

## LA MECÁNICA Y SU ESENCIALIDAD EN RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE APRENDIZAJE DE FÍSICA I

### The mechanics and its essentiality in relation to the content of learning of physics I

#### RESUMEN

Se enfatiza sobre, cómo desde el punto de vista histórico, la mecánica clásica se consolidó alrededor de los principios de conservación del momentum. Para ello se abordan los diferentes momentos en el desarrollo de esta ciencia tomando como base documentos de diferentes historiadores. Esta concepción permite estructurar el contenido del programa de la llamada física I alrededor de principios fundamentales y universales de la física.

**PALABRAS CLAVES:**, conservación, energía, estructura, mecánica clásica, momentum, principios, programa

#### ABSTRACT

It is emphasized on, how from the historical classic mechanics, point of view in terms of the principles of conservation of the momentum and the energy. For it the different moments in the development are approached from science taking as it bases documents of different historians. This conception allows to structure the program of physical I around fundamental and universal principles of physics.

**KEYWORDS:** classical mechanics, conservation, energy, momentum, principles, program, structure,.

#### RAMIRO RAMÍREZ RAMÍREZ

Licenciado en Física, M.Sc.

Profesor Asociado

Universidad Tecnológica de Pereira

Colombia

[rramirez@utp.edu.co](mailto:rramirez@utp.edu.co)

#### JORGE FIALLO RODRIGUEZ

Físico, Ph.D.

Profesor Titular

Instituto Pedagógico

Latinoamericano y Caribeño

Cuba

[fiallo47@yahoo.com.mx](mailto:fiallo47@yahoo.com.mx)

#### GUILLERMO BERNAZA RODRIGUEZ

Físico, Ph.D.

Profesor Titular

Ministerio de Educación Superior

Cuba

[bernaza@reduniv.edu.cu](mailto:bernaza@reduniv.edu.cu)

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante toda la edad media, las ideas recogidas por Ptolomeo, fundamentadas en la concepción geocéntrica del universo, la geometría euclidiana y la física aristotélica (Kuhn 1978), fue progresivamente reemplazada durante el renacimiento por la teoría heliocéntrica. En esa época, la física, fuertemente influenciada por la iglesia católica, trataba de conciliar entre la razón y la fe. Fruto de este período aparece la cinemática medieval dentro de la cual se establecieron las características de los movimientos uniformemente acelerados y su descripción matemática

La dinámica del medioevo todavía muy influenciada por las ideas de Aristóteles, tuvo que esperar más tiempo para ser establecida en la forma como se conoce hoy. Sin embargo, ya en la misma época, apareció, gracias a la escolástica de entonces, la idea de ímpetus la cual establecía:

“cuanto mayor es la cantidad de materia, en la misma medida puede recibir el cuerpo un mayor ímpetu y de una manera más intensa” y “en la misma medida en que el impulsor mueve el cuerpo en movimiento más rápidamente le proporcionará un mayor ímpetu” (Truesdell 1968).

A partir de esa época hubo que esperar hasta el siglo XVII a que se sintetizaran todas las ideas científicas desarrolladas en dicho período.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 El papel visionario de Newton

La mecánica newtoniana constituye una muestra del uso de la razón en la tarea de hacer ciencia. Al igual que descartes, la física de Newton también se enmarca dentro de la revelación teológica pero partiendo de los fenómenos para luego remontarse a ella. Newton fue quien formuló definitivamente la estructura del universo copernicano. Para ello integró aportes de dos corrientes que conducían a la nueva descripción cosmológica: la copérnico-copercular, basada en copérnico pero todavía influenciada por el aristotelismo, que abogaba por una causa natural para el movimiento planetario. La otra también basada en copérnico, pero edificada a partir de los elementos nuevos del copernicanismo que fueron desarrollados con mayor independencia de teorías antiguas por hombres como Kepler y Bruno; esta perspectiva introducía la necesidad de una fuerza que explicara el cambio de velocidad, de dirección y de

curvatura en cada punto de la órbita descrita por el planeta.

Kepler ya había propuesto su teoría del “anima motrix”; una especie de presión de radiación que ejercía el sol sobre los planetas. La fuerza derivada de allí, según él, causaba un movimiento circular del planeta alrededor del sol. La trayectoria terminaba convirtiéndose en una elipse por el efecto de una fuerza magnética originada en el sol y los demás planetas. Esta dinámica kepleriana fue rápidamente olvidada en el mismo siglo XVII. De todas maneras la introducción del concepto de fuerza para explicar el movimiento planetario fue otro aporte importante a la física de ese siglo.

Uno de los precursores de Newton posteriores a Kepler, Giovanni Alfonso Borelli, haciendo uso de la idea de inercia reconoció que, mientras no actuara alguna fuerza sobre los planetas, éstos se moverían según una línea tangente a su órbita. Borelli no pudo explicar correctamente que era lo que mantenía a los planetas en sus órbitas dándole estabilidad al sistema solar.

Robert Hooke intentó resolver el problema argumentando que el planeta no seguía moviéndose indefinidamente a través del espacio debido a la existencia de una fuerza de tipo atractivo entre el sol y los planetas. Hooke explicó detalladamente, auxiliándose de un péndulo cónico, el movimiento de un planeta en términos de la ley de inercia y la acción de una fuerza central; sin embargo, Hooke no supo relacionar cuantitativamente la magnitud de la fuerza con la desviación que produce así como su posterior evolución hacia una trayectoria elíptica. El gran aporte de Hooke en la solución del modelo planetario fue haber llevado el problema a un asunto de mecánica aplicada con lo cual colocó en un mismo plano la física terrestre y celeste. Lo anterior tiene la gran importancia de haber roto definitivamente todo un paradigma, el aristotélico-ptolomeico; y haber abierto las puertas para uno nuevo: el newtoniano.

Newton junto a otros hombres de ciencia del siglo XVII como Hooke, tenía claro que para que los planetas describieran trayectorias cerradas, debían moverse continuamente hacia el sol. Este movimiento combinado con el inercial rectilíneo de cada planeta, terminaría en una curva. Esto de alguna manera ya lo había dicho Hooke; sin embargo Newton fue más allá: para él, el principio intrínseco responsable de la atracción mutua entre el sol y los planetas era el mismo que se daba entre los planetas y sus satélites y ese mismo mecanismo intrínseco, también llamado gravedad, era el que explicaba el movimiento de los cuerpos cerca de la superficie terrestre. Lo que estaría por establecer es la relación cuantitativa entre fuerza de atracción entre los cuerpos, sus masas y la distancia que los separa.

En 1696, Newton consiguió determinar matemáticamente, apoyado en la tercera ley de Kepler,

que la fuerza de atracción entre cada planeta y el sol es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Esta misma ley podía explicar la caída de la luna hacia la tierra así como la caída de las manzanas hacia ella. Luego generalizó sus resultados al demostrar que esa misma ley podía explicar satisfactoriamente las órbitas elípticas de los planetas cuando se mueven alrededor del sol.

Su mecánica estableció que el cambio de movimiento de un cuerpo de cierta masa, forma y tamaño, se debe a la influencia sobre éste de fuerzas naturales. Cuando se conocen dichas fuerzas y las condiciones iniciales del sistema en consideración, dicho sistema quedará completamente determinado.

Newton descubrió la gravitación universal y completó el enunciado formal de los principios de la mecánica generalmente aceptado hoy. En sus “principios matemáticos de filosofía natural” (principia), Newton, retrospectivamente, selecciona, ordena y formaliza los logros obtenidos por sus antecesores del siglo XVI. Según Truesdell (1968) en el libro I aparecen las leyes de movimiento:

“Todo cuerpo permanece en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, a menos que sea obligado a cambiar dicho estado por fuerzas aplicadas sobre él mismo”

“La variación del movimiento es proporcional a la fuerza motriz aplicada, y ocurre sobre la línea recta según la que se aplica dicha fuerza.”

“A toda acción le corresponde siempre una reacción igual y contraria; o bien las actuaciones mutuas de dos cuerpos entre sí son siempre iguales y dirigidas hacia partes contrarias.”

Lo anterior y el esclarecimiento de la ley de gravitación universal constituyeron una muestra de cómo a partir de un número muy limitado de axiomas se pueden describir una gran cantidad de fenómenos relacionados con el movimiento de los cuerpos.

Sin embargo, si bien con su corpus teórico Newton logra resolver el problema de la interacción entre dos entes masivos, no obtiene el mismo resultado con tres de ellos interactuando entre sí. Se refería al concepto de fuerza como si éste no necesitara una definición. La expresión  $fuerza = masa \times aceleración$  se utilizó y aún se utiliza para resolver algunos problemas dinámicos suponiendo casos particulares de la última cantidad del lado derecho de la ecuación, desembocando en la cinemática correspondiente.

El concepto mismo de cuerpo no se define con precisión: unas veces se entienden como masas puntuales y otras como entes de mayor masa que ocupan lugares en el

espacio. Si bien Newton influyó en las posteriores investigaciones que sobre mecánica se realizaron en el siglo XVIII, pasó por alto el estudio de tres temas fundamentales: cuerpos rígidos, cuerpos flexibles y cuerpos elásticos. Tampoco obstaculiza ni absorbe la evolución paralela de otros campos como: la estática y la dinámica.

Newton inició la investigación sistemática de lo que hoy se conoce como mecánica clásica; para algunos historiadores de la ciencia esta última fue establecida como teoría matemática en el siglo XVIII gracias al trabajo de hombres como: D'Alembert, los hermanos Bernoulli, Euler, Lagrange entre otros quienes

“buscaron un enunciado sencillo y general para el movimiento de todo cuerpo, a partir del cual se siguiera matemáticamente el movimiento de un cuerpo en particular bajo condiciones dadas” (Truesdell 1968).

## 2.2 La consolidación de la mecánica clásica

Como se desprende entonces del párrafo anterior la llamada “mecánica newtoniana” es solamente aplicable a masas puntuales, cuerpos rígidos, y algunos otros sistemas particulares. Sin embargo, cuando se estudian los sistemas elásticos, tal corpus teórico resulta insuficiente.

Jaime Bernoulli, contemporáneo de Newton, completó ideas que este último dejara planteadas: estudió el problema del equilibrio de una cuerda sometida a una carga arbitraria a lo largo de su longitud; introdujo el concepto de tensión y encontró las ecuaciones generales para el equilibrio; obtuvo la primera teoría sobre la flexión en una barra; introdujo por primera vez la relación esfuerzo-deformación de un medio deformable. Con estas investigaciones contribuyó en gran medida a desarrollar los conocimientos de los medios elásticos. En cuanto a medios continuos (cuerpos rígidos), encontró un principio general a partir del cual obtener la solución particular que hubiera dado Huygens al péndulo físico; estudió el movimiento de un sistema ligado y estableció que para la estática es necesario tanto el equilibrio de fuerzas como el equilibrio de momentos.

Avanzando respecto a la idea del ímpetu de Jean Buridan, Descartes, en su estudio sobre el movimiento de los cuerpos, consideraba que la medida de la fuerza estaba dada por producto entre la masa y la velocidad; según él, esta cantidad no habría cambiado desde el origen del universo. Leibniz proponía una especie de principio de conservación entre lo que denominaba fuerza muerta (hoy se conoce como energía potencial) y fuerza viva (el doble de lo que hoy se conoce como energía cinética): “la

pérdida de fuerza muerta corresponde al aumento de la fuerza viva” (Truesdell. 1968). Este, al parecer, es el antecesor del principio de conservación de la energía. La unión de las propuestas de Descartes y Leibniz permitió resolver algunos problemas sencillos. Como se ve, se vislumbraban dos perspectivas para la evolución de la mecánica desde aquella época: el enfoque newtoniano y el que se acaba de mencionar.

La disputa sobre la forma de la tierra entre cartesianos y newtonianos ya se había resuelto a favor de los últimos cuando Maupertuis comprobó el achatamiento en los polos de aquella. McLaurin reforzó tal comprobación cuando a mediados del siglo XVII demostró que cualquier esferoide en equilibrio rotacional permitía relacionar la velocidad angular con la excentricidad. En los trabajos de Clairaut sobre configuraciones de equilibrio para masas fluidas en rotación se encuentra la idea de fuerzas conservativas y por primera vez el concepto de campo vectorial generalizado. El problema de la salida de líquido por un recipiente fue resuelto por Daniel Bernoulli aplicando el principio de conservación de la cantidad de movimiento. Sus trabajos sobre hidrodinámica contienen el primer análisis de la presión y velocidad de un fluido en movimiento.

Juan Bernoulli en 1739 utilizando la segunda ley de Newton había encontrado las ecuaciones generales de la hidráulica para fluidos incompresibles. Se ocupó del péndulo bifilar y encontró las ecuaciones diferenciales para el movimiento finito de una cuerda. Introdujo el concepto de fuerza interna en el campo de la hidráulica. Con esta idea se logró establecer la dinámica de la perturbación que se propaga en el seno de un material. D'Alembert dio una regla general para obtener las ecuaciones de movimiento de sistemas con ligaduras. Fue el primero en expresar una ley de movimiento como una ecuación en derivadas parciales para una cuerda suspendida de masa no despreciable.

En 1744, Euler utilizando el principio newtoniano de balance entre fuerza y aceleración, encontró las ecuaciones diferenciales del movimiento finito para una cuerda tensa cargada y llegó a las integrales del momento lineal y de la energía cinética mediante cuadraturas. A la luz de este principio planteó y resolvió el problema relativo a los tres cuerpos obteniéndose éxito en casos particulares. Conocido como principio de momento lineal en palabras decía que “el poder acelerador es igual al cambio instantáneo de la velocidad del cuerpo con respecto al tiempo” (Truesdell 1975). La famosa ecuación  $\vec{F} = m\vec{a}$  en forma de componentes fue publicada por Euler en 1752 constituyéndose en la primera ecuación general para la solución de problemas mecánicos de cualquier tipo. Sin embargo lo anterior no contiene en sí mismo todos los principios que pudieran llevar al conocimiento del movimiento de todos los cuerpos cualquiera que sea su naturaleza.

A partir de Euler aparecen las ecuaciones generales del movimiento de un cuerpo rígido alrededor de su centro de gravedad. Por la época se demostró que todo cuerpo rígido tiene por lo menos tres ejes principales de inercia. Euler define el concepto de centro de masa e introduce la idea de su movimiento como si toda la masa del cuerpo se concentrara en ese punto. Esto es lo que permite en la actualidad que ecuaciones establecidas para masas puntuales se utilicen en la solución de problemas relacionados con proyectiles, aeroplanos, automóviles entre otros. También se estableció por parte de Euler que en el movimiento rotacional la masa es reemplazada por el tensor de inercia. Se deja claro que la segunda ley de Newton solamente es aplicable a masas puntuales entendidas como los centros de masa de cuerpos finitos.

Juan Bernoulli introduce el concepto de fuerza interna en el campo de la hidráulica; con ello pudo establecer que la aceleración de un elemento de volumen cilíndrico de un fluido era el resultado del desequilibrio de tales fuerzas aplicadas en cada una de las secciones transversales. Sin embargo, fue Euler quien logró axiomatizar la mecánica de los fluidos de aquel tiempo mostrando lo que serían sus posteriores aplicaciones. Describe matemáticamente aspectos relacionados con deformaciones en cuerpos continuos profundizando la idea de conservación de la masa. Hizo notar que para fluidos incomprensibles en reposo cerca de la superficie terrestre, la presión del fluido es normal sobre la superficie sobre la cual actúa. Creó el concepto de presión interna según el cual la fuerza ejercida por un fluido sobre cualquier superficie frontera imaginaria en el seno del mismo es equivalente a la acción de un campo de presiones normales a la superficie independiente su geometría y posición dentro del mismo. Este es otro caso de la concepción de una teoría general que incluía lo conocido hasta entonces como casos particulares (Truesdell 1975).

No se sabe con exactitud cuando el concepto de cantidad de movimiento alcanzó status de fundamental de la mecánica. El momento de la cantidad de movimiento fue utilizado por Euler para encontrar las ecuaciones de movimiento para un sistema de  $n$  varillas rígidas conectadas entre sí y sometidas a fuerzas arbitrarias en sus articulaciones. Como resultado de su búsqueda de un enfoque general de la mecánica aparecen las siguientes leyes aplicables a las partes de un cuerpo arbitrario que según Truesdell (1975) se expresan de la siguiente manera:

“La fuerza total que actúa sobre el cuerpo es igual a la variación temporal de la cantidad de movimiento total”

“El par total que actúa sobre el cuerpo es igual a la variación temporal del total del momento de la cantidad de movimiento, donde tanto el par como el momento se toman con respecto al mismo punto”

Es decir: existe una cantidad física fundamental denominada cantidad de movimiento de un cuerpo. En el caso de una masa puntual se expresa en la forma

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Extendiendo al caso de un sistema de dichos corpúsculos, el momentum resultante de todas las contribuciones individuales será

$$\vec{P} = \sum_i \vec{p}_i$$

Sería entonces

$$\vec{P} = \sum_i m_i \vec{p}_i$$

Si el sistema no interactúa con otro u otros sistemas de masas puntuales, el momentum total permanece constante. Este resultado, ratificado experimentalmente, se conoce como principio de conservación del momentum uno de los principios fundamentales y universales de la física. El rompimiento de dicha situación implica una interacción entre sistemas lo cual se describe en términos de un concepto matemático denominado fuerza, el cual se sintetiza matemáticamente en la forma:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (1)$$

La formulación en los términos expresados en el párrafo anterior de la llamada segunda ley de Newton permitió, como ya se ha dicho, su aplicación al estudio de los fluidos y medios deformables; es esto lo que le confiere carácter general. Ahora bien, con la introducción por parte de Euler del concepto de centro de masa, se pudo aplicar el caso particular  $\vec{F}_{ext} = M\vec{a}_{cm}$  a cuerpos de masa constante la cual se podía considerar como si toda ella estuviera concentrada en dicho punto. He aquí la justificación de por qué los profesores de física general utilizan la expresión anterior en la solución de problemas sencillos relacionados con el movimiento de cuerpos macroscópicos (aeroplanos, automóviles, piedras...)

La cantidad de movimiento implica traslación del sistema cuerpo respecto a un sistema de referencia. Puede existir equilibrio y en tal caso la mencionada cantidad física se conserva; si por el contrario no lo hace, es por la interacción del cuerpo con su entorno y en este caso la fuerza resultante es distinta de cero de cero responsable del desequilibrio traslacional.

El momentum angular de una masa puntual se define en

términos de su cantidad de movimiento como el producto vectorial con su vector de posición correspondiente.

$$\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$$

Para un sistema de masas puntuales:

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i$$

Y por tanto:

$$\vec{L} = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{p}_i$$

En la obtención de esta ecuación se supone que el momentum angular total debido a las fuerzas internas es cero. El cambio instantáneo con respecto al tiempo de la expresión anterior lleva a la ecuación

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (2)$$

Donde

$$\vec{\tau} = \sum_i \vec{\tau}_i = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i$$

Es el momento de la fuerza  $\vec{F}_i$  sobre cada masa puntual  $m_i$ .

El momento de la cantidad de movimiento implica rotación del cuerpo respecto a un eje que pasa por algún punto de referencia. Puede existir equilibrio rotacional y en tal caso la mencionada cantidad física se conserva; si por el contrario, no lo hace, es por la interacción del cuerpo con su entorno y en este caso la fuerza resultante produjo un torque distinto de cero responsable del desequilibrio rotacional.

Las ecuaciones (1) y (2) propuestas por Euler y conocidas como **leyes fundamentales, generales e independientes de la mecánica** son aplicables a todo tipo de movimiento y a todo tipo de cuerpos; trascienden la formulación de Newton en el sentido de que no solamente se utilizan en masas puntuales y cuerpos rígidos, sino también a medios deformables. Los trabajos de Euler contribuyeron en gran medida a **“avanzar hacia una mayor generalidad y formular una mecánica única que abarcara toda clase de sistemas”** (Truesdell 1975)

Las ecuaciones mencionadas en su versión  $\frac{d\vec{P}}{dt} = 0$  y

$\frac{d\vec{L}}{dt} = 0$  necesarias y suficientes para el estudio de la estática, confirman a las ecuaciones (1) y (2) en su fundamentalidad y generalidad.

### 3. CONCLUSIONES

Desde los griegos (pasando por Aristóteles, Ptolomeo, los escolásticos ingleses del renacimiento, los copernicanos incluidos entre otros Kepler y Galileo, Newton, sus contemporáneos y sus sucesores) hasta hoy, el hombre de ciencia y en particular los que se han dedicado al estudio de la mecánica, han dirigido de una u otra forma sus esfuerzos a sintetizar en un corpus teórico integrador todas la dispersión de observaciones que sobre el movimiento de todo tipo de cuerpos se da en la naturaleza. Newton fue un gran visionario que, como el mismo lo dijera, apoyado sobre hombros de gigantes, logró unificar y proyectar distintas concepciones dispersas en una sola teoría conocida como mecánica newtoniana.

De los principios del momentum lineal y el momentum angular se desprenden los conceptos de fuerza y de torque de una fuerza lo cual encierra la axiomática fundamental de la mecánica.

En los principios de Newton no aparece algo relacionado con las ecuaciones arriba mencionadas como leyes fundamentales y generales de la física. Dichas ecuaciones tampoco aparecen en las obras de Huygens y Lagrange.

Para Truesdell (1975) quien en realidad planteó el concepto de torque como el cambio instantáneo del momentum angular respecto al tiempo fue Jaime Bernoulli. De Daniel Bernoulli fue la idea de que el momentum angular se desprende del momentum lineal. Euler fue el primero en aplicar estos dos principios de manera independiente en el planteamiento de las ecuaciones de movimiento de un sistema.

Desde el punto de vista de la didáctica moderna dentro de la cual se considera que los contenidos deben concebirse desde la esencialidad y la generalidad, la consolidación de la mecánica alrededor de tres leyes fundamentales y generales a saber: el momentum lineal, el momentum angular y la energía, ofrece una alternativa para seleccionar el contenido de aprendizaje.

En el contexto colombiano, en el cual la mecánica

constituye el contenido de aprendizaje de la llamada física I, la visión unificadora plasmada en el párrafo anterior, permite la estructuración de dicha temática integrando a la asignatura de manera natural capítulos relacionados con los fluidos, la termodinámica, gravitación y relatividad especial. Lo anterior permitirá abrir espacios para la inclusión de más tópicos modernos relacionados con la mecánica cuántica en la formación en física de las carreras de ingeniería.

*“Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido; es hacer de cada hombre resumen del mundo viviente hasta el día en que vive, es ponerlo al nivel de su tiempo para que flote sobre él y no dejarlo debajo de su tiempo con lo que no podrá salir a flote; es preparar al hombre para la vida”*

*José Martí*

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] T. Kuhn, La revolución copernicana (Ariel, S.A, Barcelona 1978).
- [2] A. Sepúlveda, Los conceptos de la física (Editorial Universidad de Antioquia, Medellín 2003).
- [3] A. Vidal, Ensayos Sobre el Desarrollo de las Ideas Básicas de la Física (Ediciones Pueblos Unidos, Montevideo, 1962).
- [4] C. Truesdell, Ensayos de Historia de la Mecánica, (Editorial Tecnos, Madrid, 1975).