

Evolución histórica del concepto inercia. Primera parte



J. M. Rivera-Juárez¹, J. Madrigal-Melchor¹, E. Cabrera-Muruato²

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

²Unidad Académica Preparatoria, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Zacatecas, México.

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

(Recibido el 30 de Junio de 2015, aceptado el 2 de Abril de 2016)

Resumen

El principio de inercia constituye uno de los pilares fundamentales de la física clásica, en cuyo enunciado están postulados todos los cambios esenciales en la concepción del mundo que marcó el fin de la física medieval y renacentista del siglo XVII. Desde entonces, el concepto –y el término mismo– de “inercia”, se han asimilado de tal manera que han llegado a ser parte del lenguaje cotidiano, y su utilización se ha extendido a otros campos del conocimiento para designar, en general, la resistencia al cambio. Con todo esto, el concepto de inercia es mucho más complejo de lo que puede parecer a primera vista, y tras la aparente sencillez de su enunciado se encuentra la prolongada y fecunda historia de su formación. Las grandes etapas de la evolución del concepto de inercia van unidas a los diversos modos de entender la naturaleza del movimiento –ya sea como movimiento natural, cualidad o fuerza impresa y estado inercial de movimiento–. De esta manera, la historia del pensamiento físico, se nos presenta en tres grandes etapas. La primera etapa es la física aristotélica, la segunda etapa está constituida por la física del ímpetus, finalmente, la tercera etapa es la física matematizada. En este trabajo, analizaremos la evolución del concepto inercia desde las primeras críticas de Hiparco de Rodas, pasando por la teorización en la física aristotélica al movimiento de proyectiles, hasta la física del ímpetus, dejando para una segunda parte su formulación definitiva por Newton en el siglo XVII.

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

Abstract

The principle of inertia constitutes one of the fundamental pillars of Classical Physics, which states all the essential changes in the understanding of the universe that marked the ending of Medieval and Renaissance Physics of the 17th century. Since then, its own definition and conceptualization have been assimilated to become household terms and its use has extended to other areas of knowledge, generally to describe an opposition to change. With all this, the concept of inertia is much more complex than what it seems at first sight and behind its seemingly simple statement, one can find the long and fertile history of its conception. The great stages in the evolution of the concept of inertia are tied to the different ways in which the nature of movement is understood –be it natural movement, quality and force impressed and the inertial state of movement. In this manner, the history of physical thinking comes to us in three large periods. The first period is the Aristotelian Physics, the second one constitutes the physics of impetus, and finally, the Mathematical Physics. In this work, we are going to analyze the evolution of the concept of inertia from the first critics of Hiparco of Rodas, through theorizations in Aristotelian Physics of the movement of projectiles, to the physics of impetus, leaving its final formulation by Newton in the 17th century to a second part.

Keywords: History of Science, Inertia, Physics.

PACS: 01.65.+g, 01.40.-d

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El principio de inercia constituye uno de los pilares fundamentales de la física clásica, en cuyo enunciado están postulados todos los cambios esenciales en la concepción del mundo que marcó el fin de la física medieval y renacentista del siglo XVII. Desde entonces el concepto y el término mismo de inercia, se han asimilado de tal manera que han llegado a ser parte del lenguaje cotidiano y su utilización se ha extendido a otros campos del

conocimiento, para designar en general la resistencia al cambio. Con todo esto, el concepto de inercia es mucho más complejo de lo que puede parecer a primera vista, y tras la aparente sencillez de su enunciado se encuentra la prolongada y fecunda historia de su formación.

Las grandes etapas de la evolución del concepto de inercia van unidas a los diversos modos de entender la naturaleza del movimiento –ya sea como movimiento natural, cualidad o fuerza impresa y estado inercial de movimiento–. De esta manera, la historia del pensamiento

J. M. Rivera-Juárez, J. Madrigal-Melchor, E. Cabrera-Muruato
físico desde Aristóteles a Newton, se nos presenta en tres grandes etapas.

La primera etapa es la física aristotélica, una física carente de formalización matemática, caracterizada por el empleo de tres principios fundamentales: el lugar natural, el movimiento natural –entendido como el proceso encaminado al reposo– y rechazo al vacío.

La segunda etapa está constituida por la física del ímpetus, una física que, a pesar de ser de origen griego, fue elaborado sobre todo en el siglo XIV en la escuela de París por Juan Buridán. Esta física investiga la causa del movimiento por medio del concepto de fuerza impresa, al que se da el nombre de ímpetus.

Finalmente, la tercera etapa es la física matematizada, fundada en el método de la nueva ciencia experimental, ideado por Galileo, Descartes y Newton. Se trata de una física basada fundamentalmente en los conceptos de movimiento inercial, espacio infinito y vacío.

En este trabajo analizaremos la evolución del concepto inercia desde las primeras críticas de Hiparco de Rodas, pasando por la teorización en la física aristotélica al movimiento de proyectiles, en el siglo II a. C. hasta la física del ímpetus, dejando para una segunda parte su formulación definitiva por Newton en el siglo XVII.

Como lo hemos señalado en trabajos anteriores, la Física no es el producto de la genialidad aislada que cambió el curso de la ciencia. Hay muchos ejemplos que confirman que la evolución de las ideas de la Física y la aparición de nuevas teorías no es una sucesión de obras debidas a genios aislados pasando por alto el papel de la colectividad en su proceso [1].

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]. La evolución del conocimiento científico a lo largo de la historia, ha estado precedido de un enorme esfuerzo por parte de sus protagonistas fundamentales –los genios–, esfuerzo que en la mayoría de los casos significó la superación de obstáculos y el abandono de concepciones que exigieron un notable esfuerzo de penetración científica.

Este es –entre otros– el caso del principio de inercia. El principio de inercia no puede inferirse directamente de la experiencia, –no es posible observarlo directamente en la naturaleza– sino a través de una suposición –abstracción– que sea acorde con lo observado. Al respecto, Alexandre Koyré, uno de los más representativos historiadores de la ciencia, plantea lo siguiente.

“El principio de la inercia no surgió ya elaborado del pensamiento de Descartes o de Galileo, como Atenea de la cabeza de Zeus”, fue producto de un largo esfuerzo del pensamiento [3].

El principio de inercia es parte esencial del movimiento, el cual fue objeto de estudio desde la antigüedad. El primer estudio sistemático del movimiento corresponde a Aristóteles. Y fue la crítica a las teorías aristotélicas del movimiento, lo que constituyó el germen de la nueva ciencia del movimiento.

II. FÍSICA ARISTOTÉLICA

Se considera que el origen de la evolución teórica que condujo al enunciado del concepto de inercia, en la mecánica clásica, se encuentra en Aristóteles. La figura gigantesca de Aristóteles dominó la escena intelectual durante veinte siglos.

En particular, la crítica a sus planteamientos sobre el movimiento, que constituía el aspecto más débil de su doctrina, estuvo en el centro de la conceptualización que culminó con la formulación de las leyes del movimiento de Newton.

Según Aristóteles, el movimiento es un efecto que procede de la naturaleza determinada de un cuerpo. La naturaleza de los cuerpos depende, a su vez, de los elementos que lo componen. La característica principal del movimiento de un cuerpo formado por cualquiera de estos elementos –tierra, aire, agua y fuego– es la linealidad.

En el caso de los cuerpos en los que predomina la tierra, el movimiento lineal es descendente o de caída; y en el de aquellos en que predomina el fuego, el movimiento lineal es ascendente.

A diferencia de los cuerpos terrestres, para Aristóteles, los cuerpos celestes se componen de un elemento desconocido en la Tierra: el éter. Es propio de los cuerpos compuestos por el éter el ser inalterables e incorruptibles. A diferencia del movimiento de los cuerpos mundanos, cuya naturaleza los condiciona a realizar movimientos lineales y transitorios, el movimiento de los cuerpos celestes es circular y perpetuo. Como se puede apreciar, la cosmología aristotélica se caracteriza por la separación entre el Cielo y la Tierra.

No fue sino hasta la llegada de Kepler y Galileo que se logró la unificación entre la física terrestre y la celeste.

Es precisamente en el cielo, donde se da el espacio más apropiado para el nuevo concepto de movimiento que estaba surgiendo: el estado de movimiento inercial.

En el cosmos aristotélico, no puede darse la conservación del movimiento, y menos aún, el movimiento inercial. En un espacio caracterizado por un centro y una periferia, en el que debe diferenciarse un mundo sublunar y un cielo, y donde los cuerpos tienen movimientos naturales propios según su naturaleza, es imposible afirmar que: “todo cuerpo tiende a permanecer en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que dicho estado cambie por la acción de fuerzas externas”.

Dentro de la física aristotélica el vacío no puede existir, Aristóteles niega rotundamente su existencia y plantea que para que el movimiento pueda darse, no es necesario en absoluto la existencia del vacío. Más aún, supone que el concepto mismo lleva a conclusiones absurdas: cuanto menos es la resistencia del medio, tanto mayor es la velocidad del cuerpo en movimiento; por consiguiente en el vacío, la resistencia es nula, la velocidad debe ser infinita, lo cual para él es imposible.

El mismo Aristóteles, al argumentar contra la existencia del vacío, rechazó la posibilidad de la conservación del movimiento, condición necesaria del movimiento inercial, como un contrasentido en el marco de su sistema teórico. Para

él, todo movimiento lleva aparejado un cambio de circunstancias, y en el vacío, uniforme y homogéneo, un cuerpo tendría siempre la misma relación con todos los lugares, por lo cual es imposible el movimiento en el vacío, e incluso la existencia misma del vacío es imposible.

¿Cómo puede haber un movimiento natural si no hay diferencias según el vacío y lo infinito? Pues en la medida en que sea infinito, no hay arriba, abajo, o centro; y en el vacío, arriba no se diferencia de abajo. En la nada no hay diferencias, y no las hay en el vacío, pero el movimiento natural es diferenciado, de manera que las cosas que existen naturalmente deben ser diferenciadas. Entonces, o no hay movimiento natural, o no hay vacío [...]. Además, [en el vacío] nadie puede decir por qué una cosa una vez puesta en movimiento se detendrá en algún punto; ni por qué se detendría aquí en lugar de hacerlo allí. De modo que una cosa se mantendría en reposo o se movería indefinidamente hasta que algo más fuerte se lo impidiera [4].

Newton, conocedor de este planteamiento, lo trajo a colación en uno de sus manuscritos como un antecedente de su Primera Ley del Movimiento [5]. El texto citado de Aristóteles, tiene importancia, no tanto por el enunciado de la Ley de Conservación del Movimiento, sino por su negación explícita en el contexto de la física y de la cosmología aristotélica. En cierta forma, Aristóteles definió desde entonces las condiciones del proceso de conceptualización, que llevaría a formular más adelante los principios de la conservación del movimiento y de la inercia. El enunciado de ambos principios, implicaría necesariamente la negación de las ideas que sobre el espacio, la materia y el movimiento había defendido Aristóteles.

La física aristotélica es incompatible con el principio de inercia, y en ella el movimiento y el reposo pertenecen a un estatus ontológico diferente: el reposo es un estado en el cual sí pueden permanecer los cuerpos, mientras que, el movimiento es un proceso mediante el cual el cuerpo se dirige al lugar natural que le corresponde, y por tanto, no puede permanecer en movimiento indefinidamente.

Todo cuerpo se desplaza en un lugar, según un particular tipo de movimiento. Algunos autores del siglo XIV sugirieron que, sólo en el vacío, libre de toda influencia perturbadora, los cuerpos alcanzarían su movimiento verdaderamente natural o esencial. La razón presentada era que, la resistencia del medio –que no existe en el vacío– es una perturbación accidental que obstaculizaría este movimiento esencial.

De este modo, los conceptos aristotélicos de movimiento natural y de lugar natural, venían a ser transformados en beneficio del concepto de movimiento esencial en el vacío. Este tipo de movimiento esencial de un cuerpo en el vacío, será llamado en el siglo XVII movimiento inercial. Pero el concepto medieval de ímpetus era un precedente de este movimiento inercial.

La doctrina aristotélica del movimiento presenta su lado más débil en la explicación de un fenómeno de diaria ocurrencia: el movimiento de los proyectiles. De acuerdo con dicha doctrina un cuerpo sub lunar se mantiene en reposo o se dirige en línea recta hacia su lugar natural, a menos que actué sobre

él una fuerza exterior; pero un proyectil no lo hace y continúa moviéndose en la dirección en que ha sido lanzado, inmediatamente después de que ha cesado todo contacto con el elemento propulsor.

La solución propuesta por Aristóteles se basó en un oscuro razonamiento que convierte al medio en motor: el aire perturbado por el movimiento del cuerpo es la fuente del impulso que prolonga su movimiento; cuando la mano lanza un cuerpo, mueve, al mismo tiempo que el cuerpo, el aire que lo rodea; la parte del aire así movida empuja a la parte contigua, y ésta a una parte todavía más lejana, y cada una de estas partes del aire así movido, arrastra consigo el cuerpo en movimiento [6].

III. FÍSICA DEL ÍMPETUS

Fue justamente en la conceptualización del movimiento de los proyectiles, donde comenzó a desarrollarse la crítica a la doctrina aristotélica del movimiento, y de donde partieron finalmente, los conceptos que culminaron con la formulación del concepto de inercia y de la Primera Ley de Newton.

La explicación aristotélica del movimiento de los proyectiles fue criticada inicialmente en el siglo II a.C. por **Hiparco de Rodas**, el astrónomo en desacuerdo con el planteamiento aristotélico sobre el movimiento de proyectiles, quien explica la situación de post-lanzamiento de un proyectil de una manera totalmente diferente a la física aristotélica. Para él, el movimiento se da por medio de una fuerza, transmitida, al proyectil por el proyector. Esta fuerza absorbida por el proyectil, se extingue gradualmente a medida que el proyectil se mueve, le llamó fuerza impresa [7].

La noción de fuerza impresa trae consigo un elemento nuevo en las consideraciones sobre fuerza y movimiento, mientras que para Aristóteles la fuerza que impulsa un proyectil proviene del propio medio, siendo por lo tanto externa a él. Para Hiparco, la fuerza responsable de su movimiento es una fuerza interna “almacenada” en el proyectil [8].

Juan Filopón, recogió esta crítica y desarrolló la propuesta de Hiparco en la Alejandría del siglo VI [9]. Su crítica al planteamiento aristotélico del movimiento de los proyectiles se basó en el argumento de que, si el medio opone resistencia al movimiento de los cuerpos, no puede ser causa del mismo. En su solución a este problema, Filopón propuso que el instrumento de proyección imparte una potencia motriz al proyectil, y es esa fuerza impresa la que continúa moviéndolo [10].

Logró percibir la conservación de un movimiento sin un motor externo que actúe continuamente sobre el cuerpo, lo que constituyó un paso gigantesco en el análisis del movimiento.

A pesar de ello, la solución propuesta por Juan Filopón implica no la conservación del movimiento, sino la persistencia temporal de una fuerza motriz que mantiene el movimiento; lo que si bien constituye un avance respecto a Aristóteles, está basado aún en un concepto fundamental de la física aristotélica: el movimiento debe ser producido por una fuerza, y la velocidad del cuerpo en movimiento es

J. M. Rivera-Juárez, J. Madrigal-Melchor, E. Cabrera-Muruato
proporcional a dicha fuerza. Esta limitación fue una constante en la conceptualización del movimiento, salvo contadas excepciones, hasta bien entrado el siglo XVII.

Parece que fue el primero en demostrar en oposición a Aristóteles que el medio no podía ser la causa del movimiento en el caso del proyectil.

También, intentó expresar la fuerza cuantitativamente, diciendo que los cuerpos movidos por una fuerza determinada se trasladarían con velocidad inversamente proporcional a sus pesos; y que los cuerpos que se movían a una velocidad determinada recorrían, contra la resistencia del aire, distancias directamente proporcionales a sus pesos.

Esta concepción de fuerza impresa tiene un interesante desarrollo histórico. Fue un elemento fundamental en discusiones que se establecieron, principalmente a partir del siglo XII, sobre la existencia o no del vacío y de todo tipo de consecuencia que se derivan del posible movimiento de un proyectil en un medio sin resistencia. Parece también haberse convertido en un importante punto de referencia para la teoría del ímpetu de Buridán, en el siglo XIV.

También Galileo, en sus primeros estudios sobre el movimiento de proyectiles, hizo uso del concepto de fuerza impresa [11].

Las ideas revolucionarias de Hiparco y Filopón se pueden considerar como los primeros esbozos de una teoría alternativa a los planteamientos aristotélicos sobre el movimiento de proyectiles, que luego fue desarrollada por Buridán.

Por su parte, los filósofos árabes a partir del siglo XI, explicaron el movimiento de los proyectiles debido a la acción de una “fuerza prestada”, que tenía las características de una cualidad impartida por el proyectil, de forma análoga a como el calor es transmitido al agua por el fuego.

En esta línea de razonamiento *Ibn Sina* o *Avicena* –por su nombre latinizado– hizo un intento de cuantificación: a igual fuerza motriz, la velocidad es inversamente proporcional al peso [12], y –a diferencia de Juan Filopón, para quien la fuerza motriz desaparece progresivamente del proyectil hasta que éste se detiene– argumentó que en ausencia de obstáculos, la fuerza prestada y el movimiento “forzado” que producía persistirían indefinidamente.

Alrededor de 1320, *Francisco de Marchia*, concluyó que el movimiento o impulso de una fuerza heredada o fuerza impresa en el proyectil por el motor primario –bien sea la mano, la honda o el arco– no era concebida como una fuerza innata ni permanente; y al ser opuesta a las inclinaciones naturales del cuerpo, podía actuar solamente durante un tiempo limitado [13].

El concepto de movimiento de *Guillermo de Ockham*, es un movimiento que perdura en la medida en que no requiere una fuerza que mueva al objeto; y ello equivale a postular la conservación del movimiento.

... pues lo que se mueve en el movimiento de esta clase, después de la separación del cuerpo en movimiento del proyectil original, es el cuerpo movido por sí mismo y no por alguna fuerza en él o relativa a él... sería asombroso, ciertamente, si mi mano produjera alguna fuerza en la piedra por el mero hecho de que por medio del movimiento local se puso en contacto con la piedra [14].

La formulación del movimiento hecha por Ockham, al considerarlo como una relación que no requiere una causa eficiente continuada, implica la negación de cualquier fuerza, incluida la fuerza impresa, o cualquiera de sus variedades, para explicar el movimiento y con ello anticipa uno de los elementos básicos en la formulación del concepto de inercia: el principio de la conservación del movimiento.

Aun así, de esta concepción no es posible deducir la conservación de la velocidad uniforme en línea recta de los cuerpos, en ausencia de fuerzas externas, elementos ambos que constituyen la característica esencial del movimiento inercial.

Juan Buridán, al analizar el movimiento de los proyectiles propuso la teoría dinámica más influyente en los tres siglos siguientes, es el autor que presenta la versión más acabada de la teoría del ímpetu –o fuerza impresa en un móvil–. De acuerdo con esta teoría, la conservación del movimiento de los proyectiles puede ser explicada por una especie de impulso, ímpetu, que el motor imprime en el cuerpo movido. La exposición del problema y la solución propuesta se encuentran en su obra *Questiones super octo libros physicorum*:

Se pretende saber si un proyectil, una vez abandona la mano de quien lo arroja, sigue en movimiento por acción del aire o de cualquier otra causa [...]. Creo que tal pregunta es muy difícil de responder, pues Aristóteles, según mi parecer, no ha sabido resolver satisfactoriamente el problema [...]. Sostiene [en cierto momento] que el proyectil abandona con toda rapidez la posición que ocupaba y que la naturaleza, que no tolera vacío alguno, envía de inmediato el aire tras él para que llene el vacío creado. El aire desplazado de tal forma entra en contacto con el proyectil y le empuja hacia adelante. Este proceso se repite continuamente a lo largo de una cierta distancia [...].

Así pues, podemos y debemos afirmar que en la piedra, o en cualquier otro proyectil, se halla impreso algo que constituye la fuerza motriz del proyectil en cuestión. Evidentemente, tal suposición es mucho mejor que caer de nuevo en la afirmación de que el aire quiere continuar moviendo el proyectil ya que lo cierto es que parece resistirse a ello [...]. Debemos concluir que un motor, al mover un cuerpo, imprime en él un cierto ímpetu, una cierta fuerza capaz de mover este cuerpo en la dirección en la que lo lanzó el motor, sea hacia arriba o hacia abajo, hacia un lado o en círculo. Cuanto más rápidamente el motor mueve al mismo cuerpo, tanto más poderoso es el ímpetu impreso en él. Es por este ímpetu por lo que la piedra es movida después de que el lanzador deja de moverla; pero, a causa de la resistencia del aire y también a causa de la gravedad de la piedra, que la inclina a moverse en una dirección opuesta a la que el ímpetu tiende a moverla, este ímpetu se debilita continuamente. Por tanto, el movimiento de la piedra se hará continuamente más lento, y a la larga el ímpetu estará tan disminuido o destruido que la gravedad* de la piedra prevalece sobre él y mueve la piedra hacia abajo, hacia su lugar natural.*

IV COMENTARIOS FINALES

Creo que se puede aceptar esta explicación por qué las otras explicaciones no parecen ser verdaderas, mientras que todos los fenómenos están de acuerdo con ésta...[15, 16].

Es cierto que la fuerza motriz impresa conocida como ímpetus continuaba inscrita en la física aristotélica como una fuerza violenta que se oponía a la tendencia natural de los cuerpos hacia el reposo, pero esa fuerza no era ya producida por un motor externo sino que se encontraba en el propio cuerpo en movimiento. Buridán dio así un paso decisivo en la historia del pensamiento; el respetado principio aristotélico todo lo que se mueve debe ser movido por algo [17] había perdido su posición indiscutida hasta entonces.

La idea del ímpetus –tal como fue concebida y expuesta por Juan Buridán– constituía una solución a los problemas clásicos que surgían dentro del contexto de la dinámica aristotélica: el movimiento de los proyectiles, la aceleración de los cuerpos en su caída, la conservación del movimiento de los cuerpos celestes y terrestres [18].

La propuesta de Buridán fue un valioso intento de formulación cuantitativa que supera la noción de causa aristotélica: el ímpetus es concebido como una fuerza o poder poseído por el cuerpo sólo en razón de estar en movimiento, sin relación alguna con su naturaleza, su forma, o algún otro aspecto del cuerpo.

Las características básicas de la teoría del ímpetus tal como fueron planteadas por Buridán se mantuvieron prácticamente sin modificación hasta el siglo XVII.

En párrafos anteriores, señalamos que hubo que esperar la llegada de Kepler y Galileo, para que se lograra la unificación de las físicas celeste y terrestre. Es importante señalar que el primer intento de unificación fue realizado por Buridán, quien aplicó la teoría del ímpetus no solo al movimiento –natural y violento– de los cuerpos terrestres, sino también al movimiento de los cuerpos celestes; idea que fue ampliada y profundizada por Nicolás Oresme, quien estableció de manera explícita la comparación:

Cuando Dios creó [los cielos], los dotó con una cierta cualidad y una cierta fuerza de movimiento de modo similar a como había dotado de peso a las cosas terrestres [19] (in *KCR*, 165).

Hacia finales del siglo XV, la dinámica del ímpetus, bajo cualquiera de las versiones comparable a la expuesta por Juan Buridán, había reemplazado a la dinámica aristotélica en las obras de los principales filósofos de la naturaleza.

La teoría del ímpetus formó parte de casi la totalidad de los argumentos planteados en la Edad Media y el Renacimiento en favor del movimiento de la Tierra. Aunque los teóricos medievales no llevaron a sus últimas consecuencias la unificación del Cielo y la Tierra bajo unas mismas leyes mecánicas, quedó abierto un amplio camino para llegar a la cabal comprensión de los movimientos terrestres y planetarios. Una de las riquezas de la física clásica sería precisamente la comparación de astros y proyectiles como cuerpos en movimiento. La formulación del principio de inercia sólo fue posible cuando Newton sometió al mismo criterio dinámico el movimiento de los astros y el lanzamiento de los proyectiles.

El interés de Buridán sobre nuevos problemas, el tratamiento novedoso de viejas cuestiones y el planteamiento de nuevas abstracciones, hizo avanzar la teoría del movimiento en dirección de la revolución científica del siglo XVII. Con anterioridad a Ockham y Buridán, Aristóteles y la experiencia cotidiana aseguraban que sólo perdura el reposo. Ockham, Cusa, Buridán y sus sucesores propusieron que, a menos que un cuerpo encuentre alguna resistencia o tenga inclinación a otros movimientos, también perdura el movimiento mantenido por el *ímpetus*, y con ello, así se mantuvieran en la tradición aristotélica, daban un importante paso en la formación de un concepto clave de la física clásica: el principio de inercia.

REFERENCIAS

- [1] Rivera-Juárez, J. M., Madrigal-Melchos, J., Cabrera-Muruato, E. y Mercado, C., *Evolución histórica del concepto fuerza*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **8**, 4001-4002 (2014).
- [2] Nersseian, N. J., *¿Should physicists preach what they practice constructive modeling in doing and learning physics?*, *Science Education* **4**, 203-226 (1995).
- [3] Koyré, A., *Estudios galileanos*, (Siglo XXI, México, 1981).
- [4] Aristóteles, *Physica*, s. IV a. C. (Hardie, R. P. & Gaye, R. K. (Trads.), In: *Physics, The Works of Aristotle, Great Books of the Western World*, (Enciclopædia Britannica, Chicago, 1952), p. 257-355.
- [5] Newton, I., *Fragment on the Law of Inertia*, 1687(?), In: Hall, R. & Boas Hall, M., *Unpublished scientific papers of Isaac Newton*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1962), p. 311.
- [6] Aristóteles, *Physica*, s. IV a. C. Hardie, R.P. & Gaye, R. K., (Trads.), *Physics, The Works of Aristotle, Great Books of the Western World*, (Enciclopædia Britannica, Chicago, 1952). p. 257-355.
- [7] Franklin, A., *Principle of inertia in the middle ages*, *Am. J. Phys.* **44**, 529-545 (1976).
- [8] Rivera-Juárez, J. M., Madrigal-Melchos, J., Cabrera-Muruato, E. y Mercado, C., *Evolución histórica del concepto fuerza*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **8**, 4601-4603 (2014).
- [9] Wohlwill, E., *Ein Vorgänger Galileis im 6. Jahrhundert*, *Physikalische Zeitschrift*, **7**, 23-32 (1924),
- [10] Gilson, E., *La Philosophie au Moyen Age*, (Payot, París, 1952). Versión española de Pacios A. y Caballero, S., *La filosofía de la Edad Media*, (Gredos, Madrid, 1985).
- [11] Peduzzi, L. O. Q. & Zylbersztajn, A., *La física de la fuerza impresa y sus implicaciones para la enseñanza de la Mecánica*, *Enseñanza de las Ciencias* **15**, 351-359 (1997).
- [12] Crombie, A. C., *Augustine to Galileo*, 1959, Bernia, J. (Trad.), *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo*, *Vol. II*, (Alianza Universidad, Madrid, 1974.) p. 56.

J. M. Rivera-Juárez, J. Madrigal-Melchor, E. Cabrera-Muruato

[13] Crombie, A. C., Augustine to Galileo, 1959, Bernia, J. (Trad.), *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo, Vol. II*, (Alianza Universidad, Madrid, 1974.), p. 62.

[14] Crombie, A. C., Augustine to Galileo, 1959, Bernia, J. (Trad.), *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo, Vol. II*, (Alianza Universidad, Madrid, 1974.), p. 65.

[15] Crombie, A. C., Augustine to Galileo, 1959, Bernia, J. (Trad.), *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo, Vol. II*, (Alianza Universidad, Madrid, 1974.), p. 69-72.

[16] Kuhn, T., *The Copernican Revolution*, 1957, Bergadá, D. (Trad.), In: *La Revolución Copernicana*, (Ariel, Barcelona, 1985). p. 166-167.

[17] Aristóteles, *Physica*, s. IV a. C. Hardie, R.P. & Gaye, R. K., (Trads.), *Physics, The Works of Aristotle, Great Books of the Western World*, (Enciclopædia Britannica, Chicago, 1952), p. 326.

[18] Minguez, C., *De Ockham a Newton: la formación de la Ciencia Moderna*, (Cincel, Madrid, 1989), p. 5.

[19] Kuhn, T., *The Copernican Revolution*, 1957, Bergadá, D. (Trad.), *La Revolución Copernicana*, (Ariel, Barcelona, 1985), p. 165.