor conocido. Se denominan balanza de cruz o balanza de platillos. Con el transcurso de los años los egipcios modificaron su invento y hacia el año 1500 a.C. agregaron una plomada que permitía verificar si el instrumento en sí, se encontraba o no nivelado según los requerimientos. Posteriormente, a la plomada le sumaron una aguja, conocida como fiel, que indicaba el equilibrio entre los dos platos; cuando se pesaba indicaba hacia qué lado se inclinaba el peso. Esto no permitía cuantificar el peso, pero sí comparar dos pesos y si se ponía en uno de los lados un peso predefinido se podía cuantificar el peso del otro plato. Hay que recalcar que la economía egipcia utilizaba el trueque como método habitual de comercio, a través de un intercambio de bienes y servicios, basado en un valor estándar que ambas partes consideraban justo, siendo la actividad económica más importante el intercambio de trigo, ya que las cosechas eran mucho más abundantes que en otros países de su entorno. No fue hasta la invasión persa del año 525 a.C. cuando se instituyó una economía efectiva en el país. Los bienes y servicios se valoraban en una unidad conocida como “*deben*” [4]. Un “*deben*” era “*aproximadamente 90 gramos de cobre*”. *Los artículos muy caros también podrían tener un precio en débitos de plata u oro.* Si un rollo de papiro costaba un “*debe*” y un par de sandalias también, el par de sandalias podría ser intercambiado de manera justa por el rollo de papiro. De la misma manera, si tres jarras de cerveza costaban un “*deben*” y un día de trabajo valía otro “*deben*”, a un obrero se le pagarían tres jarras de cerveza por el trabajo diario. Veamos un caso tomado de J. Yoyotte en el que también se utiliza el “*deben*” como instrumento de cambio: “*Vendido a Hay por el oficial Nebsmen: un buey, es decir, 60 deben; cinco paños de tejido fino, es decir, 15 deben; un vestido de lino del sur, es decir, 20 deben; un cuero, es decir, 15 deben*” [5].

En la Fig. 1, Papiro de Quenna del libro de los muertos [6], se observa una balanza. Es la escena del pesaje del corazón del difunto ante Isis y Neftis; junto a la balanza, observando el resultado del pesaje, se aprecia a Anubis esperando al muerto para su embalsamamiento, un monito en el astil de la balanza y Osiris como juez presidiendo la escena.

3. BALANZA GRIEGA

La colonización de Italia por los griegos no puede explicarse sino por el interés que tenían de penetrar en el área de producción y tráfico de metales de Etruria (770 a. C.). Se asentaron en el sur de la península italiana y en Sicilia donde los colonos griegos fundaron numerosas polis. Desde aquí comerciaban con la metrópolis, permitiendo con ello una estrecha comunicación comercial entre Italia, Grecia y la costa Jónica de Asia Menor. Fue tal el número de colonizadores griegos introducidos en las costas de la Italia Meridional, que los romanos llegaron a llamarla “*Magna Grecia*”; además, asumieron la enorme riqueza cultural y económica de los etruscos, a los que llegaron a denominar “*Sabios Explotadores de Metales*”. Griegos y etruscos convivieron durante más de tres siglos, hasta que Oscos y Samnitas ocuparon la extensa



Fig. 1. Báscula egipcia.

llanura de la Campania (423 a.C.), obligándoles a conseguir refugio en el interior. Ante la expansión de Roma, la cultura etrusca fue barrida y absorbida. Para entonces las colonias griegas de la Campania cohabitaban con las culturas populares de las montañas, que accedieron a la zona atraídos por su riqueza y fertilidad. El acontecimiento más trágico para la cultura griega en occidente fue la “Segunda Guerra Púnica” (218 a 201 a.C.), a través de la cual fueron destruidas muchas ciudades de la “Grecia Tirrena”, periodo en el que apareció la balanza “Romana” [7]. Entre los enormes botines que las victoriosas campañas romanas proporcionaban a los protagonistas de la escena política de la época -Escipiones, Meteleos, Claudios, Emilios, Sempronios, Flavios, etc.-, se encontraban esclavos, obras de arte, joyas, metales preciosos, etc. Siendo en uno de ellos donde se encontró el extraño aparato que, más tarde descubrieron, servía para pesar. Sin duda alguna ese “extraño aparato” era una Romana. Aunque no la Romana que conocemos hoy, sino la llamada “Romana Primitiva”, tras la cual aparecieron y se desarrollaron modelos ulteriores, que hoy llamamos “Romana Común”. La balanza clásica, que los griegos conocieron de los antiguos egipcios, denominada libra o talentum, consta de un travesero horizontal (scapus) dividido en la mitad por un fiel (*iugum*). En los extremos de los brazos cuenta con una pequeña anilla (ansa), de la que enganchan por medio de cadenas los platos (lences). El mecanismo es muy sencillo, teniendo en cuenta la ley de la palanca y la fuerza de la gravedad: el peso de la masa, depositado en un plato, se calcula buscando el equilibrio con otro plato, en el que se coloca la referencia por medio de ponderales. Algunas veces, este esquema simple varía por la sustitución de uno de los platos por un peso fijo, o por la presencia de un contrapeso móvil.

4. BALANZA ROMANA

No existe documentación rigurosa para datar con exactitud el nacimiento de la balanza Romana o state-
ra, formada con un solo brazo asimétrico y un gancho. Se cree que apareció cerca del año 200 a.C. en la región italiana de la Campania, en las costas del mar Tirreno, según documentos sobre el comercio, la industria y la agricultura en la expansión militar de los romanos en el mediterráneo y su área de influencia. La Campania era una región con abundantes riquezas metalíferas y tierras muy fértiles. Fue colonizada por los antiguos griegos y formó parte de la Magna Grecia. Pese a que a esta balanza se le denominó la “Romana” desde su innovación, durante algunos años los romanos la nombraban como “Campania” debido a su lugar de origen. Estos datos se conocen a través de los historiadores romanos: Nepote Cornelius (99 a 24 a.C.) en su obra “Vidas de los varones ilustres”, Cayo Suetonio (70 a 140 d.C.), que fue superintendente de las bibliotecas públicas y archivos imperiales, en su obra “Vitaes Caesarum”, que ha aportado a la historia gran cantidad de datos sobre la vida privada y el gobierno de los emperadores romanos desde Augusto a Domiciano, o Vitruvio Polion (siglo I d.C.). Este último, en el libro décimo de su obra “De

Architectura”, capítulo III, haciendo una descripción de los sistemas de tracción, expone que “todo esto se puede comprobar en las balanzas denominadas «estateras» o «romanas»”. Cuando el asa, que es el centro, está colocada cerca del brazo que sostiene el peso y el cursor se desplace hacia la otra parte del brazo, al moverlo por los puntos marcados, cuanto más se desplace hacia el extremo, equilibrará un peso realmente gravoso con una pesa bastante menor, debido a la nivelación que se alcanza del brazo y al desplazamiento del cursor respecto del centro. El escaso peso del cursor adquiere en un instante una mayor fuerza y propicia que suavemente y sin brusquedad se eleve un peso mayor hacia lo alto”.

La balanza romana “*statera* o *trutina*” fundamentalmente constaba de dos astiles, uno más largo que el otro, el cual estaba graduado con marcas. El astil menor estaba provisto de una serie de ganchos, unos destinados al plato de la balanza y otros a la suspensión de la mercancía. El astil mayor, normalmente de sección circular o prismática, estaba dividido por trazos numerados o graduados a base de pequeñas incisiones que en función del tamaño de la balanza hacen referencia a libras, onzas o medias onzas. Adicionalmente, se encontraba el pilón o *aequipondium*, el cual funcionaba como un contrapeso fijo de la mercancía, que se movía entre las marcas trazadas en forma de regla en el palo largo para calcular el peso del producto cuando se lograba un equilibrio entre ambos. En este sentido, se puede hablar de un sistema que comparaba las masas, es decir, el peso del cuerpo pesado se contrarrestaba con el del *aequipondium*. Habitualmente eran de bronce y algunos están rellenos de plomo para su perfecto funcionamiento. Existían también balanzas de peso fijo que se utilizaban para verificar el peso de un determinado objeto, sobre todo, monedas de oro o plata. Entre las funciones de los ediles en la cultura romana estaba la de verificar y controlar la exactitud de los pesos y medidas utilizados y así poder garantizar, tanto al comprador como al vendedor, una transacción comercial equitativa. Conforme a ello, existía la *Lex Silia*, una ley que establecía una estandarización de las medidas de los productos sólidos y líquidos, y las penas que se debían enfrentar en caso de infringir esta legislación. Asimismo, se establecieron juegos de pesos y medidas oficiales conforme a los estándares promulgados. Por tanto, podríamos decir que la balanza romana no solo se configuró como una medida de peso, que posteriormente sería mejorada hasta nuestros días, sino que originó parte de la legislación mercantil.

En la Fig. 2 vemos una pieza de estos juegos que fue hallada en la fachada portuaria de Tarragona [8]. Se trata de un *aequipondium* realizado en bronce, con la representación del busto de una posible diosa femenina apoyada sobre una base circular y los restos de un gancho junto a una romana completa.



Fig. 2. Romana completa y *aepondium* de una diosa encontrada en Tarragona.

En el curso de los trabajos arqueológicos en la ciudad de Pompella se han encontrado diferentes romanas (Figuras 3, 4 y 5) todas datadas en el siglo I d.C.



Fig. 3. Romana contrapeso de bellota (izq.) y romana contrapeso dios mercurio y platillo (dcha.).



Fig. 4. Romana de platillo y contrapeso cabeza de niña (izq.) y platillo con gancho y cadena corta con cabeza de dios mercurio (dcha.).



Fig. 5. *Statera*. Museo Arqueológico de París.

5. BALANZA DE LEONARDO DA VINCI

En los albores del siglo XV, a partir de Taccola, los ingenieros manifestaron su ambición por convertirse en autores de tratados compuestos de textos e imágenes [9], como se observa en Francesco di Giorgio, en Giovanni Fontana y, sobre todo, en Leonardo da Vinci. Pero una de las innovaciones más importantes del siglo XV fue recurrir cada vez más al dibujo como instrumento de demostración y comunicación, definiéndose las convenciones gráficas necesarias para visualizar máquinas y dispositivos mecánicos complejos [10]. Leonardo da Vinci pensaba que la mecánica era la más noble de las ciencias “puesto que por medio de ella realizan sus acciones todos los cuerpos animados que poseen movimiento”. Previó el principio de inercia, que después Galileo demostró experimentalmente, y vio la imposibilidad experimental del movimiento continuo como fuente de energía, adelantándose en esto a Stevin de Brujas. Leonardo aprovechó el conocimiento de esta imposibilidad para demostrar la ley de la palanca por el método de las velocidades virtuales, un principio que ya enunciaba Aristóteles y que utilizaron más tarde Bernardino Baldi y Galileo.

Leonardo no escribió ningún libro y sus ilegibles notas escritas sobre aspectos científicos no fueron encontradas y publicadas hasta finales del siglo XIX, perdiéndose su obra para la posteridad inmediata. Sin embargo, sus manuscritos fueron copiados en el siglo XVI y sus ideas mecánicas robadas por Jerónimo Cardano; de ahí que puede que pasaran a Stevin y, a través de Bernardino Baldi a Galileo, Roberval y Descartes. En estos manuscritos defendía que si bien las matemáticas, la geometría y la aritmética podían verificar axiomas, ya que manejan conceptos ideales, la verdadera ciencia debía basarse en la observación para, a partir de ella, aplicar el razonamiento matemático y así lograr mayor grado de certeza. Este razonamiento se puede considerar como el fundamento del método científico: “no hay certeza en la ciencia si

no se puede aplicar una de las ciencias matemáticas”. En sus apuntes dejó constancia de la importancia del método científico, adelantándose a autores como Descartes, fundador de la filosofía moderna.

A lo largo de su vida adulta, y sobre todo durante sus años en la corte de los Sforza en Milán, Leonardo era famoso no sólo como artista, hábil dibujante dotado de grandes cualidades pictóricas, sino por encima de todo un pensador reflexivo que deseaba conocer la causa de cuanto existe. Durante este tiempo inventó un gran número de dispositivos asombrosos, lo que le confirió una gran reputación como ingeniero-mago en la corte. Leonardo comenzó sus estudios teóricos de la mecánica con la “ciencia de pesos”, conocida hoy como estática, que se ocupa del análisis de cargas y fuerzas de los sistemas físicos en equilibrio, cuyos principios explican el comportamiento de balanzas y palancas. En el Renacimiento los fundamentos de la ciencia de pesos se recogían en una gran colección de obras compiladas a finales de los siglos XIII y XIV (Jordanus) [11].

Los fundamentos matemáticos de la estática, sobre determinaciones exactas de los centros de gravedad y su demostración de la ley general de la palanca, eran puramente geométricos, lo que encandiló a Leonardo y le llevó a declarar con entusiasmo que “la mecánica es el paraíso de las ciencias matemáticas.”(MsE_0008v). En el Códice Arundel (Fig. 6, [12]), Leonardo expresa la ley de la palanca de la siguiente forma: “Multiplicad el brazo más largo de la balanza por el peso que soporta y dividid el producto por el brazo más corto, y el resultado será el peso y, cuando se coloca en el brazo más corto, resiste el descenso del brazo más largo, los brazos de la balanza estarían en equilibrio desde el principio.” (CAr_0001v). Leonardo utilizó la ley de la palanca para calcular las fuerzas y pesos necesarios para establecer el equilibrio en numerosos sistemas simples y compuestos que implicaban a balanzas, palancas, poleas y pesos colgando de cuerdas.

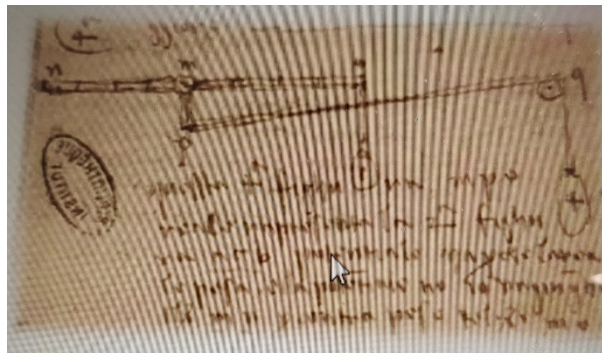


Fig. 6. Codice Arandel. Eje de balanza, polea y peso.

Las relaciones entre peso, fuerza y movimiento fueron el centro de su atención con una larga serie de investigaciones empíricas sobre la “ciencia de los pesos” de la Edad Media [13]. Entre 1490 y 1500 sus estudios se centraron en la balanza y la ley clásica de la palanca de Arquímedes, experimentando con diferentes tipos de suspensiones o soportes de las barras, diferentes cuerdas y pesos, alterando sistemáticamente cada variable con el fin de obtener una comprensión clara de los principios subyacentes. Además, se cuestionaba cualquier posible error de las diferencias que pudieran existir entre una balanza teórica (con un tratamiento matemático) y una balanza física real: “la ciencia de los pesos lleva a engaño en la práctica, ya que en muchos casos la práctica y la ciencia de los pesos no se ponen de acuerdo, ni es posible. Este divorcio entre práctica y ciencia de los pesos se pone en evidencia porque el tratamiento que le daban los antiguos filósofos a los ejes de las balanzas era el de meras líneas geométricas y hay que tener en cuenta el peso de las balanzas, junto con los pesos que se utilizan en ellas, todo lo cual deja constancia de este engaño.” (CA_0257r). Leonardo procedió a enumerar varios errores posibles. Por ejemplo, observó que la línea central de la barra se podía construir por debajo, atravesando o por encima del punto de apoyo (el fulcro) de la balanza. “Sólo el que pasa a través del medio es perfecto”, explicó. “El que pasa por arriba peor; el que pasa por debajo es menos malo” (CA_0257r). Así A.C. Crombie [6] dijo sobre Leonardo, que reconoció que el brazo (efectivo) de una balanza era la línea que, pasando por el fulcro, formaba ángulos rectos con la perpendicular que pasaba por los pesos suspendidos. Estos estudios meticu-

losos de la balanza no sólo permitieron a Leonardo calcular las fuerzas y pesos necesarios para establecer equilibrios en numerosos sistemas compuestos, incluidas balanzas, palancas y poleas, sino que también le hizo darse cuenta de que el peso de un cuerpo es idéntico a la fuerza física que ejerce la masa del planeta sobre los objetos que se hallan dentro de su campo gravitatorio: "la fuerza es siempre igual al peso que lo produce", señaló en el Códice Atlántico (CA_1060r) [14]. Por tanto, la visión de Leonardo fue sorprendente teniendo en cuenta la aceptación, por todos los científicos, de los principios de Aristoteles, "cada cosa tiende por naturaleza a su posición preferida", sobre la gravedad. Esta idea que tenía de la balanza la plasmó en un aparato medidor de la humedad del aire, el higrómetro (Codice Atlántico, Fig. 7) [15]. Este consistía en una balanza en cuyos platos se colocaba, en uno un trozo de cera de abeja (impermeable) y en el otro una bola de algodón (permeable). Si el algodón absorbía humedad, aumentaba su peso y se desequilibraba la balanza.

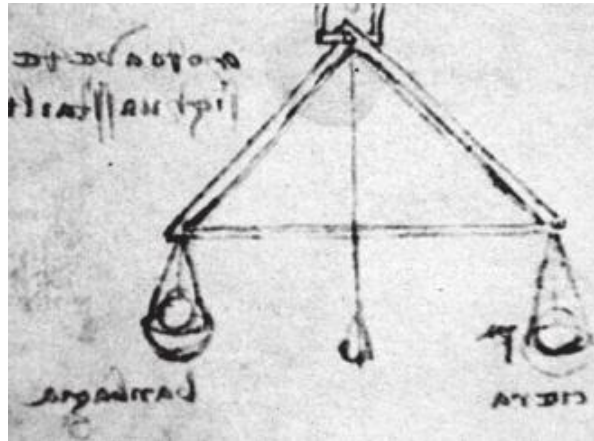


Fig. 7. Higrómetro.

6. BALANZA DE ROBERVAL

La balanza Roberval [16] es un instrumento para pesar que lleva el nombre de su inventor, Gilles Personne de Roberval, matemático y físico francés nacido en Roberval en 1602. Gilles Personne tuvo la idea de colocar los platos por encima del ástil, cuando tradicionalmente estaban suspendidos por debajo, como en la balanza romana. El principio del enigma estático, como la denominaron los científicos coetáneos, fue presentada por el propio Gilles en la Academia Real de las Ciencias de Francia en 1669 (Fig. 8).

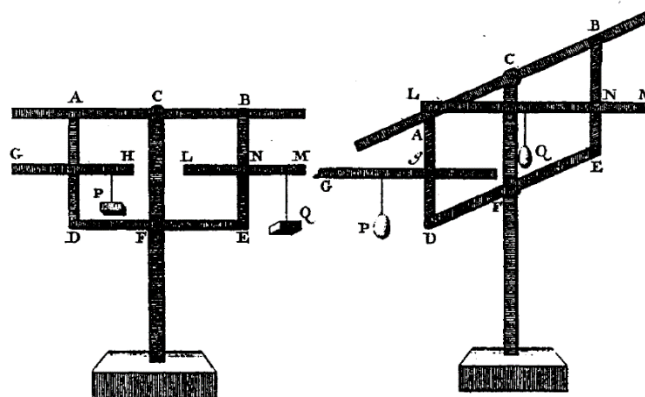


Fig. 8. Balanza de Roberval.

La presentó como una nueva balanza muy diferente a las anteriores y que, en principio, parece anular los principios de la Estática. En esta nueva balanza, ya sean los pesos absolutamente iguales o desiguales, o que los acerquemos o los alejamos del centro de la balanza, una vez en equilibrio, permanecen siempre en equilibrio, pero si no lo están, nunca los podremos equilibrar, y lo que es más sorprendentemente, si los dos pesos se colocan en el mismo lado del centro de la balanza, pueden equilibrarse entre sí.

La balanza está hecha de seis reglas de cobre dispuestas como se ve en la Fig. 8 (izquierda). Las cuatro reglas AB, DE, AID, BNE forman un paralelogramo articulado unidas conjuntamente, pudiendo girar tanto sobre los cuatro clavos que las mantienen unidas, como sobre cuatro pivotes, permaneciendo siempre paralelas AB a DE y AID a BNE. Sobre las dos reglas AID y BNE, se encastran los dos brazos GIH y LNM, que dividen a estas dos reglas en dos partes iguales estando unidas a ellas en ángulo recto, de manera que no cambien de ángulo. Estos dos brazos pueden ser del tamaño que se desee. Todo el conjunto está sostenido por una pieza de madera que sirve de pie, al que está unido por dos clavos o ejes redondos C y F que, pasando por el centro de cada una de las dos reglas AB, DE, las mantiene suspendidas en paralelo y en equilibrio de manera que puedan girar libremente. Sea cual sea la situación en la que se encuentren, los dos clavos C y F son inamóviles y cualquier línea COF trazada desde uno de estos dos clavos al otro, es igualmente inamovible; y así los dos puntos C y F son como los extremos de la balanza, la línea COF es el eje o astil y el punto O el centro.

“Suponiendo esta construcción, yo digo que, si colgamos dos pesos en los dos brazos GH, LM, de la balanza y estos dos en estado de equilibrio uno con respecto al otro, siempre permanecerán en equilibrio, aunque alejemos uno de ellos y acerquemos el otro todo lo queramos del centro de la misma. Porque lo que hace que en las otras balanzas un peso aumente su efecto cuanto más se aleje del centro es que todos los puntos de dichas balanzas no suben y bajan de la misma forma, siendo los puntos más alejados del centro los que suben o bajan más que lo que están más cerca. No es así en esta nueva balanza en la cual el brazo LNM, por ejemplo, se mantiene siempre paralelo a sí mismo y a GIH mientras se mueva la balanza, tal como se aprecia en la Fig. 8 (derecha). De esta forma, como todos los puntos suben o bajan de igual manera, el peso P no realiza esfuerzos diferentes si está suspendido en uno u otro punto; ya que todos los puntos del brazo LNM, por ejemplo, suben o descienden igualmente, es evidente que el peso Q, situado en el punto L, hará el mismo esfuerzo que si estuviera en el punto M y, consecuentemente, si los que estaban en el punto M estaban en equilibrio contra el peso P, los que están al otro lado del centro, en el punto L, harán entonces equilibrio con el mismo peso P. De esto es fácil concluir que dos pesos pueden equilibrarse entre sí, a pesar de que ambos estén en el mismo lado del centro de la balanza, dado que en esta balanza la pesada se realiza comparando masas. Debido a que se equilibran los pesos de ambos cuerpos, los resultados de las mediciones no varían con la gravedad.”

Sin embargo, aunque la explicación en la exposición fue muy clara, no fue bien acogida por los académicos, que percibieron que era una “paradoja” que un sistema de reglas simétrico respecto de un eje y que soporta sobre cada brazo pesos iguales, permanezca en equilibrio independientemente de la distancia de los pesos al eje. Por esta razón, las primeras balanzas de este tipo no fueron construidas en Francia, sino en Inglaterra por la firma W. & T. Avery a partir de 1730 (Fig. 9).

Aclarando un poco más, si cabe, lo expuesto más arriba en relación al funcionamiento de este tipo de balanzas, añadiremos que el objeto a pesar en la balanza se coloca en uno de los platillos, mientras que en el otro se colocan suficientes pesas patrones calibradas para restablecer la varilla a su posición de equilibrio. De esta manera, la masa del objeto a pesar es igual a la masa de las masas calibradas. Gracias al diseño de la balanza de Roberval, las masas no necesitan estar centradas en las placas, dado que en esta balanza la pesada se realiza comparando masas; debido a que se equilibran los pesos de ambos cuerpos, los resultados de las mediciones no varían con la magnitud de la gravedad, a diferencia de las básculas cuyas pesadas dependen de la intensidad del campo gravitatorio y deben calibrarse al cambiar el lugar de utilización.

El objeto a pesar se coloca en un plato y las masas calibradas se suman y se restan del otro plato hasta que se alcanza el nivel. La masa del objeto es igual a la masa de las masas calibradas, independientemente de dónde se coloquen los elementos de las placas. Dado que las vigas verticales son siempre verticales y las plataformas de pesaje siempre horizontales, la energía potencial perdida por un peso a medida que su plataforma desciende una cierta distancia, siempre será la misma, por lo que no importa dónde se coloque el peso. Para una máxima precisión, las balanzas Roberval requieren que su punto de apoyo superior se



Fig. 9. Balanza de 1800.

coloque en la línea entre el pivote izquierdo y derecho para que no se desequilibre y haya transferencia neta de peso al lado izquierdo o derecho de la báscula: un punto de apoyo colocado debajo del punto del pivote tenderá a provocar un cambio neto en la dirección de cualquier columna vertical que se mueva hacia abajo. Asimismo, un fulcro colocado sobre este punto tenderá a nivelar los brazos de la balanza en lugar de responder a pequeños cambios de peso.

7. BALANZA DE BARENGER

El primer rastro oficial de la balanza que lleva el nombre de “Roberval” se fundamenta en la aprobación ministerial del Gobierno de Francia el 5 de diciembre del 1840 a favor de Joseph Beranger para la fabricación de un nuevo modelo de balanza de pendulo [16]. En medio siglo Beranger y sus sucesores realizaron cinco variantes distintas de balanzas para controlar las fuerzas laterales parásitas inducidas en las varillas verticales de la balanza de “Roberval”. Esto lo consiguieron reemplazando las varillas laterales por dos astiles subsidiarios que redujeron las fuerzas horizontales parásitas y la fricción en los pivotes. A esta remodelación de la balanza de “Roberval” se le denominó “Sistema Beranger”. La balanza original denominada balanza pendular fue patentada en 1845 y se muestra en la Fig. 10 (sección de la mitad derecha del mecanismo).

Como se observa en la Fig. 10 la balanza pendular de Beranger utiliza transmisiones independientes con respecto a distintos ejes de rotación y se sitúan en un plano diferente de los del eje de rotación del astil principal. Cada soporte de la cubeta está sujeta por dos puntos (A, doble) al extremo del astil principal y por un punto D al extremo “delantero” de la transmisión ubicado debajo, que puede ser considerada como una palanca de segundo grado, donde la carga se distribuye a través del triangulo entre D y A; para la transmisión, el punto de potencia está en O y el de resistencia en G. La sutileza de Beranger consistió en calcular los diferentes brazos de palanca para que el doble punto A y el punto D tengan el mismo movimiento de traslación vertical. Contrariamente a la balanza de Roberval los tres puntos de asiento del soporte de la cubeta nunca están situados en el mismo plano vertical, lo que hace que la tendencia al desequilibrio se compense por las fuerzas verticales y no por las fuerzas horizontales parásitas. En equilibrio, el astil principal OA y la varilla BC de la balanza son horizontales a la bancada, cuando las cubetas están vacías.

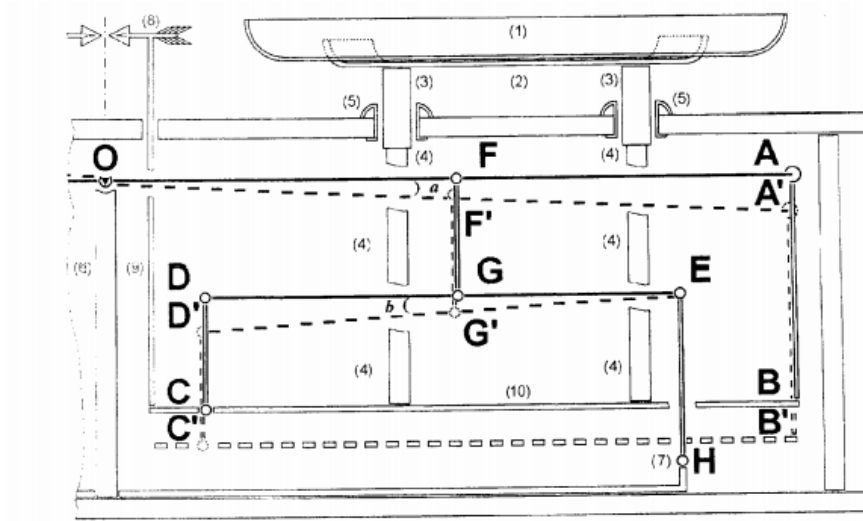


Fig. 10. Sistema Beranger.



Fig. 11. Balanza de Beranger.

Pero veamos cómo se comporta bajo la acción de una carga: el astil OA baja un ángulo a , la transmisión DE baja un ángulo b y los puntos A, B, C, D, F y G se desplazan a los puntos A', B', C', D', F' y G', siendo fijos los puntos O (pivote central), así como E y H (fijos a la bancada). El platillo, solidario con BC, no puede quedar horizontal a no ser que B'C' quede paralelo a BC, deduciéndose, por tanto, que $BB'=CC'$. Como las longitudes AB, unidas por ganchos, y la DC, unidas por bridas, son fijas e iguales respectivamente a A'B' y D'C', se deduce que $DD' = AA'$ y que $FF' = GG'$.

Por homotecia entre OAA' y OFF' se obtiene que $AA'/FF' = OA/OF$ y, por lo mismo, entre los triángulos EDD' y EGG' se obtiene que $DD'/GG' = ED/EG$. Deduciendo que $OA/OF = ED/EG$ o que $(OF + FA)/OF = (EG + GD)/EG$. Esta es la razón por la que se cumple la relación $FA/OF = GD/EG$. Evidentemente, para obtener la horizontalidad inicial se tiene que cumplir que $CD + GF = AB$.

Hay que señalar que tanto la longitud de CD y GF, así como la de AB, no afectan al equilibrio de la balanza, lo que permite con pocas modificaciones poner basamentos de poca altura, reducir el volumen del dispositivo y ganar en estabilidad.

8. BALANZAS DE LABORATORIO

Las balanzas de platillos para trabajos de laboratorio pueden ser de platillos o de un solo plato. Las balanzas de platillos (Fig. 12, izquierda) son balanzas antiguas de dos platos cuya construcción utiliza mate-

riales más exclusivos y con mayor ajuste que las balanzas tradicionales. Se utilizan aleaciones ligeras en la cruz y ágata o corindón en los platillos. Para que la balanza sea más exacta, la cruz dispone de un dispositivo de pesada adicional, el reiter, que al desplazarse sobre la cruz señala valores de peso entre 0,001 g. y 0,01 g.

Las partes móviles de la balanza de precisión se protegen contra el polvo, la suciedad, la corrosión y los golpes accidentales colocando la balanza en una caja de paredes de cristal, accesibles por delante o por los lados para permitir el paso a los platillos. Esta protección ayuda también a conservar la sensibilidad, al eliminar las posibles corrientes de aire y vibraciones. Cuando la balanza no se utiliza, la cruz se eleva respecto de la columna soporte, y con ello se impide su movimiento gracias a un mecanismo de paro, dispositivo del que se cuelga para evitar daños a las cuchillas.

La balanza monoplato (Fig. 12, derecha), en vez de tener un platillo en cada extremo de la cruz, dispone de un contrapeso fijo en un extremo y de un platillo con un conjunto de pesas acopladas al mismo en el otro extremo. Los pesos de cada extremo se equilibran entre sí y cuando se sitúa una sustancia a pesar sobre el platillo, algunas de las pesas incorporadas se levantan y pierden el contacto con la cruz, hasta que se restablece el equilibrio. El peso de la muestra es igual al total de los pesos descolgados y puesto que la carga total de la cruz permanece constante, tampoco cambia su sensibilidad. Las pesas se añaden o anulan mecánicamente girando unos tornillos apropiados dispuestos en el exterior del estuche. El fiel suele estar instalado en el extremo de la cruz próximo al contrapeso y su movimiento se proyecta ópticamente sobre una escala de la parte frontal del estuche. La balanza monoplato se utiliza ampliamente en la industria y en los laboratorios médicos y de investigación de todo el mundo; su empleo se impone cada vez más al de la balanza antigua de dos platos debido a su mayor facilidad y rapidez de funcionamiento ya que su sensibilidad permanece constante.



Fig. 12. Balanza de platillos y monoplato.

9. BALANZAS ELECTRÓNICAS

En en la década de 1980, con la aparición de los microprocesadores, las balanzas evolucionaron hasta convertirse en balanzas electrónicas [18]. Están constituidas externamente por una carcasa, que es la encargada de proteger los componentes electrónicos y el transductor, además de soportar el teclado, la pan-

talla y la plataforma donde se colocan los objetos a pesar. Esta carcasa está firmemente sujeta a una base rígida, generalmente metálica, que es la que provee el apoyo a la celda de carga o al transductor de peso. Las balanzas de precisión tienen una estructura diseñada para evitar que el aire afecte la medición.

Internamente una balanza electrónica tiene las siguientes unidades: unidad de medición, unidad de procesamiento, unidad de interfaz y unidad de almacenamiento.

La unidad de medición consta de una célula de carga que se utiliza según las especificaciones de la balanza y del módulo de adecuación de la señal que genera el transductor. La unidad de procesamiento se encarga de convertir la señal dada por el transductor en el valor de peso correspondiente. La unidad de interfaz con un visualizador y un teclado ofrece al usuario la posibilidad de leer los datos de interés e introducir, modificar datos o configurar el sistema. Algunas tienen también puertos de comunicación para interactuar con un computador. La unidad de almacenamiento, que puede ser opcional, tiene la función de registrar y almacenar todos los datos que se estime conveniente y que, generalmente, se descargan a través de los puertos o se visualizan directamente en la pantalla de la balanza.

10. BÁSCULAS

En 1743 John Wyatt ideó la báscula puente para carros, en la que el platillo de pesas era sostenido por un sistema de palancas y la carga era suspendida con un sistema similar a la romana primitiva. Todas las básculas mecánicas de plataforma y las básculas puente se basan aún en este sistema de palancas compuesto. La báscula de Wyatt utilizaba pesos proporcionales para equilibrar la mercancía, pero no era muy precisa.

Las prestaciones de la báscula puente aumentaron extraordinariamente a principios del siglo XIX al reemplazar los pesos proporcionales por un sistema de romana, con dos o más pesos móviles para conseguir el equilibrio. A finales del siglo se hacían intentos para conseguir un sistema auto indicador; el que más éxito tuvo fue el indicador hidrostático, en el que el contrapeso se hundía en un depósito de agua. A medida que se aplicaba más peso a la báscula, una palanca conectada al contrapeso giraba y la forzaba a salir del agua hasta que la pérdida de flotabilidad aumentaba su peso lo suficiente como para equilibrar la carga. Una cadena conectada a la palanca pasaba alrededor de un tambor que movía una aguja indicadora.

Ya en el siglo XX fue aplicado con éxito el mecanismo de resistencia del péndulo de Barenger a los indicadores industriales de peso, utilizando un piñón-cremallera para conseguir un movimiento de la aguja de 360 grados. Las básculas puente con este tipo de indicador llegan a una precisión de 1:6.000.

En la actualidad se utilizan básculas de resorte que se basan en la relación lineal entre la deformación de un muelle y la fuerza aplicada. La deformación del muelle es transmitida por un piñón-cremallera y es medida por una aguja indicadora que oscila sobre una carátula circular.

11. CONCLUSIONES

En el artículo se relacionan las innovaciones incorporadas a la balanza a lo largo de la historia. Un instrumento de suma importancia por el papel que juega en los intercambios comerciales.

La civilización egipcia con la invención de la balanza acabó con el trueque “a ojo” en el intercambio de productos, fuente de numerosas discusiones. Aunque la balanza no permitía cuantificar el peso de los objetos, sí podía comparar dos pesos. Por tanto, se considera un gran paso en el comercio entre los pueblos. Hay que recordar que la civilización egipcia fue una de las más prósperas en la historia de la humanidad por su capacidad de invención, planificación y estudio, caracterizándose por una evolución que duró siglos.

Los griegos, que durante milenios comerciaron con el antiguo Egipto, conocieron la balanza primitiva y su evolución a lo largo del tiempo utilizándola en todo su territorio. Por ello, cuando los romanos conquistaron la zona de la Campania, se encontraron con un aparato de pesada que durante años denominaron “Campania”, evolución de la balanza egipcia.

Los romanos durante la etapa imperial también la transformaron como se conoce a través de historiadores como Nepote Cornelius o Cayo Suetonio hasta fabricar la balanza romana o statera que ha llegado hasta nuestros días.

Ya en el siglo XV Leonardo da Vinci rompió con los teólogos escolásticos de la Edad Media al basar la ciencia en observaciones. Además, aprovechó la imposibilidad experimental del movimiento continuo para demostrar la ley de la palanca analizando las cargas y las fuerzas en los sistemas físicos; estos principios explican analíticamente el comportamiento de balanzas y palancas, dando así un paso gigantesco en los fundamentos matemáticos de la estática.

El siguiente gran paso lo dio Gilles de Roverbal con el diseño de la balanza que lleva su nombre; colocó los platos por encima del astil, “desafiando” los principios de la estática. En ella la pesada se realiza comparando masas y, por tanto, no depende de la intensidad del campo gravitatorio, por lo que no es necesario calibrar el aparato al cambiar el lugar de ubicación.

La balanza de Beranguer fue una evolución de la balanza de Roverbal. El nuevo dispositivo controla las fuerzas laterales parásitas inducidas en las varillas verticales no afectando al equilibrio de la misma. Esto permite poner basamentos de poca altura, reducir el volumen del dispositivo y ganar estabilidad, además de servir para pesadas mayores.

Las balanzas de precisión se diferencian de las balanzas antiguas de dos platos, en los materiales exclusivos utilizados en su construcción. La balanza electrónica utiliza transductores de peso.

De gran importancia, merece destacar sobre las demás, la nueva balanza de Roberval que revolucionó el sistema de pesada. No obstante, tuvo muchos detractores entre los científicos del siglo XVII quienes lo referían como el invento del enigma estático del Sr Roberval.

REFERENCIAS

- [1] Moreno García, J.C., “Les mnhw: societe et transformations agraires en Egypte entre la fin du II et la debut du I millenaire”, *Revue d’Egiptologie* **62**, 105-114 (2011)
- [2] Childen, G., *Origen de las civilizaciones*, Fondo de cultura española, Madrid (1996)
- [3] Samaranch Kiirner, F., “Protogoras y el enunciado del hombre medida”, *Editorial Dialnet*, La Rioja (1995)
- [4] Presedo, F. *et al.*, “*Historia Universal. Egipto y los grandes imperios*, Ediciones Generales de Castilla (1997)
- [5] Cuervo Álvarez, B., “La sociedad en el Egipto de los faraones”, *Historia Digital* (2017)
- [6] Lepsius, R., *Libros de los muertos*, Editorial digital: Moro (2014)
- [7] Rodríguez González, X., “Balanza Romana”, *Museo Arqueoloxico Provincial de Ourense*, Ourense (2010)
- [8] Rodríguez Martorell, F. *et al.*, “An excepcional weighing aequidondium and the public scales of the harbour of Tarraco”, *Archivo español de arqueología*, 163-180, Tarragona (2016)
- [9] Schuter, N., *Los ingeneros del renacimiento. Un análisis del libro de Bertrand Gille*, Scribed, Attribution Non-Commercial (BY-NC)
- [10] Contreras López, M.A., “Leonardo da Vinci. Ingeniero”, Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, Málaga (2015)
- [11] Crombie, A.C., *Historia de la ciencia de S. Agustín a Galileo, Vol 2*, Alianza Universidad, Madrid (1987)
- [12] BNE, “El imaginario de Leonardo. Codices de Madrid”, *Biblioteca Nacional de España*, Madrid
- [13] BNE, “La cosmovision de Leonardo. Codices de Madrid”, *Biblioteca Nacional de España*, Madrid
- [14] BNE, *Los codices medievales. Leonardo da Vinci*, Biblioteca Nacional de España
- [15] García Tapia, N., “Los codices de Leonardo en España”, *Editorial Dialnet*, La Rioja (1919)
- [16] Le systeme métrique. “*Bulletin de la Societe metrique de France*, No1 (2002)
- [17] Graham, J.T., *Scales and Balances: A guide to collecting*, Bloomsbury Publishing PLC, London (1981)
- [18] Palacios, J.A.A., “Prototipo de balanza electrónica con comunicación al PC, aplicada a la realización de gráficos de control”, *Fundación Dialnet, Universidad de la Rioja*, Logroño (2004)

DEVICES THAT DROVE THE EVOLUTION OF THE SCALE

Abstract – We know that the use of the balance dates back to 2500 B.C. in Egypt, but it was the Roman civilization that gave it a great technological boost turning it into the weighing instrument that has survived to the present day. Over the centuries, other inventors such as Leonardo da Vinci added elements that contributed to its perfection. In the 18th century Gilles de Roberval invented a new form of balance that significantly increased the accuracy of the instrument. In the 19th century, the French manufacturer Joseph Beranger combined the inventions of his predecessors and produced a new prototype with a pointer indicator which is still in use today. However, the major breakthrough was the hydrostatic indicator, which made it possible to achieve a more precise measurement. Nowadays, the incorporation of computerised systems and the new electrical bioimpedance scales have increased its level of accuracy. In this article we are going to evaluate the mark left by these mechanical elements on the precision of the devices and their impact at each historical moment.

Keywords – Egyptian Balance, Roman Balance, Analytical Balance, Roberval's Mechanism.