

Evolución histórica del concepto fuerza. Parte II



J.M. Rivera-Juárez, Y. Rivera-Vargas, E. Cabrera-Muruato

¹Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas, Calzada Solidaridad esq. Paseo a la Bufa s/n, CP 98060, Zacatecas, México.

²Centro de Aprendizaje y Servicios Estudiantiles, Universidad Autónoma de Zacatecas.

³Unidad Académica Preparatoria, Universidad Autónoma de Zacatecas.

E-mail: jmrivera@fisica.uaz.edu.mx

(Recibido el 27 de febrero de 2018, aceptado el 30 de mayo de 2018)

Resumen

En un trabajo anterior, se analizó la evolución del concepto fuerza desde Aristóteles hasta Galileo [1], se estudió su desarrollo desde su concepción tradicional entendida cómo un espíritu que anima a los cuerpos, hasta la interpretación esencialmente relacional. En el presente trabajo se parte de la conceptualización realizada por Descartes, pasando por algunos cartesianos hasta culminar con Newton, se transita de la idea de fuerza como una presentación análoga a la fuerza magnética (eliminación de toda causa interna al móvil), a la noción de una fuerza de acción a distancia (fuerza a distancia).

Palabras clave: Historia de la Ciencia, Fuerza, Física.

Abstract

In an earlier work, the evolution of the concept of force from Aristotle to Galileo I was analyzed, its development was studied from its traditional conception understood as a spirit that animates the bodies, to the essentially relational interpretation. In the present work, we start from the conceptualization carried out by Descartes, going through some Cartesians to culminate with Newton, moving from the idea of force as a presentation similar to magnetic force (eliminating all causes internal to the body), to the notion of a force of action at a distance.

Keywords: History of Science, Force, Physics.

PACS: 01.65.+g, 01.40.-d

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XVI hasta mediados del XVII se produjo lo que los historiadores han denominado “La Revolución Científica”, caracterizada por la ruptura y superación de la tradición científica heredada del mundo clásico y medieval, se pasó de una fe ciega en la aceptación de las cosas a un sistemático cuestionamiento de las mismas. El punto cumbre de dicha revolución (que afectó a prácticamente todos los ámbitos de la ciencia) fue la publicación, en 1687 de los “Principia Mathematica”, obra cumbre de Isaac Newton. El conocimiento de los griegos (mejorado en muchos aspectos por los árabes) se difundió y fue estudiado por toda Europa. Así surgieron por primera vez en más de mil años, avances científicos que superaron cualitativamente los conocimientos de los griegos, mucho tuvieron que ver los logros espectaculares en matemáticas: expansión del sistema indico-arábigo de numeración y el desarrollo del sistema decimal, el desarrollo del álgebra y la invención (fundamentalmente por Descartes) de la geometría analítica. La ciencia que más cambios sufrió con la revolución científica fue la Astronomía. Todo el edificio astronómico y cosmológico griego se vino abajo cuando el astrónomo polaco Nicolás Copérnico afirmó que, para

explicar cómo funcionaba el sistema planetario, era mejor una Tierra en movimiento alrededor del Sol que una inmóvil en el centro del universo.

Así mismo la forma de hacer ciencia empezó también a cambiar. Frente a los puros razonamientos teóricos (a la sombra del respeto a la autoridad científica de los maestros clásicos, o los escolásticos medievales), se empezó a valorar la función esencial que en ciencia tiene la experimentación y la necesidad de que los desarrollos teóricos fueran avalados por datos experimentales.

Con los aportes de las matemáticas se fue allanando el camino para la creciente importancia de lo cuantitativo, frente al tradicional predominio de lo cualitativo, un buen ejemplo son los estudios de Galileo sobre la caída de los graves.

En plena Revolución Científica se desarrollaron los instrumentos esenciales para la experimentación, como el microscopio y el telescopio, que superaron en mucho a todo lo que los griegos habían inventado. Justamente en éste período de movimiento científico florecieron las figuras de: Copérnico, Gilbert, Kepler, Galileo, Descartes, Sylvain, Melebranche, Borelli, Huygens, Hobbes y Newton. En buena medida se debe a Newton la culminación de todo el proceso revolucionario que había iniciado Copérnico un siglo antes de que Newton naciera.

La historia muestra que el progreso de los conceptos de la Física no es el resultado de la genialidad aislada que cambió el curso de la ciencia. En el caso del concepto fuerza (entre otros) es un claro ejemplo de que la evolución de las ideas y la aparición de nuevas teorías, es resultado del esfuerzo colectivo y no de la genialidad aislada.

Los conceptos y teorías científicas no emergieron milagrosamente sino que son el resultado de un proceso muy difícil de resolución de problemas y de contrastación rigurosa de hipótesis [2].

En éste trabajo continuaremos nuestro recorrido a grandes pasos por la historia del pensamiento, para continuar mostrando algunos modos de caracterización de la fuerza, poniendo de manifiesto en la medida de las limitaciones las dificultades de comprensión semántica de la palabra (fuerza), que es fundamental para entender las interacciones en el universo.

II. RENÉ DESCARTES

Descartes aparece como uno de los fundadores de la mecánica. Ciencia particular que caracterizará metodológicamente el conjunto de conocimientos científicos en los siguientes dos siglos. Promueve la abolición de todo prodigio por medio del entendimiento, y mantiene la convicción de que la naturaleza no tiene misterios inexplicables, sino que es completamente transparente a la razón.

Descartes decidió borrar el pasado de su mente. Mediante un proceso de cuestionamiento sistemático, sometió las ideas a un riguroso examen, rechazó aquellas ideas que mostraban el menor indicio de duda. Fue el pensamiento escolástico el objeto fundamental de sus críticas. También Galileo fue víctima de las críticas de Descartes. Hay bastantes puntos de discrepancia entre ambos. Descartes reprocha a Galileo, el haber realizado una física matemática contraria al sentido común y a la experiencia cotidiana, sin apoyarla en una metafísica. En su opinión la física debe estar dirigida, más a dar explicaciones que justifiquen lo real (para lo que ha de buscar y formular los “Principios” a partir de los cuales puedan darse explicaciones racionales) que a comprobar exactamente lo que percibimos.

“Encuentro que, en general, filosofa mucho mejor que el vulgo, por cuanto omite lo más que puede los errores de la escuela, y trata de examinar las materias físicas mediante razonamiento matemático. En esto coincido enteramente con él, y sostengo que no existe otro medio para llegar a la verdad. Pero me parece que falla mucho por cuanto hace de continuo disgregaciones y no se detiene a explicar cabalmente una materia; lo que demuestra que nos las ha examinado por orden, y que, sin haber considerado las primeras causas de la naturaleza, solo ha buscado las razones de algunos efectos particulares, y, de este modo ha obrado sin fundamentos” [3].

En opinión de Koyre, con Descartes e Isaac Beeckman el progreso incuestionable de la ciencia se puede resumirse en:

a) La afirmación neta de la ley de la conservación del movimiento, que de este modo es liberado de la concepción del ímpetu.

b) La eliminación de toda causa interna al móvil. Por primera ocasión en la historia de la física un efecto variable podrá ser explicado por la acción sucesiva, o prolongada de una fuerza constante [4]:

Supresión del concepto de fuerza.

Max Jammer plantea que:

“Con el reconocimiento de la ley de inercia – ya formulada hacia 1585 por Benedetti como parte de su teoría del ímpetu, y presupuesta por Galileo en su análisis del movimiento acelerado – y con la aceptación del principio de conservación del movimiento enunciado por Isaac Beeckman y por René Descartes, se presentan dos posibles alternativas:

O concebir la fuerza como causa de la variación del movimiento.

O bien abolir totalmente la noción de fuerza. En todo caso, la velocidad en cuanto tal no podría ya ser considerada como una indicación de la existencia de una fuerza o como indicación de la medida de esta última ... Descartes sigue la segunda alternativa: rechaza la existencia misma de la fuerza” [5].

El concepto fuerza debe ser eliminado de la física de Descartes. No tiene lugar en ella, ya que ésta se sirve únicamente de concepciones matemáticas. Al respecto Descartes plantea lo siguiente:

“No quiero admitir por verdadero nada que no sea tan evidentemente deducido de aquellas nociones comunes, de cuya verdad no se puede dudar, que puede ser objeto de una demostración matemática. Y puesto que de este modo se puede dar razón de todos los fenómenos de la Naturaleza, como se verá en lo que sigue, no considero que deban ser admitidos otros principios en física, ni que haya motivos para desear otros que los explicados” [6].

En este contexto surgieron las siguientes preguntas: si se suprime la noción de fuerza. ¿Cómo se explica la gravedad? Es decir, ¿cómo se explica la caída de los graves? ¿Y cómo el movimiento de los planetas?

“Sobre la base del principio de inercia, Descartes pensaba que era posible eliminar la fuerza en cuanto concepto físico separado. Sostenía que todos los fenómenos físicos debían ser deducidos de dos únicas asunciones fundamentales de tipo cinemático: la ley de la conservación de la cantidad de movimiento y su teoría de los vórtices etéreos rotantes” [7].

Descartes, refutando la acción a distancia, construyó la teoría de los vórtices para explicar la caída de los cuerpos y el movimiento de los planetas. Cómo se ha señalado, en virtud del principio de inercia y su corolario de la ley de conservación de la cantidad de movimiento, unido a la geometrización de la física, el concepto de fuerza no encontró cabida en la física de Descartes. Queda claro sin embargo que se introduce (tras bambalinas) algún tipo de concepto de fuerza (cómo lo constata el siguiente párrafo), aparte del principio de inercia.

“La fuerza con que un cuerpo obra sobre otro, o resiste su acción, consiste solamente en que cada caso tiende en cuanto está en su parte, a permanecer en el mismo estado en

que se encontraba, conforme a la primera ley que anteriormente ha sido explicada (Ley de Inercia). De aquí que un cuerpo que está unido a otro, tiene cierta fuerza para impedir que el otro sea separado, y cuando está separado, la tiene para impedir que se le una; y también que cuando está en reposo, tiene fuerza para permanecer en su quietud, y por consiguiente para resistir a todo lo que pueda cambiarla, lo mismo que cuando se mueva, tiene fuerza para continuar moviéndose con la misma velocidad, y hacia el mismo sitio” [8].

El tratamiento cartesiano del choque se enredó sin ninguna posibilidad en su idea de la fuerza perseverancia de un cuerpo en su estado. Por otra parte su mecánica no contiene ninguna otra concepción clara de la fuerza. Westfall, considera que:

“La incapacidad de los filósofos mecanicistas para considerar cualquier concepción de la fuerza, excepto ‘la fuerza de un cuerpo que se mueva’, fue un obstáculo para el desarrollo de la dinámica matemática, y tendió a limitar la mecánica a los problemas cinemáticos, en los que el movimiento era descrito sin referencia alguna a las fuerzas que los producen” [9].

Ni en el caso más simple de la dinámica (la aceleración uniforme producida por una fuerza uniforme), pudo Descartes obtener resultados físicos que resolvieran la controversia entre la conclusión de Galileo, para quien la caída libre era un movimiento uniformemente acelerado, con su propia conclusión de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración. A pesar de conocer la naturaleza de la gravedad, Descartes no pudo explicar cómo caen los cuerpos.

III. CARTESIANOS

En este apartado abordaremos la forma en que los seguidores de Descartes recogieron y trataron el concepto de fuerza. Son muchos los científicos que se pueden agrupar bajo el título de “cartesianos”, por lo que será necesario prescindir de algunos de ellos, así como de muchos detalles relacionados con los que consideraremos en nuestro análisis.

A. Pierre Sylvain Régis

En física Régis adopta todos los principios del mecanicismo cartesiano, añade la existencia de una fuerza moviente, productora del movimiento cuando ella es interna, y del reposo cuando es externa [10].

B. Nicolas De Melebranche

Para Melebranche.

“La cesación de la fuerza del movimiento origina el reposo. El reposo no necesita pues fuerza que lo cause. No es más que una pura privación que no supone en Dios voluntad positiva. Puesto que esto sería admitir en Dios una voluntad positiva sin necesidad, y dar a los cuerpos alguna fuerza para permanecer en reposo” [11].

Como se puede apreciar Melebranche entiende el movimiento de una manera distinta a la de Descartes. Así,

para Melebranche, el reposo no es más que una privación que no supone en Dios voluntad positiva. El reposo no ofrece ninguna fuerza para resistir al movimiento. En cambio el movimiento exige la eficacia de una voluntad positiva por parte del creador. “La fuerza motriz de un cuerpo no es entonces más que la eficacia de la voluntad de Dios que lo conserva sucesivamente en diferentes lugares. Supuesto esto, concibamos que esta bola sea movida, y que en la línea de su movimiento, encuentra a otra bola en reposo: la experiencia nos enseña que esta otra será indefectiblemente movida, y según ciertas proporciones siempre exactamente observadas. Ahora bien, no es la primera la que mueve a la segunda. Esto es claro por el principio; pues un cuerpo no puede mover a otro sin comunicarle fuerza motriz. Ahora bien, la fuerza motriz de un cuerpo movido, no es sino la voluntad del Creador que lo conserva sucesivamente en diferentes lugares; no es una cualidad que pertenezca a este cuerpo, nada le pertenece más que sus modalidades, y las modalidades son inseparables de las sustancias: Luego los cuerpos no pueden moverse los unos a los otros, y su encuentro o choque, es solamente una causa ocasional de la distribución de su movimiento” [12].

Como se ve, reconocer la acción de causas naturales aisladas e independientes, equivale para Melebranche limitar y negar el poder infinito de Dios.

C. Giovanni Alfonso Borelli

Durante la primera mitad del siglo XVII muchos astrónomos aceptaban la hipótesis de Kepler acerca de la fuerza rotacional de naturaleza magnética. A la mitad del siglo se aceptaba en general la existencia de alguna fuerza de tipo central directa del sol a los planetas, sin embargo surgió la pregunta: ¿Por qué no caen los planetas sobre el sol? Borelli planteaba la siguiente solución: concibió la órbita planetaria como una posición de equilibrio entre fuerzas opuestas. Al respecto consideraba ligamentos materiales que conectaban al planeta con su curso central, corrientes etéreas que transportaban al planeta en torno al sol, y de una tendencia natural de los planetas de acercarse a éste. Los ligamentos materiales que conectaban al planeta con el sol los describía como fuerzas magnéticas de intensidad constante. Al no disponer de las matemáticas necesarias, no pudo demostrar que la órbita planetaria que le resultaba tuviera forma de elipse. En general sus contribuciones fueron cualitativas.

A pesar de ello, su trabajo sobre los satélites de Júpiter contribuyó decisivamente al abandono de la fuerza magnética rotacional como causa del movimiento de los planetas, y sentó las bases para la futura teoría gravitacional.

D. Chistiann Huygens

Huygens fue educado como cartesiano, pero no fue un discípulo sumiso. De joven demostró que las reglas del choque de Descartes eran incorrectas, y lo realizó utilizando los propios principios de Descartes. De acuerdo con Mach:

“En todo sentido debe considerarse a Huygens como un sucesor de Galileo de igual calidad que este. Quizá fuera menos dotado filosóficamente que Galileo, pero en cambio lo

supero en talento geométrico. No sólo Huygens prosiguió las investigaciones comenzadas por Galileo, sino que resolvió los primeros problemas de la dinámica de sistemas de masas, mientras Galileo se había limitado simplemente a la dinámica de un solo cuerpo” [13].

Cómo se puede apreciar Galileo influyó significativamente en Huygens, entre otras cosas le aportó la descripción matemática precisa del movimiento.

Sin duda la aportación más importante de Huygens son las leyes de la fuerza centrífuga. Logró una expresión cuantitativa del esfuerzo de un cuerpo para alejarse del centro (de hecho la primera expresión cuantitativa). Acuñó para tal esfuerzo el nombre de “fuerza centrífuga”, literalmente, “fuerza que huye del centro” (la palabra fuerza resultaba de interés, dado que en la solución que dio al problema del choque excluyó consideraciones dinámicas). En este contexto la palabra “fuerza” la considera similar al peso estático, y el uso del término “fuerza” sólo era aceptada en la estática. Considera la fuerza centrífuga tal como considera el peso, no como una fuerza que actúa sobre un cuerpo, sino como una tendencia que el cuerpo tiene, por la razón que sea, en una situación concreta.

Con respecto a la gravedad y el movimiento de los planetas, Jammer plantea lo siguiente:

“Huygens había comprendido, estudiando las propiedades de la fuerza centrífuga, la posibilidad de que esta fuerza contrapesase la fuerza gravitacional ejercida por el sol sobre los planetas, para mantener así estos últimos en su órbita.

En lo concerniente a la naturaleza de la fuerza centrífuga y de la gravitación, Huygens escribe bien poco antes de 1690. En el “Horologium Oscillatum”, adopta la típica posición Galileana de demostrar las conclusiones matemáticas sin discutir cuestiones más generales o metafísicas” [14].

Todo su trabajo sobre la gravedad fue publicado en 1690 (cinco años antes de su muerte), cuando ya Newton había afrontado el problema desde un punto de vista más general, obteniendo mejores resultados.

Huygens era uno más de los numerosos científicos que no podían admitir la concepción de la fuerza en términos de acción a distancia. Para él, como para todos los otros, una concepción semejante significaba la rendición del pensamiento científico frente a las cualidades ocultas. Por ello pensó hasta el final de su vida que era posible explicar la gravedad recurriendo a una fuerza de superficie que excluyera toda acción a distancia. La obra de Huygens es esencial. Es el precursor directo de Newton y, en varios aspectos el maestro de Leibniz en mecánica.

E. Thomas Hobbes

Para Hobbes el movimiento es la única causa universal; no puede por ello, pensarse que hay otra causa distinta a él.

“Cualquier cosa que esté en reposo permanecerá siempre en reposo al menos que exista algún otro junto a él que a través del esfuerzo por ponerse en su lugar mediante el movimiento no le permita ya permanecer en reposo” [15].

El cuerpo permanecerá inmóvil si falta una razón suficiente para moverse en un sentido o en otro. *“No puede*

haber causa del movimiento más que en un cuerpo contiguo y movido” [16]. De lo que se desprende que Hobbes rechaza las causas ocultas, como la atracción magnética. La gravedad la entiende como una tendencia de los cuerpos pesados a moverse hacia el centro de la tierra, tendencia que se atribuye no a un “apetito” de los cuerpos, sino a una fuerza determinada que ejerce la propia tierra [17].

IV. ISAAC NEWTON

“No es propio de los mortales acercarse tanto a los dioses” [18]. Así termina el elogio de Edmund Halley en el prefacio de los *Principios Matemático de la Filosofía Natural*.

Newton recoge y prosigue los trabajos de muchos grandes científicos: Galileo, Kepler, Cavalieri, Fermat, Pascal, Wallis, Barrow, Huygens, por mencionar sólo algunos. Puede decirse que en Newton se sintetizan dos grandes corrientes del pensamiento científico.

La corriente físico-matemática, caracterizada por la línea platónica de la estructura y de la determinación matemática del ser de las cosas. Galileo y Descartes fueron sus últimos exponentes.

La otra corriente menos matemática, deductiva y más empírica y experimental, pretende no tanto hacer grandes generalizaciones, como descubrir nuevos hechos y construir teorías. Tiene como sus mejores representantes a Gassendi, Boyle y Hooke.

Una característica fundamental del trabajo de Newton es su oposición a Descartes.

“El pensamiento de Newton está formulado y desarrollado así “ab ovo” (desde siempre), por oposición de este a Descartes” [19].

A pesar de ello no puede negarse la influencia de Descartes en Newton. Koyre está convencido [20] de que todas las leyes del movimiento de Newton, incluida la tercera (la que se refiere a la igualdad entre la acción y la reacción), las obtuvo de la concepción cartesiana de la transmisión del movimiento de un cuerpo a otro, de modo que un cuerpo no puede dar o comunicar movimiento más que partiéndolo de él. Entre otras, una de las críticas de Newton hacia Descartes tiene que ver con la conservación del movimiento tal y como Descartes lo planteó: denuncia el error cartesiano de contar aritméticamente las cantidades de movimiento, es decir, considera las velocidades como escalares [21].

El anti cartesianismo de Newton no es solamente científico, sino también religioso.

El cartesianismo al desterrar de la filosofía natural todas las consideraciones teológicas, reduce todo a una ciega necesidad, que no puede explicar la variedad del Universo y el desarrollo de su estructura. Según Newton, incurren en el materialismo los cartesianos al eliminar de la naturaleza todas las fuerzas no materiales, no percibiendo que existen principios activos no estrictamente materiales, como por ejemplo la fuerza de la gravedad. Estos principios activos parecen provenir de agentes divinos.

“No se sigue de los fenómenos que hay que ser incorpóreo, viviente, inteligente, omnipresente que ve infinitamente las cosas mismas en el espacio infinito, Como

ejemplo la fuerza de la gravedad. Estos principios activos parecen provenir de agentes divinos.

“No se sigue de los fenómenos que hay que ser incorpóreo, viviente, inteligente, omnipresente que ve infinitamente las cosas mismas en el espacio infinito, Como si fuera en su sensorio, percibiéndolas plenamente y comprendiéndolas totalmente por su presencia inmediata ante él” [21].

Retomando el desarrollo de nuestro tema. Newton es quien, logra matematizar la fuerza. Consigue unir las piezas que Kepler, Galileo, Descartes, Huygens, y otros más habían aportado. Las fuerzas, lo que ellas sean, su comportamiento y su matematización, ocupan un lugar fundamental en el extraordinario esquema teórico– científico que Newton desarrolló, situación por demás manifiesta en la siguiente cita.

“Como los antiguos (según cuenta Pappus) consideraban de la mayor importancia la mecánica para la investigación de las cosas naturales y como los modernos –rechazaban formas sustanciales y cualidades ocultas– han intentado reducir los fenómenos de la naturaleza a las leyes matemáticas, he querido en este trabajo cultivar la matemática en tanto en cuanto se relaciona con la filosofía pues toda la dificultad de la filosofía parece consistir en pasar de los fenómenos de movimiento a la investigación de las fuerzas de la naturaleza, y luego demostrar los otros fenómenos a partir de esas fuerzas; a ello se enderezan las proposiciones generales de los dos primeros libros. En el tercero proporcionó un ejemplo de esto en la explicación del Sistema del Mundo; pues mediante las proposiciones matemáticas demostradas en los libros precedentes, deduzco en el tercero de los fenómenos celestes las fuerzas de gravedad con las cuales los cuerpos tienden hacia el Sol y los distintos planetas. Luego, a pesar de estas fuerzas, mediante proposiciones igualmente matemáticas, deduzco los movimientos de los planetas, los cometas, la luna y el mar” [22].

Es importante enfatizar que son las fuerzas las que constituyen para Newton el elemento fundamental en la explicación de los fenómenos del movimiento y del sistema del mundo. Newton define tres fuerzas: *“La vis insita o inertiae”*; *“la vis impressa”* y *“la vis centripeta”*.

A. Vis insita o inertiae

“La fuerza insita de la materia es un poder de resistencia de todos los cuerpos, en cuya virtud perseveran cuanto está en ellos para mantenerse en su estado natural, ya sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta” [22].

Según la opinión de Newton, la inercia es algún tipo de fuerza interna (*insita*) a la materia, la cual permanece latente mientras otra fuerza impresa al cuerpo no tienda a modificar su condición. A su vez la considera como resistencia e impulso. En la definición anterior la fuerza no es concebida como la causa del movimiento o de la aceleración, le da la connotación de algo parecido a la masa.

Jammes, al respecto comenta lo siguiente:

“¿Cómo es posible para Newton llamar ‘fuerza’ a la cualidad de la inercia? La respuesta a esta pregunta se hace evidente si consideramos la Definición III como una concesión a la mecánica pre–Galileana. Como ya se ha visto, la mecánica peripatética concebía la fuerza (dynamis) como si tuviese una doble naturaleza, en parte activa, en la medida que influenciaba otros objetos, y en parte pasiva, en cuanto susceptible de modificación del exterior” [23].

En este orden de ideas, para Newton la fuerza de la inercia es proporcional a la cantidad de materia del cuerpo en cuestión.

B. Vis impressa

La fuerza impresa es una acción de carácter temporal, no permanece en el cuerpo una vez concluida la acción y puede ser producida por: una presión, un choque, una fuerza centrípeta. La fuerza impresa es la responsable de la variación de cualquier movimiento.

Newton define esta fuerza de la siguiente manera:

“Es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, bien sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta” [22].

C. Vis centripeta

“La fuerza centripeta, (definición V), es aquella por la cual los cuerpos son arrastrados o impelidos, o tienden de cualquier modo hacia un punto como hacia un centro”. “De este tipo es la gravedad, por cuya medición los cuerpos tienden hacia el centro de la Tierra, como también la fuerza magnética que trae el hierro al imán, y era fuerza –sea la que fuese– en cuya virtud los planetas son continuamente apartados de los movimientos rectilíneos que de otra manera seguirían, y obligados a girar en órbitas curvas. Una piedra que da vueltas en una honda se esfuerza por alejarse de la mano que la hace girar, y por ese esfuerzo distiende la honda tanto más cuanto que con mayor velocidad gira, y sale volando tan pronto como es liberada. Llamo fuerza centripeta a aquella que se opone a ese esfuerzo, y mediante la cual la honda atrae continuamente la piedra hacia la mano y la retiene en su órbita, porque se dirige hacia la mano como hacia el centro de la órbita. Y lo mismo debe entenderse de todos los cuerpos que giran en órbita. Todos intentan alejarse de los centros de sus órbitas, y de no ser por la oposición de una fuerza contraria que se lo impide manteniéndolos en sus órbitas, y que por eso llamo centripeta, partirían con líneas rectas con un movimiento uniforme. Si no fuese por la gravedad, un proyectil no se desviaría hacia la Tierra (y) la Luna no podría ser mantenida en su órbita. Si tal fuerza fuese demasiado pequeña, no bastaría para apartar a la Luna de su curso rectilíneo; si fuese demasiado grande, sacaría a la Luna de su órbita, haciéndola caer sobre la Tierra. Es necesario que la fuerza tenga la magnitud justa, y pertenece a las matemáticas descubrir la fuerza capaz de servir exactamente para retener a un cuerpo en su órbita dada a una velocidad dada; “y, a la inversa, descubrir la curva que por efecto de una fuerza dada

¿Pero cuál es la magnitud de la aceleración centrípeta? ¿En qué medida depende de la velocidad de rotación y del tamaño de la órbita circular? Sabemos que la respuesta a esta cuestión fue crucial para la teoría de Newton del sistema solar, y constituyó una etapa necesaria para la ley de la gravitación.

Para Newton la fuerza es un elemento absoluto, a diferencia del movimiento que puede ser absoluto o relativo.

“Las causas mediante las cuales se distinguen los movimientos relativos de los verdaderos son las fuerzas impresas en los cuerpos para generar el movimiento. El movimiento verdadero no es generado ni alterado sino por alguna fuerza impresa en el mismo cuerpo movido, pero el movimiento relativo puede ser generado o alterado sin fuerza alguna impresa en el cuerpo” [22].

V. COMENTARIOS FINALES

No cabe duda de la importancia histórica del concepto de fuerza en el desarrollo de la mecánica, desde su formulación por Aristóteles hasta su maduración como concepto de la física moderna con Galileo.

Este desarrollo posibilita que profesores y alumnos tomen conciencia y exploren las semejanzas entre los conceptos alternativos de estos autores, y las visiones que fueron históricamente construidas y superadas.

Consideramos que la incorporación de esta historia en los materiales curriculares podría llevar a los profesores a prestar más atención a los conceptos alternativos de sus alumnos. Podría también ayudar a los alumnos a que vean el valor de sus ideas, mostrando al mismo tiempo cómo nociones semejantes evolucionaron en la curso de la historia, colaborando así a reconstruir sus conceptos.

REFERENCIAS

- [1] Rivera-Juárez, J. M., Madrigal-Melchor, J., Cabrera-M., E. Mercado, C., *Evolución histórica del concepto fuerza*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **8**, 1 – 7 (2014).
[2] Nersisyan, N. J., *Should Physicists preach what they practice? Constructive modeling in doing and learning physics*, Science Education **4**, 203-226 (1995).

- [3] Descartes, R., *Oeuvres*, Charles Adam y Paul Tannery, Tomo II, Discours de la Methode, pág. 380, Carta a Mersenne del 2 de octubre de 1638. (Ed. Vrin, París, 1965).
[4] Koyre, A., *Estudio Galileanos*, (Siglo XX, Madrid, 1980), pág. 106.
[5] Jammer, M., *Storia del concetto di forza*, (Ed. Feltrinelli, Milano, 1979), pp. 115-116.
[6] Descartes, R., *Principles of Philosophy (Principia Philosophiae)*, 1644, traducción de John Veitch, (Ed. Kindle, North Charleston, SC, USA, 1901).
[7] Jammer, M., *ob. cit.*, pág. 117.
[8] Descartes, R., *ob. cit.*, II parte, **43**, pp. 66-67.
[9] Westfall, R. S., *La construcción de la ciencia moderna*, (Labor, Barcelona, 1980), pág. 175.
[10] Dugas, R., *La Mécanique au XVII siècle*, (Vrin, París, 1954), pág. 62.
[11] Melebranche, N., *De la Recherche de la Verité*, Oeuvres Completes, Tomo II, libro XI, II, IX, (Vrin, París, 1972), p. 430.
[12] Melebranche, N., *Entretiens sur la Métaphysique et sur la Religion*, Tomo XII, VII, X, (Ed. Vrin, París, 1688), pp. 161-162.
[13] Mach, E., *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica*, (Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1949), pág. 76.
[14] Jammer, M., *ob. cit.*, pág. 126.
[15] Hobbes, T., *English Works*, (J. Bohn, London, 1839), reprint Aalen Scientia, Darmstadt 1966, Tomo I, *Concerning boby*, Cap. VIII, 19, pág. 115.
[16] *Ibidem*, cap. IX, 7, pág. 124.
[17] *Ibidem*, cop. XXX, 2, pág. 509.
[18] Newton, I., *Opera quas exstant omnia. Frksimile Neudruck der Ausgabe von Samuel Horsley*, London, 1799, in funf Banden. Friedrich Frommann Verlag, (Gun Holzboog), (Stuttgart – Bad Cannstatt, London, 1964), Tomo II, pág. 8.
[19] Koyré, A., *Estudes newtoniennes*, (Ed. Gallimard y Hermann, París, 1965), pág. 94.
[20] *Ibidem*, pp. 94, 103.
[21] Newton, I., *Opticks or a treatise of the Reflections, Refraction, Inflections y Colours of Ligth*, basada en la cuarta edición, Londres, 1730, (Dover, New York, 1979).
[22] Newton, I., *Philosophise Naturalis Principia Mathematica*, Editores A. Koyré y I. Bernard Cohen con la asistencia de Anne Whitman, (Harvard University Press, Cambridge, Masechusetts, 1999).
[23] Jammer, M., *ob. cit.*, pág. 133.