

LA FÍSICA DE LA FUERZA IMPRESA Y SUS IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA

PEDUZZI, L.O.Q. y ZYLBERSZTAJN, A.

Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação em Educação / Ensino de Ciências Naturais.
Universidade Federal de Santa Catarina. 88049-900. Florianópolis. SC Brasil.

SUMMARY

When examining learners' understanding of questions involving the movement of projectiles one notices, in general, that their common sense is far away from making any reference to aristotelian antiperistasis. The causes for a 'violent' or forced movement are seen as located in the body itself, following from the projectile-projector interaction. This is essentially the concept of impressed force, introduced by astronomer Hipparchus (second century BC) and adopted by Philoponus (sixth century), among others. The notion of impressed force has an interesting historical development. It may have been a reference for the establishment of the impetus theory by Buridan in the fourteenth century, and was part of the debate that took place from the twelfth century onwards about the possible movement of a projectile in the void. This work explores historically this concept, making use of it in problem situations that are both well familiar to the students and relevant for the development of mechanics. From the point of view of teaching that takes into consideration the learners' ideas, this theme has great didactic potential for the development of strategies to help the reformulation of their conceptions, turning them more consistent with what is accepted as scientific today.

INTRODUCCIÓN

En una clásica situación, en un problema de física general, se tiene un globo subiendo a una cierta velocidad cuando de él se deja caer un saco de arena. Dada la velocidad del globo y su altura en relación con el suelo en el momento en que se deja caer el costal, se debe determinar la distancia total recorrida por éste desde el momento en que deja el globo hasta chocar contra el suelo.

Muchos estudiantes, incluso universitarios, al plantearse este problema, consideran que el saco de arena inmediatamente después de dejar el globo tiene un movimiento descendiente en relación con el suelo. Estos mismos estudiantes, frente a la no menos clásica cuestión de la piedra que se deja caer de lo alto del mástil de un navío en movimiento con velocidad constante, responden, tal como los aristotélicos, que la piedra queda atrás, cayendo en algún punto apartado de la base del mástil. En

ambos casos, el error, como se sabe, está en la no consideración de la velocidad que el objeto posee cuando abandona el respectivo *sistema* en movimiento: a) por compartir la misma velocidad del globo después de dejarse caer, el costal de arena sube un poco hasta que su velocidad se hace nula para después caer; b) por compartir la misma velocidad horizontal del navío, cuando se deja caer, la piedra cae junto al mástil, para una resistencia del aire despreciable.

Aunque las respuestas del estudiante y de un aristotélico coincidan en las situaciones arriba consideradas, el «aparato» conceptual que justifica cada una es, evidentemente, bien distinto: el aristotélico fundamenta sus respuestas en un paradigma bien estructurado, donde nociones como *lugar* y *movimiento natural*, entre otras, se encuentran lógicamente articuladas en una teoría altamente elaborada, aunque no lo sea matemáticamente (Kuhn,

1957; Peduzzi, 1994); el estudiante, por otro lado, responde basándose en su «física intuitiva» (Driver, 1986, Sebastia, 1984; Zylbersztajn, 1983).

Al examinarse más detalladamente el entendimiento de los estudiantes sobre las situaciones citadas anteriormente y sobre otras acerca del movimiento «violento» de un proyectil, se constata que su sentido común está lejos de hacer cualquier referencia a la antiperístasis aristotélica. Las explicaciones causales de los estudiantes para el movimiento de un proyectil, en general, tienen una notable semejanza con el concepto o idea de *fuerza impresa*, introducido en el siglo II antes de Cristo por el astrónomo Hiparco, según el cual un proyectil se mueve después de haber cesado el contacto entre el proyectil y el proyector por una fuerza «transmitida» a dicho proyectil por el proyector.

La noción de *fuerza impresa* tiene un interesante desarrollo histórico. Ésta es 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 viene del posible movimiento de un proyectil en un medio sin resistencia. Parece también haberse convertido en un importante punto de referencia para el establecimiento de la teoría del *impetus* de Buridan, en el siglo XIV. También Galileo, en sus primeros estudios sobre el movimiento de proyectiles, hizo uso del concepto de *fuerza impresa*.

En este artículo se intenta hacer una referencia histórica de este concepto, buscando principalmente en Franklin (1976) la orientación para la ejecución de esta tarea, y aplicándola en algunas situaciones problema, familiares al estudiante y relevantes para el desarrollo de la mecánica. El telón de fondo de las discusiones es, como no podría dejar de ser, la física aristotélica. En términos didácticos, es evidente la relevancia de este asunto dentro de la perspectiva de una enseñanza que toma en consideración las ideas de los alumnos. El desarrollo de estrategias que hagan uso de algunos conceptos históricamente superados, como es el caso de la *fuerza impresa*, además de situar y dar un sentido más amplio a algunas firmes ideas intuitivas de los estudiantes, puede contribuir para concienciarlos mejor de que es necesario reformular algunos de sus conceptos, a fin de que se tornen consistentes con lo que la ciencia hoy determina como aceptable.

HIPARCO Y LA NOCIÓN DE FUERZA IMPRESA

El astrónomo Hiparco (130 aC), de Nicea, discordando con la dinámica aristotélica del movimiento de proyectiles, explica la situación de postlanzamiento de un proyectil de una manera totalmente diferente de aquella concebida por los seguidores de Aristóteles. Para él, el movimiento se da por medio de una fuerza «transmitida» al proyectil por el proyector. Esa fuerza, «absorbida» por el proyectil se extingue gradualmente a medida que el proyectil se mueve (Franklin, 1976).

En el caso de una piedra lanzada verticalmente hacia arriba (Fig. 1), Hiparco argumenta que:

a) la fuerza proyectora es la causa del movimiento ascendente;

b) mientras que la fuerza es mayor que la tendencia del objeto hacia abajo (peso), éste se mueve hacia arriba. El movimiento ascendente continua, pero cada vez más lentamente, con la disminución de la fuerza proyectora;

c) el proyectil comienza a caer cuando la fuerza ascendente es menor que la tendencia del objeto hacia abajo. El cuerpo se mueve hacia abajo por influencia de su propio impulso interno (peso) cada vez más rápidamente, con la continua disminución de la fuerza proyectora y de la manera más rápida cuando esta fuerza es totalmente agotada.

Hiparco utiliza un argumento semejante para explicar la aceleración de los cuerpos que caen, liberados a partir del reposo. Inicialmente considera un objeto que se mantiene parado a una cierta altura en relación con el suelo, por ejemplo, preso entre las manos de una persona. En esta circunstancia, el objeto no se mueve porque su tendencia natural hacia abajo es compensada por la acción de la persona sobre el mismo. Después de haberse dejado caer (Fig. 2), la fuerza que lo mantenía parado, continua con el objeto. Esta fuerza, sin embargo, a medida que el objeto cae va disminuyendo hasta anularse en algún punto de la trayectoria. La existencia de esta fuerza, combinada con el peso del cuerpo, explica por qué éste se mueve de forma más lenta al ser liberado y después aumenta su velocidad; es decir, explica la aceleración del objeto.

Figura 1

Fuerzas sobre una piedra lanzada verticalmente hacia arriba durante su ascenso (a) y su descenso (b), según el concepto de Hiparco. En el punto 1 la piedra ya dejó el contacto con la mano del lanzador. El punto 4 indica la posición más alta alcanzada por el proyectil. Los puntos 2 y 3 representan posiciones del trayecto de ascenso de la piedra, mientras 5, 6 y 7 indican puntos de su descenso.

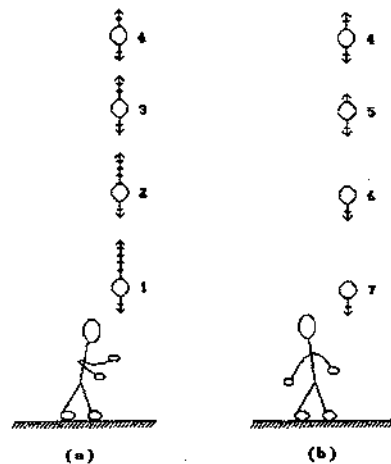
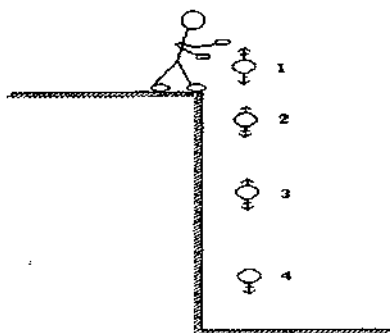


Figura 2

Fuerzas sobre una piedra que se deja caer de una cierta altura en relación con el suelo, según Hiparco. En el punto 1 no existe más contacto entre la piedra y la mano de la persona. Los puntos 2 y 3 representan posiciones de la trayectoria en que aún existe «fuerza ascendente» sobre la piedra. En el punto 4 (y en los demás hasta su choque contra el suelo) sólo está presente, sobre la piedra, su «tendencia» hacia abajo, es decir, su peso.



«En efecto, Hiparco (según lo que nos dice Simplicio, en cierto opúsculo en que él estudió muy particularmente este problema) pensó que el movimiento natural es más rápido hacia el final porque al principio de su movimiento el móvil es coartado por una fuerza extraña; de manera que éste no pueda ejercer su potencia nativa; es por eso que se mueve lentamente; más tarde, cuando esa fuerza extraña y externa poco a poco desaparece, la potencia natural se restablece y, de cierta manera libre de impedimentos, actúa más eficazmente. Es así que los cuerpos aceleran progresivamente su velocidad; proceso absolutamente comparable al enfriamiento del agua cuando es calentada y apartada del fuego. En efecto, al principio ésta se enfría de forma insensible y parece no hacer ningún progreso, mas, cuando el calor se fatiga, ésta recobra su antigua facultad, enfría más rápidamente y, por fin, va tan lejos que acaba por estar mucho más fría de lo que había estado antes de su calentamiento» (Koyré, 1986).

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.

FILOPÓN

Una importante crítica medieval sobre las consideraciones de Aristóteles de que un medio es necesario tanto para mantener como para ofrecer resistencia al movimiento de un proyectil, fue hecha por Filopón, de Alejandría, en el siglo VI.

Al rechazar la antiperistasis aristotélica como causa del movimiento violento de una piedra o flecha, Filopón así

se expresa: «Sobre esta suposición sería difícil decir qué es lo que hace que el aire, una vez impulsado hacia adelante, se mueva de vuelta, es decir, a lo largo de los lados de la flecha, y después alcance la trasera de la flecha, volviendo una vez más e impulsando la flecha hacia adelante. Pues, en esta teoría, el aire en cuestión debe realizar tres movimientos distintos: éste debe ser impulsado hacia adelante por la flecha, para entonces moverse hacia atrás, y finalmente volver y continuar hacia adelante una vez más. Sin embargo, el aire es fácilmente movido, y una vez colocado en movimiento, atraviesa una distancia considerable. ¿Cómo, entonces, puede el aire, impulsado por la flecha, dejar de moverse en dirección al impulso impreso, y en vez de eso girar, como por orden de algún comando, y retrasar su curso? Además, ¿cómo puede este aire, al girar, evitar dispersarse en el espacio y sí colisionar precisamente sobre el tallado final de la flecha y nuevamente impulsar la flecha hacia adelante? Tal visión es totalmente increíble y llega a ser fantástica» (Filopón, cit. por Evora, 1988).

Él también insiste en la imposibilidad de que una flecha o piedra pueda ser impulsada por el aire porque «es evidente que cuanto mayor sea la cantidad de aire a ser movido y cuanto mayor sea la fuerza con que éste es movido, más el aire impulsaría la flecha o piedra y más lejos éste las lanzaría. Pero el hecho es que, aunque usted coloque la flecha o piedra sobre una línea o punto completamente destituido de espesor y ponga en movimiento todo el aire detrás de los proyectiles, con toda la fuerza posible, el proyectil no se movería a una distancia de un único cúbado» (Filopón, cit. por Evora, 1988).

El medio, para Filopón, apenas retrasa el movimiento de un cuerpo. Sin embargo, la noción de que es necesaria la presencia continua de una fuerza para el mantenimiento de un movimiento también es un lugar común en su pensamiento. En el caso de no haber contacto físico entre el que desplaza y el que se desplaza, como en la situación de postlanzamiento de un proyectil, Filopón, igual que Hiparco, argumenta en favor de una fuerza impresa al proyectil por el proyectil, cuando ocurre su lanzamiento. Su «ley de movimiento», en el lenguaje moderno, tiene la forma

$$v \propto (F - R) \quad (1)$$

donde v representa la velocidad del cuerpo, F la fuerza que lo disloca y R la resistencia a su movimiento.

Discordando una vez más de Aristóteles, Filopón admite como posible la existencia de un movimiento sin resistencia. En este caso, siendo $R = 0$, velocidad y fuerza aplicada resultan proporcionales, no habiendo ningún movimiento instantáneo, como juzgaban los aristotélicos. Sin embargo, Filopón se somete al concepto dominante de un mundo finito que exige que cualquier movimiento sea limitado en extensión. Esto le lleva a concluir la autoextinción de la fuerza impresa a un proyectil en movimiento en el vacío, aunque no tenga argumentos para mostrar cómo esto sería posible.

Por otro lado, la disminución de la fuerza impresa a un proyectil en movimiento en un medio cualquiera es atribuida a la resistencia del medio y a la tendencia natural del cuerpo (es decir, a su inclinación en volver a su lugar natural).

Filopón también contradujo a Aristóteles sobre lo que éste afirmaba en relación con el tiempo de la caída de los objetos de pesos diferentes, que se dejaron caer de una misma altura, argumentando que «el experimento contradice las opiniones comúnmente aceptadas: porque, si usted deja caer de la misma altura dos cuerpos, uno de los cuales es muchas veces más pesado que el otro, verá que la razón de los tiempos empleados en los movimientos no depende de la razón de los pesos, porque la diferencia en el tiempo es muy pequeña. Y, así, si la diferencia entre los pesos no fuese considerable, se sabe que, si uno es, digamos, el doble del otro, no habría diferencia, o entonces habría una diferencia imperceptible (en los tiempos de caída)» (Cohen, 1967).

Se trata históricamente del primer relato de un experimento sobre la caída libre. Por estar en completo desacuerdo con el pensamiento reinante y los valores de su época, no mereció la atención de los estudiosos. Además, para los seguidores de Aristóteles, era mucho más difícil imaginarse un error de su maestro en relación con los aspectos esenciales de su Filosofía de la Naturaleza. Mucho menos probable aún sería su error en relación con las cosas simples como, por ejemplo, el de la relación de los tiempos de caída de objetos de pesos diferentes. La propia medición, para los aristotélicos, excepto en Astronomía, no tenía ningún significado. En esta área, es bueno subrayar que las medidas y los cálculos eran tareas de los astrónomos, y que a eso se deberían limitar. A los filósofos, y apenas a éstos, cabían las explicaciones físicas de los fenómenos encontrados, las cuales eran buscadas utilizando como parámetros los principios básicos de la Filosofía Natural aristotélica.

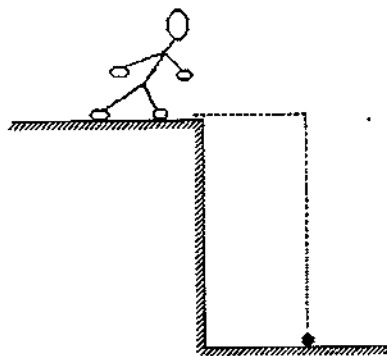
DE LA REPARICIÓN DE LA FUERZA IMPRESA EN EL SIGLO XI AL IMPETUS DE BURIDAN

La noción de *fuerza impresa* aparece nuevamente en el trabajo del filósofo árabe Avicena (980-1037). La fuerza que un proyectil adquiere al ser lanzado es para él una cualidad análoga al calor dado al agua por el fuego. Discordando de la fuerza autoextinguible de Filopón, considera que la fuerza impresa a un proyectil sólo puede ser «consumida» si el cuerpo se mueve a través de algún medio. Por ese motivo, concluye la inexistencia del vacío, porque un objeto que en éste se moviese mantendría inalterada la fuerza proyectora inicial, lo que resultaría en un inadmisibles movimiento perpetuo en línea recta.

Avicena explica el movimiento de un proyectil lanzado horizontalmente de la siguiente manera: inicialmente el proyectil se mueve en línea recta, en la dirección en que

fue lanzado, éste continúa su movimiento horizontal hasta que la fuerza (horizontal) que le fue impresa sea totalmente agotada. Cuando eso ocurre, el proyectil para, momentáneamente, y luego se mueve hacia abajo, bajo la acción de su «peso natural». La trayectoria del proyectil, de acuerdo con Avicena, es la de una *L* invertida (Fig. 3).

Figura 3
Trayectoria de un proyectil lanzado horizontalmente, según el concepto de Avicena.



Cupo, sin embargo, al árabe español Avempace (1106-1138) el mérito de la discusión y divulgación de la obra de Filopón. Al defender la ley $v \propto (F \cdot R)$, Avempace no está de acuerdo con el concepto aristotélico de que la resistencia es la causa de la sucesión temporal del movimiento de un cuerpo (enfaticado a través de la proporcionalidad inversa entre velocidad y resistencia de la dinámica aristotélica), admitiendo como posible y no instantáneo un movimiento sin resistencia. Para él, la velocidad de un cuerpo en el vacío es necesariamente finita porque, aun sin resistencia, el cuerpo tiene una distancia que recorrer, gastando por lo tanto un determinado tiempo para eso. Filopón citó el movimiento de los cuerpos celestes como ejemplo de movimiento sin resistencia con velocidad finita (Crombie, 1987).

El trabajo de Avempace, en realidad, nunca fue traducido al latín. Su gran circulación se debe a Averroes (1125-1198), célebre comentarista y defensor de las ideas de Aristóteles, que lo describió para, refutarlo. La «ley del movimiento» $v \propto (F \cdot R)$ es bastante señalada por Averroes, que considera el vacío como una abstracción inútil e igualmente desprovisto de sentido el automovimiento de un cuerpo vía fuerza impresa.

En un contexto predominantemente aristotélico, las ideas de Filopón y Avempace tuvieron importantes adeptos en el siglo XIII, entre los cuales hay que destacar a Santo Tomás de Aquino (1225-1274) y a Roger Bacon (1214-1294). Aquino, por ejemplo, rechazaba la existencia del vacío debido a las consecuencias inerciales del movimiento, pero admitía la tesis de un vacío hipotético. En este caso, concordaba con las consideraciones de Avempace sobre el límite de la velocidad de un cuerpo que no encuentra resistencia a su desplazamiento.

El concepto de *fuerza impresa autoextinguible* fue retomado en el inicio del siglo XIV por Francisco de Marchia. Marchia tuvo el cuidado de señalar que la fuerza cedida a una piedra por la mano de una persona o por una cuerda de arco no era permanente. «Era una cualidad accidental, extrínseca y violenta, que por ser opuesta a las inclinaciones naturales del cuerpo era tolerada solamente durante un tiempo». Decía que la fuerza motriz de un proyectil era una "forma" que no era completamente permanente, como el blancor o el calor del fuego, ni completamente transitoria, como el proceso de calentamiento o el de movimiento, sino algo intermedio que duraba un tiempo limitado (Crombie, 1987).

Según Franklin (1976), el trabajo de Marchia puede haber influenciado a Buridan en el desarrollo de su teoría del *ímpetus*. Evora (1988), sin embargo, menciona no haber encontrado ninguna referencia de Buridan a las tesis de Marchia. De todos modos, las tesis de Filopón acerca de la posibilidad del vacío sobre el movimiento en el vacío, y su oposición a la máxima aristotélica de que el aire es la causa y resistencia del movimiento de proyectiles eran bastante conocidas en el fin de la edad media (Evora, 1988).

Buridan (1300-1358) impone nuevos cuestionamientos a la dinámica aristotélica de los proyectiles. Él menciona el caso de un trompo que al girar no muda de posición para criticar la antiperistasis, ya que, según ésta, sólo es posible el movimiento de un cuerpo si lo que lo mueve penetra en su lugar (para impedir la formación del vacío).

En otro ejemplo, Buridan discute el caso de una embarcación que, habiendo recibido un impulso, continúa moviéndose contra la corriente de un río por algún tiempo después que el impulso cesa. Como el desplazamiento se da contra la corriente, la fuerza responsable del movimiento tendría que ser provista, según Aristóteles, por el aire. Sin embargo, dice Buridan que «un marinero sobre la cubierta no siente cualquier aire atrás de él empujándolo. Él siente solamente el aire del frente resistiéndole. Además, suponiendo que el navío mencionado estuviese cargado con granos o madera y un hombre estuviese situado atrás de esa carga, entonces, si el aire tiene un ímpetu tal, capaz de empujar el navío hacia adelante, el hombre sería empujado mucho más violentamente entre aquella carga y el aire atrás de ésta» (Buridan, cit. por Evora, 1988).

A partir de éstos y de otros casos, Buridan concluye que «nosotros podemos y debemos decir que, en una piedra o en otro proyectil, hay algo impreso que es la fuerza motriz (*virtus motiva*) de aquel proyectil. Y esto es evidentemente mejor que recurrir a la afirmación de que el aire continúa moviendo aquel proyectil. Pues el aire parece resistir más. Por lo tanto, en mi opinión, debe ser dicho que el motor, al mover un cuerpo móvil, imprime un cierto *ímpetus*, o una cierta fuerza motriz (*vis motiva*) al cuerpo móvil [en el cual actúa el *ímpetus*] en la dirección hacia donde el motor estaba moviendo el cuerpo móvil, hacia arriba o hacia abajo, lateralmente o circularmente. Cuanto más rápido el motor mueve aquel

cuerpo móvil, más fuerte será el *ímpetus* que éste le imprimirá. Es por ese *ímpetus* que la piedra es movida después que el lanzador para de moverla. Sin embargo ese *ímpetus* es continuamente reducido por la resistencia del aire y por la gravedad de la piedra, que la inclina en una dirección contraria a aquélla a la cual el *ímpetus* estaba naturalmente predispuesto a moverla. Así el movimiento de la piedra se torna continuamente más lento y, finalmente, ese *ímpetus* disminuye tanto que la gravedad de la piedra lo vence y mueve la piedra hacia abajo, a su lugar natural» (Buridan, cit. por Evora, 1988).

El *ímpetus* de Buridan:

a) Tiene una naturaleza permanente. Éste sólo puede ser disipado por influencias externas, como la de la acción de la gravedad (entendida como la tendencia de un proyectil en dirigirse a su lugar natural) y la de la resistencia de un medio. Por ese motivo, él no creía en la existencia del vacío, pues la permanencia del *ímpetus* llevaría a un movimiento perpetuo.

b) También se aplica a un movimiento circular. Así, cesada la causa del movimiento de una rueda (como la rueda de un molino, por ejemplo), ésta no para inmediatamente; continúa girando un poco más hasta ser totalmente consumido el *ímpetus* que ésta adquirió en contacto con el movedor. En el caso del movimiento de un trompo, la situación es análoga a la de la rueda.

c) Es proporcional a la cantidad de materia y a la velocidad de un objeto. Esta definición cuantitativa recuerda inmediatamente el concepto de *cantidad de movimiento* de la mecánica clásica. Se debe enfatizar, sin embargo, que «no está claro si Buridan considera el *ímpetus* como un efecto de movimiento, como se podría considerar el momento, o como una causa del movimiento, lo que lo haría similar a una fuerza. La definición cuantitativa (el *ímpetus* es una calidad permanente que es definido por el producto de la masa y velocidad) parece argumentar el primer punto de vista. El uso de Buridan del *ímpetus* para explicar el movimiento de proyectiles y su asociación del *ímpetus* con potencia motora parece favorecer el último punto de vista. Parece ser más plausible creer que el propio Buridan nunca estuvo totalmente convencido de esta distinción» (Franklin, 1976).

Mientras que el *ímpetus* de Buridan es permanente, sólo pudiendo ser disipado por influencias externas, para Nicolau Oresme (1325-1382), un estudiante de Buridan, el *ímpetus* cedido a un cuerpo es autoextinguible. La diferencia entre los dos conceptos permite a Oresme aceptar como físicamente posible el movimiento en el vacío que Buridan rechaza. Siendo el *ímpetus* autoextinguible, ningún movimiento puede resultar infinito, aunque se efectúe en el vacío.

Otro aspecto interesante de la teoría de Buridan es la utilización que hace de la noción de *ímpetus* para explicar el movimiento celeste: «Así se podría imaginar que es innecesario postular inteligencias como motores de los cuerpos celestes una vez que las Sagradas Escrituras

no nos informan de qué inteligencias deben ser postuladas, pues se podría decir que, cuando Dios creó la esfera de las estrellas, comenzó a mover cada una de ellas como quiso y ellas son movidas hasta ahora por el *ímpetus* que Él les dio, ya que no habiendo resistencia, el *ímpetus* ni corrompe ni disminuye» (Buridan, cit. por Kuhn, 1957).

Oresme comparte de este mismo punto de vista: «[...] cuando Dios creó [los cielos] les imprimió una cierta cualidad o fuerza de movimiento, así como Él imprimió a las cosas terrestres peso [...]; es exactamente lo mismo que un hombre que construye un reloj y lo deja andar por sí mismo. Así Dios dejó que los cielos se muevan continuamente [...] de acuerdo con el orden [por Él] establecido» (Oresme, cit. por Kuhn, 1957).

Es interesante observar que la asociación de *ímpetus* al movimiento celeste trae consigo un hecho totalmente nuevo —el de la utilización de un mismo concepto para explicar tantos eventos terrestres como celestes. Argumentos como éstos, aunque no necesariamente de una forma consciente e intencional, comienzan a apuntar hacia el rompimiento de la dicotomía aristotélica entre el mundo celestial y el mundo sublunar.

El *ímpetus* de Buridan, como se ve, tiene una innegable importancia histórica. Hasta Galileo, más tarde, se sintió atraído por la noción de *ímpetus* y la utilizó en sus estudios sobre el movimiento de los cuerpos.

GALILEO Y LA FUERZA IMPRESA EN EL MOVIMIENTO DE UN PROYECTIL

En sus primeros estudios, Galileo Galilei (1564-1642) comenzó a analizar los movimientos investigando sus causas, como le habían enseñado en la universidad. En *De motu* (*Del movimiento*), trabajo que desarrolló cuando era profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa, Galileo también consideraba necesario asociar una fuerza a un objeto en movimiento para mantener este movimiento. Él, sin embargo, criticaba a Aristóteles por el papel que éste atribuía al medio en sus explicaciones sobre el desplazamiento de un cuerpo sin contacto con su motor. Para explicar el movimiento de un proyectil después de haber cesado el contacto proyectil-proyector Galileo se adhirió a la idea de fuerza impresa.

Para Galileo, cuando un cuerpo pesado (una piedra, por ejemplo) es proyectado hacia arriba, se imprime a éste una cierta cualidad o virtud (fuerza, *ímpetus*). Por ese motivo, el cuerpo adquiere una especie de levedad, ya que, si se eleva, es propio de los cuerpos leves. Esa levedad es perdida por el cuerpo durante su descenso. En este sentido, él hace una analogía entre la disminución gradual de la fuerza impresa a un proyectil, a medida que se procesa el movimiento, y el calor de una barra de hierro que gradualmente disminuye después que la barra es retirada del fuego: «Ahora, de manera que se pueda explicar nuestro punto de vista, primero preguntemos lo que es esa fuerza motora, la cual es impresa por el

proyector sobre el proyectil. Nuestra respuesta es que hay una retirada de peso cuando el cuerpo es lanzado hacia arriba y una retirada de levedad cuando el cuerpo es lanzado hacia abajo. Pero, si una persona no se sorprende de que el fuego pueda privar al hierro del frío, introduciendo calor, ésta no se sorprenderá de que el proyectil puede, lanzado un cuerpo hacia arriba, despojarlo de peso y hacerlo leve. El cuerpo, entonces, es movido por el proyectil hacia arriba, cuando está en su mano, lo que lo despoja de su peso; de la misma manera, el hierro es movido, en un movimiento alternativo, en dirección al calentamiento mientras está en el fuego y es despojado del frío. Fuerza motora, es decir, la levedad es preservada en la piedra cuando el movedor no está más en contacto; el calor es preservado en el hierro después que el hierro es removido del fuego. La fuerza impresa gradualmente disminuye en el proyectil cuando éste no está más en contacto con el proyectil; el calor disminuye en el hierro cuando el fuego no está presente» (Galileo, cit. por Franklin, 1976).

En otras palabras, cuando un proyectil es lanzado verticalmente hacia arriba, éste sube porque la fuerza que le fue impresa es mayor que su peso natural. A medida que el proyectil continúa subiendo, esta fuerza va disminuyendo gradualmente hasta llegar a un punto de la trayectoria en que ésta no puede sobrepasar más la tendencia natural del proyectil. A partir de ahí se inicia su caída. Durante la misma, la fuerza impresa al proyectil continúa disminuyendo. Con eso, la tendencia natural del proyectil sobrepasa la fuerza impresa, lo que explica su aceleración. Cuando la fuerza impresa se anula, el proyectil se mueve con velocidad constante.

Así, para Galileo, un cuerpo que cae posee aceleración sólo al inicio de su descenso. El movimiento acelerado ocurre hasta que el cuerpo alcance velocidad propia. A partir de ese instante, y con esa velocidad, el cuerpo se mueve uniformemente. El propio Galileo, en su *De motu*, «destaca que, si dispusiésemos de una torre suficientemente alta, veríamos (lanzando pesos de lo alto de esa torre) el movimiento acelerado transformarse en movimiento uniforme» (Koyré, 1986).

Como se observa, los hechos arriba citados sugieren un vínculo entre la aceleración de un cuerpo que cae y la fuerza a él impresa en el momento en que es lanzado hacia arriba. En el caso de un objeto que se deja caer de cierta altura (de lo alto de una torre, por ejemplo), ¿cómo explica Galileo la variación de velocidad del cuerpo hasta que éste alcance su propia velocidad?

Para Galileo, cuando un cuerpo lanzado hacia arriba es detenido (por las manos de una persona por ejemplo), en el punto más alto de su trayectoria, donde la levedad y su peso natural son iguales, esta levedad es conservada (mantenida inalterada) por el cuerpo mientras éste permanece retenido en esta posición. «Incluso, ese cuerpo en lo alto de la torre ¿no experimenta, por parte de su soporte, una presión hacia arriba (que lo impide bajar) exactamente igual a su peso?» (Koyré, 1986). Soltándolo nuevamente, esta levedad continúa disminuyendo, como si no hubiese ninguna interrupción en su movi-

miento, hasta agotarse totalmente en un determinado punto de la trayectoria donde, de ahí en adelante, su velocidad queda constante. De este modo, cuando un cuerpo se deja caer de una cierta altura, éste retiene de alguna manera, una cierta cualidad o fuerza, proveniente del proyectil que, actuando contrariamente a la tendencia natural del cuerpo, hasta agotarse, explica su aceleración.

Como se ve, los argumentos presentados por Galileo sobre el movimiento vertical de un proyectil son análogos a los de Hiparco.

Al referirse a la causa del movimiento de un proyectil en el vacío, Galileo afirma que el movimiento del proyectil se debe a la acción de una fuerza a él impresa, que gradualmente se extingue con el tiempo, en los términos de Filopón, Marchia y Oresme.

LA CUESTIÓN DE MOVIMIENTO DE UN PROYECTIL EN UN NAVÍO EN MOVIMIENTO: ARISTÓTELES, BRUNO Y GALILEO

En la física aristotélica, un movimiento forzado o violento representa un trastorno en el orden natural de las cosas. El movimiento natural que se sigue a cualquier movimiento engendrado por la violencia representa un retorno a la situación de orden que debe existir en un universo jerárquicamente organizado, como el imaginado por Aristóteles. En este caso de un cuerpo de un lugar a su lugar está presente la idea de movimiento como un proceso de cambio, que afecta al cuerpo que se mueve y que sólo se extingue cuando cesa el motivo de su existencia. Así, un cuerpo vuelve a su lugar natural, después de haber sido retirado de allí con violencia, debido a una «tendencia», a un «deseo», en fin, a algo intrínseco que el cuerpo tiene de dirigirse hacia allí lo más rápido posible, y allí permanecer en su estado natural de reposo.

Es bajo esta perspectiva que se deben juzgar las conclusiones de Aristóteles sobre el movimiento de caída de un objeto en el interior de un navío en movimiento. Para Aristóteles, si se deja caer una piedra de lo alto de un mástil de un navío que se desplaza en aguas tranquilas, ésta caerá en un punto apartado de la base del mástil. Esto ocurre porque mientras el navío se mueve, la piedra cae verticalmente, ya que el movimiento natural de cualquier cuerpo se da siempre según una línea recta, por ser ésta la trayectoria que envuelve la menor distancia entre el punto donde se encuentra inicialmente el cuerpo y su lugar natural. De esta manera, el desplazamiento del navío no tiene ninguna influencia en el movimiento de retorno de la piedra a su lugar natural, es decir, como la piedra no comparte el movimiento horizontal del navío, ésta queda «hacia atrás». Así, la piedra solamente caerá en la base del mástil si el navío se encuentra en reposo.

La importancia de esa discusión para el debate posterior de Galileo con los aristotélicos es muy grande porque la situación presente en el barco en movimiento es análoga a la que se encontraría si la Tierra estuviese en movi-

miento. En caso de que la Tierra se moviese, argumentaban los aristotélicos, un cuerpo que cae quedaría hacia atrás, porque mientras durase su caída, aquel punto del suelo que estaba directamente debajo de la posición ocupada por el cuerpo inmediatamente antes que éste comience a caer, estaría apartándose de su lugar, ya que, por su contacto con la Tierra, se desplaza juntamente con ella.

La cuestión del navío y de la piedra es resuelta por Giordano Bruno (1543-1600) de una forma totalmente diferente. Para Bruno, el movimiento del navío tiene influencia en el movimiento de una piedra que se deja caer de su interior. Para mostrar eso él hace uso de la física de la fuerza impresa al discutir una experiencia de pensamiento abarcando la caída de dos piedras que se dejan caer simultáneamente de una misma altura, una de ellas por una persona situada dentro de un navío en movimiento (uniforme) y la otra por una persona fuera del navío. Según sus propias palabras: «Imagínense dos hombres: uno en el navío que está andando y el otro fuera de éste, que uno y otro tengan la mano en el mismo punto del aire y que de ese mismo lugar, al mismo tiempo, uno deje caer una piedra, y el otro, otra, sin darles impulso alguno. La piedra del primero, sin perder un punto y sin desviarse de su línea (vertical), irá hacia el lugar fijado anticipadamente; y la del segundo será transportada hacia delante, lo que proviene solamente del hecho de que la piedra que parte de la mano de aquél que es llevado por el navío y que, por consiguiente, se mueve según el movimiento de éste, posee una cierta virtud impresa que la otra no posee, la que viene de la mano de aquél que está fuera del navío; y esto aunque las (dos) piedras tengan la misma gravedad y que, ya que ellas partieron —tanto como esto sea posible— del mismo punto y sufrieron el mismo impulso, tengan que atravesar el mismo aire. De esta diversidad no podemos dar ninguna razón a no ser que las cosas que están ligadas al navío por un vínculo o por una tal presencia, se mueven con él; y que una de las piedras, la que se mueve con el navío, lleve consigo la virtud del motor, mientras la otra no tenga ahí participación» (Koyré, 1986).

La noción de sistema físico se delinea claramente en los argumentos de Bruno que continúa: «Si alguien que se encuentra en el margen lanza una piedra directamente al navío, fallará su blanco, y éste en la proporción de la velocidad del navío. Pero alguien que esté colocado en el mástil de este navío, y corra éste tan deprisa como se quiera, su lanzamiento no será desviado un punto siquiera, de tal manera que la piedra, o cualquier otra cosa grave (pesada), lanzada del mástil hacia un punto situado al pie de dicho mástil o hacia cualquier otra parte de la bodega o del cuerpo del navío, irá en línea recta. De la misma manera, si alguien que se encuentra en el navío lanza en línea recta (vertical) una piedra hacia arriba del mástil o hacia el cesto de observación, esa piedra volverá hacia abajo por la misma línea, muévase el navío de la manera que se mueva, siempre que éste no sufra oscilaciones» (Koyré, 1986).

De la misma forma que los aristotélicos se valen de los acontecimientos que tienen lugar en el navío en movi-

miento para argumentar en favor de la inmovilidad de la Tierra, Bruno los utiliza, de una forma diferente, para refutar esa inmovilidad. Y la noción de *sistema físico* que él introduce, que trae consigo un vínculo entre los cuerpos de un sistema, incluso en la ausencia de contacto entre ellos, es decisiva en su argumento. Así, cuando un cuerpo cae sobre la Tierra, ésta, en movimiento, no lo deja hacia atrás como imaginaban los aristotélicos porque, como Bruno enfatiza, todos los cuerpos en la Tierra participan de su movimiento, ya que, juntamente con ella, forman parte de un mismo sistema físico. La situación presente en la Tierra es análoga a la encontrada en el navío en movimiento. En el argumento de Bruno se puede percibir la importancia del papel desempeñado por la fuerza impresa. Sin esta «cualidad», esta «virtud que mueve», Bruno no podría sostener la noción de *sistema físico*.

Galileo, por otro lado, percibió que la llave para la comprensión de la caída libre y del movimiento plano de un proyectil tenía como preliminar el abandono de la costumbre secular, seguida por los filósofos, de comenzar cualquier discusión sobre el movimiento de los cuerpos indagando sobre sus causas. La cinemática de la piedra que se deja caer de lo alto del mástil de un navío en movimiento tiene entonces para Galileo la siguiente explicación:

Cuando la piedra se deja caer, queda sujeta a la acción simultánea de dos movimientos: uno horizontal, con velocidad constante, y otro vertical, con aceleración constante. El movimiento horizontal de la piedra puede ser entendido observándose el hecho de que, antes que la piedra se haya dejado caer, ésta se encontraba en reposo con relación al navío y, por lo tanto, desplazándose con relación al agua con la misma velocidad de la embarcación. Al dejar la mano del lanzador, la piedra conserva su movimiento horizontal con relación al agua porque, en esta dirección, no existe nada (despreciándose la resistencia del aire) que haga alterar su estado de movimiento uniforme. Así como, en la dirección vertical, la piedra queda sujeta a la acción de la gravedad y, en la dirección horizontal, la velocidad relativa de la piedra y del navío es nula, la piedra choca contra el navío en un punto directamente abajo de aquél en que se dejó caer.

IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA

La presentación de la visión inercial de movimiento, en la mayor parte de los materiales curriculares, sigue una lógica común que puede ser resumida en la secuencia:

1. Una fuerza es un «estirón» o un «empujón». Esto está basado en la asociación intuitiva entre la fuerza y el esfuerzo muscular.
2. Un cuerpo en reposo permanece en reposo si no existe una fuerza resultante actuando sobre él. Una propuesta correcta, basada en el sentido común.

3. Cuerpos en movimiento sufren, generalmente, la acción de fuerzas de fricción.

4. Un cuerpo en movimiento pararía si la fuerza resultante sobre éste fuese una fuerza de fricción.

Por lo tanto:

5. Un cuerpo en movimiento continuará en movimiento en ausencia de una fuerza resultante, incluidas las fuerzas de fricción en este cómputo.

6. El efecto de una fuerza resultante es alterar la velocidad o la dirección del movimiento de un cuerpo.

La presuposición implícita en esta lógica de explicación es la de que, una vez conscientes del efecto de las fuerzas de fricción, los alumnos aceptarán fácilmente una visión inercial de movimiento. Siguiendo una costumbre ya consagrada por el uso, profesores y libros de texto inician el estudio de las leyes de Newton enfatizando la idea de que Galileo llegó al principio de la inercia al desconsiderar el efecto de fuerzas resistentes sobre el movimiento de los cuerpos. 'Pucks', mesas y carriles de aire son utilizados en laboratorios en el intento de propiciar evidencias experimentales de este principio, pero, como muestran los estudios sobre los conceptos alternativos en mecánica, los conceptos no inerciales de los estudiantes permanecen prácticamente inalterados frente a la enseñanza.

Una atención mayor al desarrollo histórico de las ideas con respecto a la relación entre fuerza y movimiento, como en parte se vio en este trabajo, muestra que la transición para una visión inercial de movimiento transcende a la «simple» comprensión del papel desempeñado por la fricción en el movimiento de los cuerpos, visto que tanto los aristotélicos como los que propusieron la fuerza impresa eran conscientes de la existencia de la fricción.

Más que el reconocimiento del efecto resistente de las fuerzas de fricción, la formulación de una visión inercial de movimiento abarcó un cambio en la ontología del movimiento (Koyré, 1986). Al movimiento uniforme se le da el mismo «status» ontológico que al reposo: ambos pasan a ser considerados como estados que tienden a conservarse y que, por lo tanto, no necesitan ser explicados. Dentro de esta visión solamente cambios en estos estados necesitan una explicación; de ahí la introducción del concepto moderno de *fuerza*.

El problema con la lógica subyacente a la presentación tradicional de la fricción es que ésta «coloca la carroza delante de los bueyes». La explicación de que los cuerpos tienden a parar debido a la fricción tiene sentido en un cuadro conceptual ya inercial. Para la mayoría de los alumnos, que intuitivamente adoptan la noción de *fuerza impresa*, la cuestión de la fricción puede no ser realmente un problema, y simplemente eliminarla no lleva necesariamente a un cambio de perspectiva. Utilizando una terminología «bachelardiana» podemos decir que el obstáculo epistemológico más relevante en el caso no es la

falta de conciencia del papel desempeñado por la fricción, sino el concepto alternativo de la existencia de una fuerza impresa por el lanzador e incorporada en un proyectil.

Dentro de esta perspectiva es de lamentar que, a pesar de la importancia histórica del concepto de *fuerza impresa* en el desarrollo de la mecánica, desde su formulación por Hiparco hasta su superación por Galileo, esta noción sea prácticamente ignorada en el tratamiento dado a la mecánica en los materiales curriculares (Gilbert y Zylbersztajn, 1985; Peduzzi, 1992). Es común que esta parte de la física sea presentada como si se hubiese iniciado con Galileo. Cuando Aristóteles es mencionado, se trata de una visión estereotipada, con el propósito de establecer un trampolín para hacer posible el salto de dos mil años hasta Galileo. De todos modos, llama la atención el vacío histórico que se establece con la exclusión de referencias a las discusiones que ocurrieron durante el periodo medieval. Y

esto a pesar de la relevancia de que estas discusiones ya hayan sido reconocidas por historiadores de la ciencia hace un siglo, a partir de los trabajos pioneros de Pierre Duhem.

Se trata de una omisión doblemente dañina. En primer lugar porque lleva a una falsa imagen de la historia de la mecánica, al sugerir un «salto cuántico» entre Aristóteles y Galileo. Pero también, y principalmente, porque imposibilita 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. La incorporación de esta historia a 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 el curso de la historia, colaborando así a reconstituir sus conceptos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURIDAN, J. (1988). *Questiones super Octo Physicorum Libros Aristotelis*. Livro VIII, 12, párrafo 2. Traducción de Clagett, M. *The science of mechanics in the middle age*. (Madison, Wis.: University of Wisconsin Press, 1959), p. 534. Cit. por Evora.
- BURIDAN, J. (1957). *Questiones super Octo Physicorum Libros Aristotelis*. Livro VIII, 12. Traducido por Clagett, M. *Selections in medieval science*, p. 40. Cit. por Kuhn.
- COHEN, I.B. (1967). *O nascimento de uma nova física*. São Paulo: Livraria Editora.
- CROMBIE, A.C. (1987). *História de la ciência: de San Agustín a Galileu. Siglos XIII- XVII*. Madrid: Alianza Editorial.
- DRIVER, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4(1), pp. 3-15.
- EVORA, F.R.R. (1988). *A revolução copernicana-galileana*. Campinas, UNICAMP, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, v. 1.
- FRANKLIN, A. (1976). Principle of inertia in the middle ages. *Am. J. Phys.*, 44(6), pp. 529-545.
- GALILEU, G. (1976). *De motu*. Traducción de Drabkin, I.E. Universidade de Wisconsin, Madison, 1960. Cit. por Franklin.
- GILBERT, J. K. y ZYLBERSZTAJN, A. (1985). A conceptual framework for science education: the case study of force and movement. *Eur. J. Sci. Educ.*, 7(2), pp. 107-120.
- KOYRÉ, A. (1986). *Estudos galilaicos*. Lisboa: Publicações Dom Quixote.
- KUHN, T.S. (1957). *The Copernican revolution*. Cambridge: Harvard University Press.
- ORESME, N. (1957). *Le livre du ciel et du monde*. Org. Menuet, A.D. y Denomy, A.J. en *Medieval Studies*, III-V (Toronto: Pontifical Institute of Medieval Studies, 1941-1943) IV, p. 243. Cit. por Kuhn.
- PEDUZZI, L.O.Q. (1994). Física aristotélica: por que não considerá-la no ensino da mecânica? Trabajo presentado en la Conferencia Internacional «Science and Mathematics Education for the 21 st. Century: Towards innovatory approaches». Concepción, Chile, 26 de setiembre a 1 de octubre.
- PEDUZZI, L.O.Q. (1992). Força e movimento na ciencia curricular. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, 14(2), pp. 87-93.
- PHILOPONUS, I. (1988). *Commentary on Aristotle's physics*. pp. 639.3-642.9 (Vitelli). En Cohen, M.R y Drabkin, I.E. *A source book in Greek science*, pp. 221-222. Cit. por Evora.
- SEBASTIA, J.M. (1984). Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes. *Enseñanza de las Ciencias*, 2(3), pp. 161-169.
- ZYLBERSZTAJN, A. (1983). Concepções espontâneas em física: exemplo em dinâmica e implicações para o ensino. *Rev. Ens. Fis.*, 5(2), pp. 3-16.

[Artículo recibido en enero de 1996 y aceptado en mayo de 1997.]

