

Desarrollo histórico del concepto de fuerza y su implicación en la educación

“Fomento a la Investigación Educativa”

César Mora¹; Yolanda Benítez^{1,2}
¹CICATA Legaria, IPN; ²FES-Cuautitlán UNAM

¹Av. Legaria No. 694 Col. Irrigación. Delegación Miguel Hidalgo. CP 11500. México, D. F. Tel. 5729-6000 Ext. 67702. Fax 5557-5103. cmoral@ipn.mx.

Resumen

Presentamos un desarrollo histórico del concepto de fuerza, mediante las aportaciones generadas por diferentes personajes claves en la historia de la física, y también cómo se estructuran diferentes niveles cognoscitivos en los alumnos de ingeniería en cursos de mecánica clásica. A lo largo de la historia se han construido modelos erróneos sobre la fuerza. Para entender este concepto y saber si los estudiantes lo han asimilado correctamente, es importante evitar distractores que comúnmente se presentan en la enseñanza y que provocan percepciones equivocadas, tales como muestran los inventarios del concepto de fuerza (ICF). Asimismo, se examinan diversas definiciones de fuerza, sus representaciones o modelos y una estrategia a seguir para lograr la evolución del conocimiento en una perspectiva constructivista.

Palabras Claves: Didáctica de la Física, Epistemología de la Física, Obstáculos epistemológicos, Constructivismo, Inventores de conceptos de fuerza (ICF).

I. Introducción

Diversos autores han mostrado cómo el concepto de fuerza puede contribuir a asimilar los contenidos de la mecánica (Sanjay, 2004). El estudio de los errores del concepto va aparejado al de las concepciones alternativas que llevan a cometerlos. Dichas concepciones no constituyen unas cuantas ideas dispersas sino que se hallan integradas en la mente formando verdaderos esquemas conceptuales, dotados de una cierta coherencia interna. Estos esquemas no son vistos como errores o como algo negativo, sino como estructuras cognitivas que interaccionan con la información que llega desde el exterior y que juegan un papel esencial en el aprendizaje (Driver, 1986). Por otro, es interesante hacer un paralelismo entre las ideas históricas y las de los alumnos (Solano, 2000), pues ello puede arrojar luz sobre diversos obstáculos epistemológicos en el aprendizaje de la mecánica clásica. El salto de la física aristotélica a la física newtoniana, no es un salto cuántico e involucra grandemente la Física de la Fuerza Impresa (FFI) (Peduzzi, 1997). También, es de sumo interés en nuestra investigación considerar las ideas previas del concepto de fuerza en los alumnos mediante el análisis de pruebas de Inventarios del Concepto de Fuerza (ICF). En este trabajo pues, presentamos los primeros resultados de nuestra investigación bibliográfica del desarrollo del concepto de fuerza, los diferentes niveles de clasificación epistemológica y, los estudios efectuados acerca de los inventarios del concepto de fuerza (ICF) y su relación con el concepto de movimiento y energía.

II. Evolución del concepto de fuerza

Aristóteles fue el creador del término de “antiperístasis” que es el fenómeno en virtud del cual, la calidad de un elemento crece en intensidad, aunque no en extensión, cuando está enteramente cercada por un medio en que domina la calidad contraria. El término se utilizó para justificar el movimiento de proyectiles, dicha concepción reinó por siglos, incluso



Leonardo Da Vinci no tenía una percepción adecuada para describir la fuerza, a la vez que la hacía notar como parte integrante del movimiento, al respecto dice: "*La pesantez, la fuerza, al igual que la percusión deben considerarse tan generadoras del movimiento como engendradas por él*" (Codex Arundel 184v.) Tuesdell (1979, p35) señala también que "*La fuerza es la causa del movimiento, el movimiento es la causa de la fuerza*" (Codex Arundel 34v).

Entre los primeros modelos matemáticos del concepto de fuerza, tenemos la aproximación de Kepler, que considera la virtud (virtus), a la que se deben los movimientos gravitacionales, como sujeta a todas las "necesidades matemáticas" (Astronomia nova, III, p. 241) y negó que pudiera ser identificada con el alma (Mysterium Cosmographicum, 1621, en Opera, ed. Frisch, I, p. 176). Pero la noción fue exactamente definida al establecerse con toda exactitud el principio fundamental de la física con Descartes. Galileo utilizó frecuentemente la noción (por ejemplo, en los Disc. Sobre el Nacimiento de Dos Nuevas Ciencias, en Op. VIII, pp. 155, 344, 345, 442, 447, etc.), pero no la define porque no define tampoco la noción de inercia que también utiliza. En relación directa con esta última, la fuerza es definida por Descartes, quien dice: "la *fuerza* con la que un cuerpo obra contra otro cuerpo o resiste su acción, consiste solo en que toda cosa persiste mientras pueda en el mismo estado en que se halla, de acuerdo a la primera ley expuesta [o sea con la ley de inercia]. De tal manera un cuerpo unido a otro cuerpo posee una fuerza que impide sea separado y cuando es separado hay una fuerza que se una; así, cuando se halla en reposo, tiene una fuerza para permanecer en reposo y para resistir a lo que podría hacerlo cambiar; y así, si se mueve, tiene una fuerza para continuar moviéndose con la misma velocidad y hacia el mismo lado" (Princ. Phil., II, 43). Pero fue Newton el que generalizó la noción de fuerza, dándole una expresión matemática precisa. El segundo principio de la dinámica newtoniana, o sea la proporcionalidad entre la fuerza y la aceleración impresa ($fuerza = m a$), hace de la fuerza una relación entre dos magnitudes, que no tiene referencia alguna a las esencias o cualidades escondidas, cuya inutilidad para la física afirmaba el propio Newton. "Pretendo declarar solamente una noción matemática de las Fuerzas, sin considerar sus causas o sus sedes físicas" (Philosophiae naturalis principia mathematica, 1760, p. 5). La generalización newtoniana permitía hablar de fuerza de gravedad, como de fuerza eléctrica o fuerza magnética y de tal manera, en la segunda mitad del siglo XVIII, el concepto de fuerza resultó uno de los más populares y difundidos. Pero al mismo tiempo suscitó la desconfianza de los científicos, que a menudo rehuían ver en él algo más que la simple relación causal. D'Alembert observó que si no se considera la relación entre causa y efecto como de naturaleza lógica, sino fundada solo en la experiencia, la fuerza a distancia (o sea, la gravedad) no representa un enigma mayor que el de la transmisión del movimiento mediante el choque y, en efecto, no hace más que expresar, lo mismo que esta última, una relación atestiguada por la experiencia (Elements de phil., 1759, § 17). Por los mismos motivos, Maupertuis quería que el concepto de fuerza como "causa de la aceleración" fuera eliminado de la mecánica y sustituido por las simples determinaciones de la medida de la aceleración (Examen philosophique de la preuve de l'existence de Dieu, 1756, II, § 23, 26). Kant no hizo más que expresar el mismo concepto al decir que la fuerza no es más que la relación de la sustancia *A* alguna otra cosa *B*", y que tal relación solo puede ser dada por la experiencia (De mundi sensibilis e intelligibilis forma et principiis, § 28), o que la fuerza no es más que "la causalidad de la sustancia" o sea "la relación del sujeto de la causalidad con el efecto" (Crít. R. Pura, Anal. de los Principios, cap. II, sec. III, Segunda analogía de la experiencia). Desde este punto de vista, la interpretación de la fuerza como un agente causal misterioso e inaccesible, tal como se encuentra por ejemplo, en Spencer (First Principles, § 26) cae por entero fuera de la ciencia.

La noción de fuerza en su específico significado galileano o newtoniano, no realizó una tarea predominante y a largo plazo en la ciencia. Ya Leibniz había descubierto y aclarado el concepto de fuerza viva, que es el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad,



concepto que constituye el punto de partida de la moderna noción de energía (Mathematische Schriften ["opusculos matematicos"], ed. Gerhardt, VI, pp. 218 ss). Su doctrina acerca de la superioridad de la fuerza sobre la materia, que resulta término medio para la resolución de la materia misma en la energía espiritual está fundada precisamente en este concepto de energía. Pero en el siglo siguiente, el descubrimiento de la conservación de la energía (1842) debido a Robert Mayer y la obra de Helmholtz y de Hertz, condujeron a la formulación de lo que se denominara el energetismo de la mecánica (Poincaré, La science et l'hypothese, p. 148). El energetismo niega que la fuerza sea "causa" del movimiento y que, por lo tanto, esté presente antes que el movimiento, y considera la idea de la energía anterior a la de fuerza. Esta última se introduce a través de una simple definición y sus propiedades se deducen de la definición y de las leyes fundamentales. Por lo tanto, en el energetismo la idea de fuerza no implica ya dificultad alguna: es un simple concepto convencional. En la misma línea se hallan los Principios de mecánica (1894) de Hertz, que sólo consideran como fundamentales las ideas de tiempo, espacio y masa, considerando como derivadas no solo las ideas de fuerza sino también las de energía. El concepto de energía conservaba, sin embargo, su importancia en la física, sobre todo con referencia al concepto de campo, mientras el concepto de fuerza seguía siendo el que había mostrado el energetismo: un nombre para definir determinadas relaciones entre algunas magnitudes físicas. A este propósito ha señalado Russell que: "Se supone que la fuerza sea causa de aceleración. Pero la aceleración es una simple ficción matemática, un número y no un hecho físico. Por lo tanto, si una fuerza es causa, de un efecto que no se produce" (Principles of Mathematics, 1903, p. 474).

III. Análisis de resultados

Con base al desarrollo histórico antes mencionado podemos plantear cinco niveles de evolución de las ideas sobre fuerza y movimiento, estas concepciones son la: 1) **Aristotélica**. El reposo es el estado natural de los cuerpos. La fuerza del aire [antiperístasis] mantiene el movimiento por algún tiempo después del lanzamiento. La gravedad y el rozamiento hacen que los cuerpos finalmente paren. 2) **Medieval Inicial**. La fuerza impresa, que mantiene el movimiento, disminuye naturalmente. 3) **Medieval Mixta**. La fuerza impresa se disminuye por la acción del rozamiento. 4) **Medieval Pre-Inercial**. La fuerza impresa y el rozamiento actúan, y 5) **Inercial**. Los cuerpos no necesitan de fuerza para mantenerse en movimiento. Ellos paran porque una fuerza contraria actúa.

Ahora, la estrategia a seguir es investigar la frecuencia inicial de las concepciones de los alumnos en fuerza y movimiento; esto, constituye la siguiente fase del presente trabajo. Se propone hacer una exploración conceptual a través del siguiente cuestionario (Harres, 2005):

Actividad 1 Ideas iniciales sobre fuerza y movimiento.

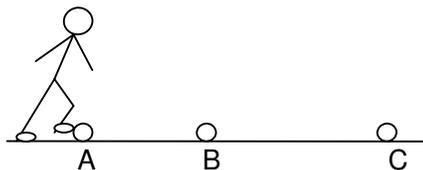
- i) ¿Qué es lo que sucede cuando se dice que un cuerpo está en movimiento?
- ii) ¿Qué es necesario para poner a un cuerpo en movimiento?
- iii) ¿Qué es necesario para mantener en movimiento a un cuerpo?
- iv) Estando en movimiento los cuerpos, en general, ¿tienden a parar o a mantenerse en movimiento?
- v) ¿Cómo explicas el hecho de que una pelota de fútbol lanzada mantiene su movimiento a pesar de no haber más contacto con el pie del jugador?

Los alumnos deben tratar de llegar a un consenso entre sus compañeros, pero cuidando de no imponer por parte del profesor, una idea única al grupo y también sin eliminar ideas divergentes, en esta parte se aplicarán otros instrumentos para conocer el grado de "deformación conceptual", esto es, las concepciones erróneas. Finalmente, se presentará al grupo diversas lecturas y análisis sobre la antiperístasis de Aristóteles, así los alumnos



podrán hacer una autoevaluación del nivel en que se encuentran sus ideas sobre fuerza y movimiento. La segunda actividad a realizar, es sobre la evolución de la noción de fuerza.

Actividad 2. Una persona patea con gran velocidad una pelota de fútbol en una superficie horizontal con mucho rozamiento, según se muestra en la figura de abajo. Los puntos A, B y C indican el recorrido de la pelota después de haber sido lanzada. En el punto C la pelota finalmente está en reposo.



i) Identifique o dibuje la(s) fuerza(s) que actúa(n) sobre la pelota en cada uno de los tres puntos según la interpretación de Aristóteles.

ii) Identifique o dibuje nuevamente la(s) fuerza(s) según su interpretación.

La primera pregunta nos permitirá determinar hasta qué punto los alumnos han comprendido la concepción aristotélica, y se espera puedan proponer alternativas. La segunda pregunta se analizará en la perspectiva epistemológica evolutiva del conocimiento científico (Toulmin, 1977) y una concepción constructivista del aprendizaje, procediendo a contrastar el desarrollo histórico de la dinámica con una posible evolución de las ideas de los alumnos.

IV. Conclusiones

El realizar investigación educativa en la física desde una perspectiva histórica es una aproximación interesante, ya que una vez conocida la situación inicial de las ideas de los alumnos, se puede proceder a realizar una serie de actividades específicas con el objetivo de lograr la evolución conceptual, esto a la manera de técnicas de aprendizaje activo de la física, o tutoriales de dinámica y cinemática. Durante la realización de las actividades, la discusión se dirige siempre hacia el punto principal, de si los cuerpos tienen la tendencia de mantenerse en movimiento o de pararse. Por otro lado, en la actualidad el concepto de fuerza se presenta en los libros de texto como una magnitud directamente proporcional a la aceleración según la segunda ley de Newton $\vec{F} = m\vec{a}$. Podemos preguntarnos acerca de cuál es el significado físico de la constante de proporcionalidad m , pidiendo a los alumnos que consideren cuál es el significado de una m grande o pequeña. Es importante el evitar los distractores que se presentan en la enseñanza y que provocan percepciones equivocadas de concepto, además de evitar la introducción arbitraria del concepto. Por el contrario; conviene siempre que sea posible, tratar de hacer ver su necesidad, mediante el planteamiento de actividades problemáticas de interés en donde los conceptos vayan a ser utilizados. Finalmente, mediante los inventarios del concepto de fuerza (FCI) se pueden diagnosticar conceptos científicos fundamentales, que nos permitirán plantear un modelo de enseñanza y aprendizaje de las ciencias basado en el cambio conceptual y metodológico. Profundizar y avanzar en el estudio de concepciones alternativas. No debe olvidarse que las ideas presentes en la física "del sentido común" estuvieron vigentes durante siglos y sólo pudieron ser superadas cuando se produjo un cambio metodológico que introdujo una forma de pensamiento cada vez más creativa y rigurosa. Una metodología que obligaba a imaginar nuevas posibilidades a título de hipótesis (poniendo en cuestión lo que se daba por obvio), a someter estas hipótesis a su contrastación empírica en condiciones controladas, a analizar cuidadosamente los resultados, etc.; es decir, cuando comenzó a aplicarse una forma de trabajo que hoy calificaríamos como metodología científica.



V. Referencias

1. Bao L. Redish Edward F. (2001). *Concentration analysis: A quantitative assessment of student states*. Phys. Educ. Res. Am. J. Phys Suppl. **69** (7).
2. Coletta, V. P. and Philips J. A. (2005). *Interpreting FCI scores: Normalized gain, preinstruction scores, and scientific reasoning ability*. Am. J. Phys. **73** (12).
3. Driver, R. (1986). *Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos*. Enseñanza de las Ciencias, **4**(1), pp. 3-15.
4. Harres, J. B. S., (2005). *La física de la fuerza impresa como referente para la evolución de las ideas de los alumnos*. Enseñanza de las Ciencias, Número Extra. VII Congreso, pp. 1-5.
5. Peduzzi, L. y Zylberstajn, A. (1997). *La física de la fuerza impresa y sus implicaciones para la enseñanza de la mecánica*. Enseñanza de las Ciencias, **(15)** 3, pp. 351-359.
6. Sanjay Rebelo, N. (2004). The effect of distracters on student performance on the force concept inventory. Am. J. Phys. **72** (1).
7. Solano, I.; Jiménez, E.; Marín, E. (2000). *Análisis de la metodología utilizada en la búsqueda de “lo que el alumno no sabe” sobre fuerza*. Enseñanza de las Ciencias, **(18)** 2, pp. 309-328.
8. Toulmin, S. (1977). *La comprensión humana. Vol. 1: El uso colectivo y la evolución de los conceptos*, Alianza, Madrid.
9. Truesdell, C. (1979). *Ensayos de historia de la mecánica*. E. Tecnos, Madrid, p. 35.



Eje temático: Didáctica Disciplinar (Didáctica de la Física).

Modalidad de presentación: Oral.

Desarrollo histórico del concepto de fuerza y su implicación en la educación

Dr. César Mora
CICATA IPN

Resumen Curricular:

Licenciado en Física (U de G, 1991),
Licenciado en Enseñanza de las Matemáticas (U de G 1990),
Licenciado en Filosofía (UNAM, 2006),
Especialista en Enseñanza de la Física Superior (U de G, 1987),
Maestro en Ciencias (especialidad física) (CINVESTAV, 1994),
Doctor en Ciencias (especialidad física) (UAM-I, 2001)

Profesor de física y matemáticas (UAM-A, 1990-1993), (UPIBI-IPN, 1994-2005),

Profesor-investigador de los posgrados en Tecnología Avanzada, Matemática Educativa y Física Educativa (CICATA Legaria 2005 a la fecha)

Actualmente es Subdirector Académico del CICATA Legaria, y Coordinador del Posgrado en Física Educativa.

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I.

M. I. Yolanda Benítez
FES-Cuautitlán UNAM
Resumen Curricular

