

El borrador de Currículo de Castilla-La Mancha. La superación de la Física del sentido común.

Jesús Ruiz Felipe. Profesor de Física y Química del IES Cristóbal Pérez Pastor de Tobarra (Albacete) jesusruiz@sociedadelainformacion.com

En el currículo¹ de Castilla-La Mancha (pendiente de aprobar) en el curso de 4ª de la ESO del área de Física y Química, en el bloque correspondiente a la mecánica, se lee:

Bloque 2. Fuerzas y movimientos

- Estudio de las fuerzas como causa de los cambios de movimiento. Carácter relativo del movimiento. Estudio cualitativo de los movimientos rectilíneos y curvilíneos. Estudio cuantitativo del movimiento rectilíneo y uniforme. Aceleración. **Galileo y el estudio experimental de la caída libre.**
- Los principios de la dinámica **como superación de la física “del sentido común”**. Identificación de fuerzas que intervienen en la vida cotidiana: formas de interacción. Equilibrio de fuerzas. La presión. Principio fundamental de la estática de fluidos. La presión atmosférica: diseño y realización de experiencias para ponerla de manifiesto.
- La superación de la barrera Cielo-Tierra: Astronomía y Gravitación Universal. La Astronomía: implicaciones prácticas y su papel en las ideas sobre el Universo. El sistema geocéntrico. Su cuestionamiento y el surgimiento del modelo heliocéntrico. Copérnico y la primera gran revolución científica. **Valoración e implicaciones del enfrentamiento entre dogmatismo y libertad de investigación. Importancia del telescopio de Galileo y sus aplicaciones.**

La figura de Galileo emerge como un símbolo de la lucha contra el dogmatismo, y como un emblema crítico capaz de cuestionar la teoría de Aristóteles, erigida como la verdadera percepción del mundo natural, con el beneplácito de la Iglesia Católica, a la que las ideas del griego le cuadraban casi perfectamente, tanto en el cielo como en la tierra, como doctrina oficial.

En los *Discorsi e dimostrazioni mathematiche in torno a due nuove scienze attenenti alla meccanica* publicado (*Opere*, VIII) en 1638, cuatro años antes de su muerte, las dos nuevas Ciencias, la mecánica y los movimientos locales ocupan dos jornadas cada una. En la primera, Galileo sienta las bases de la construcción de una nueva manera de construir la Ciencia y arremete

¹ Se puede consultar en: <http://www.jccm.es/edu/cpr/albacete/ambitos/ciencias/curricula/DTCCNNEO.doc>

contra unos principios que son más de orden filosófico que empírico, es la denominada física del sentido común.

Los Discorsi están escritos en italiano y en forma de diálogo, de esta manera contribuyeron de manera decisiva a la divulgación de la Ciencia, rompen con la costumbre elitista que representa el latín, abriendo sus reflexiones a un público más amplio. Este estilo, al igual que fueron redactados los Diálogos, encierra cierta rebeldía que disgustaba en los sectores tradicionales representados por la Iglesia.

Tres son los interlocutores: Sagredo (así se apellidaba uno de sus amigos de Venecia), Simplicio (que con toda mala intención lleva el nombre del comentarista de Aristóteles y expone las ideas de su época desde un punto de vista escolástico) y Salviati, departen sobre numerosas cuestiones relativas a la mecánica y los movimientos locales. La aristotélica oficial va siendo presentada por Simplicio. Sagredo representa el hombre de buena voluntad no comprometido, ávido de aprender, que en cierto modo actúa de moderador entre los contendientes: Salviati (había existido un amigo íntimo de Galileo llamado Filippo Salviati) y Simplicio. Salviati es el portavoz de las ideas de Galileo (“el académico linceo”).

Largo campo di filosofare (Opere, VIII, 49) es el comienzo de esta obra y hace referencia a la intensa actividad desarrollada en el Arsenal de Venecia, que ofrece un gran campo para filosofar a los intelectos que especulan acerca de la mecánica. Se relaciona de esta manera la Ciencia con los hallazgos de los talleres artesanales, es decir con la técnica del XVII. Esta mención al trabajo artesanal supone un alejamiento de las doctrinas vigentes en los círculos académicos, de la manera de construir una Ciencia escasamente empírica y anclada en la tradición y el pasado.

En los Discorsi, planea sin descanso la sombra de Aristóteles. Salviati (Opere, VIII, 54): *algunas conclusiones provienen de otros, y de manera especial de Aristóteles (...) ni se prueban con demostraciones necesarias a partir de principios indudables e indemostrables.*

La defensa y el ataque de Galileo acerca del “método científico” vigente hasta entonces se encaminaba contra los acérrimos adeptos que tomaban la filosofía de Aristóteles como dogma incuestionable, impidiendo generar un criterio objetivo en el enfoque de las cuestiones científicas. Estas teorías campearon por Europa durante veinte siglos casi sin refutación, con tibios matices de las escuelas de Oxford y París, como la verdadera percepción

del mundo natural. Galileo, como Aristóteles, utiliza la inducción a partir de la experiencia, pero es capaz de cuestionar las verdades dogmáticas, en todos los ámbitos de su Física.

Galileo establece las leyes de sus nuevas Ciencias a partir de principios, a la manera de Arquímedes que construía modelos geométricos a partir de sus observaciones mecánicas. Galileo se apoyaba de la geometría de Euclides y en el trabajo del de Siracusa. Tendió un puente entre la matemática teórica y la naturaleza experimental, concepción enfrentada a la de Aristóteles cuyas matemáticas eran una idealización intelectual, no eran una herramienta útil para la descripción de un mundo mutable e imperfecto. Todo el trabajo de la primera jornada de los Discorsi que se refiere a la caída de graves, está inspirada en los principios hidrostáticos de Arquímedes, relegando la resistencia del medio a un nivel secundario. En Sobre los cuerpos flotantes, Arquímedes dedujo sus conclusiones a partir de un método deductivo, pero sus soluciones derivan de la mecánica. Galileo aplica el mismo modelo, en sus estudios de cinemática trata de fundamentar geoméricamente el movimiento, como cuando establece a relación exponencial entre el volumen y la superficie de un cuerpo como causa motora y resistiva en la caída de graves (Opere, VIII, 134), resultado inspirado en la experiencia y geometrizado a posteriori.

Uno de los pilares de la Física premoderna es el horror al vacío. La Ciencia anterior al XVII aborrecía el vacío, forjando de este horror vacui una norma inquebrantable. No era viable que el vacío existiese, posibilidad cerrada por la física aristotélica y emparentada con el atomismo. Aristóteles, despliega un razonamiento completo contra el vacío. Los argumentos, son filosóficos: el vacío sería sobre todo un concepto inconsistente.

(Opere, VIII, 59) Sagredo recuerda la argumentación de Aristóteles de que el movimiento en el vacío sería instantáneo (prueba de la incongruencia del vacío). Para Aristóteles, el estudio del movimiento se fundamenta en las nociones de espacio y tiempo, magnitudes inexistentes fuera de los entes. Los cuerpos formalizan el espacio durante un tiempo. Al no existir el espacio más allá de las cosas, el espacio vacío carece de estructura; en el vacío no cabe el arriba ni el abajo, es decir no se cuenta con una orientación ni con un soporte en el que se produzca el tránsito (pues el vacío es su ausencia). En la tesis de Aristóteles el movimiento es función de la disposición del cuerpo para dirigirse a su sitio natural. Pero en el vacío los cuerpos no encuentran su lugar natural. Además la rapidez sería inversamente proporcional

a la resistencia que opone el medio. Si la resistencia fuera nula conduciría al absurdo de un desplazamiento instantáneo. Galileo arremeterá en los Discorsi contra estas dos dependencias, formuladas en base a fundamentos poco o nada empíricos.

Caída de graves.

En los Discorsi se establece una discusión en la que Galileo arremeterá contra la concepción aristotélica de la caída de los cuerpos, en realidad contra toda su Física, para empezar contra su cimentación dudosamente empírica.

(Opere, VIII, 106) Salviati: *Dudo grandemente que Aristóteles haya comprobado por el experimento, si es verdad que dos piedras, siendo una de ellas diez veces más pesada que la otra, al dejarlas caer en el mismo instante desde una altura de cien brazas, diferirían en velocidad de tal manera, que cuando la más pesada hubiese llegado a tierra, la otra no habría recorrido en su caída más de diez brazas.*

Simplicio: *Su lenguaje parece indicar que él había ensayado el experimento, ya que dice: Vemos el más pesado; la palabra vemos indica que él había hecho el experimento.*

Galileo aceptaba el sistema inductivo de Aristóteles a partir de la experiencia. Admitía la concepción de Aristóteles de la investigación en dos etapas, de las indagaciones empíricas a los preceptos universales y retorno deductivo a la observación, pero dudaba grandemente de que Aristóteles se ajustara a este método que Galileo no sólo daba por bueno sino que defendía con el añadido de que posteriormente el mismo matemáticamente sus resultados, y sólo así los daba por válidos. Además, se ha visto como la ofensiva de Galileo se orientaba contra los partidarios fanáticos que aceptaban a Aristóteles como doctrina incontestable.

Después de cuestionar los procedimientos embiste contra su formulación. Aristóteles afirma que cada cuerpo posee una velocidad característica, natural, dependiente de su peso. (Opere, VIII, 107) *si tuviéramos dos móviles cuyas velocidades naturales fuesen distintas, es evidente que si uniésemos ambos el más rápido perdería velocidad por obra del más lento* pregunta Salviati a Simplicio para ponerlo en evidencia. Éste replica: *Es una razón incuestionable.*

Salviati: *Pues si es cierto, y una piedra grande se mueve con una velocidad, por ejemplo, de ocho grados, y otra más pequeña con una velocidad de cuatro grados, cuando estén unidas el sistema se moverá con una velocidad menor de ocho; sin embargo, cuando las dos piedras están atadas juntamente, forman una piedra mayor que la que antes se movía con velocidad de ocho. Por tanto, la piedra ahora más pesada se mueve con menos veloci-*

dad que la más ligera; este efecto es contrario a vuestra hipótesis. Es decir, de tu hipótesis de que el cuerpo pesado se mueve más rápido que el más ligero, yo deduzco que el cuerpo más pesado se mueve más lentamente.

Simplicio: *Estoy hundido me parece que la piedra más pequeña unida a la mayor le da más peso, y no consigo explicarme cómo dándole más peso no deba sumarle.*

Este breve dialogo en el que sale tan mal parado Simplicio, y por extensión la física “intuitiva” permite comprobar que carece de sentido plantearse el debate de cómo un cuerpo percibe lo grave que es, si va unido o suelto a otro cuerpo, sólo cabe que los objetos descendieran todos a idéntica velocidad. Galileo deduce sus resultados sobre la caída de las partículas mediante un procedimiento dialéctico mitad experimento y mitad razonamiento verbal, réplica de los contrasentidos establecidos, que comenzaban a cuestionarse.

Antes de concluir que todos los graves descenderían simultáneamente si no hubiera resistencia del medio, o en ausencia de éste, Galileo afirma: (Opere, VIII, 109) *los móviles grandes o pequeños se mueven a la misma velocidad si tienen el mismo peso específico.* Se refiere a los graves en el seno de un fluido, considerando sólo el empuje, y no la resistencia del medio que depende de su tamaño como argumentará después (Opere, VIII, 123).

Pero falta desmontar la segunda causa de la formulación aristotélica en la caída de graves: la resistencia del medio. Para que el movimiento se produzca, según Aristóteles, es innecesaria la existencia del vacío, no solo eso sino que su existencia llevaría a una velocidad infinita, al ser la resistencia del medio nula. (Opere, VIII, 106) Simplicio: *el movimiento instantáneo es imposible, luego es imposible que se dé el vacío como fundamento del movimiento.*

Matemáticamente, el movimiento dependería de esta ecuación: $v = CTE \text{ (Peso/Resistencia)}$, o sea la velocidad sería directamente proporcional al peso e inversamente proporcional a la resistencia del medio. En el vacío esa resistencia se anula, por lo tanto la velocidad se hace infinita. Este es uno de los pilares tradicionales contra el vacío, defendido por los atomistas, que abogan por un vacío requerido por el movimiento. Para Aristóteles, el vacío induciría movimientos instantáneos, el vacío es incoherente, pues. Además sin resistencia, el movimiento sería perpetuo. Este punto también es importante, porque lo que sería un absurdo para Aristóteles se convertiría en una abstracción y una idealización muy meritoria para el pisano. Así de cerca y de lejos rozaba el principio de inercia este ilustre griego.

Galileo argumenta acerca de la resistencia del medio. Pero no sólo sobre la resistencia, también el empuje del fluido en el que está inmersa la partícula, algo que Aristóteles engloba en el término resistencia.

Galileo expone que una partícula cae aumentando su velocidad, aunque esta velocidad es algo intrínseco al cuerpo no la relaciona con una causa exterior, sin embargo en un medio esa velocidad aumenta hasta que el cuerpo adquiere su velocidad característica (un objeto denso descende en el agua, y tocará el fondo de la misma manera cayendo desde cualquier altura). Esta velocidad es función no sólo de su peso sino de su peso específico relativo, y esta conclusión se fundamenta en los principios de Arquímedes (Opere, VIII, 110) *muchísimos cuerpos descienden en el aire mientras en el agua emergen a la superficie.*

En contra de Aristóteles no hay cuerpos leves, son todos pesados y caen en función de los pesos específicos de los cuerpos y el medio, o sea el peso específico relativo. De ahí se deduce que: (Opere, VIII, 116) *si se elimina la resistencia del medio, todos los cuerpos descenderían a la misma velocidad pero no una velocidad infinita.* El único pero a Galileo fue no identificar el peso como una interacción exterior, sino como una propiedad intrínseca del cuerpo: un principio intrínseco que lo mueve hacia el centro común de los graves. (Opere, VIII, 118).

(Opere, VIII, 120) Los cálculos de Galileo son extremadamente difíciles de seguir, ignora la aceleración y no aplica, por motivos obvios el principio fundamental de la dinámica:

El plomo es doce veces más pesado que el agua mientras el marfil, solamente dos. El agua, pues, sustrae de sus velocidades absolutas, que serían iguales, al plomo la duodécima parte, mientras al marfil le sustrae la mitad, de modo que cuando el plomo haya descendido once brazas en el agua, el marfil no habrá descendido sino seis

Aplicando el principio de Arquímedes y utilizando la aceleración y las fuerzas:

Peso – Empuje = masa · Aceleración

Densidad_{cuerpo} · Volumen · g – densidad_{agua} · Volumen · g = Densidad_{cuerpo} · Volumen · aceleración

En notación Newtoniana:

$$\text{aceleración} = g \cdot \frac{(\text{Densidad cuerpo} - \text{Densidad agua})}{(\text{Densidad cuerpo})}$$

$$aceleración_{plomo} = g \cdot \frac{(12-1)}{(12)} = \frac{11}{12} g$$

$$aceleración_{marfil} = g \cdot \frac{1}{2}$$

$$\text{Espacio del plomo} = 11 = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} (11/12) \cdot g t^2 \rightarrow \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = 12$$

$$\text{Espacio marfil} = \frac{1}{2} aceleración_{marfil} t^2 = 6 \text{ que es lo previsto por Galileo}$$

En los Discorsi, los cálculos parecen estar deducidos de este modo: El plomo y el marfil en ausencia de resistencia deben recorrer espacios iguales en tiempos iguales, por simplificar las cuentas, 12 brazas. La resistencia del agua frena al plomo en un doceavo, ya que esa es su densidad con respecto al plomo, mientras que frenará en la mitad al marfil por se esa su proporción entre densidades, luego el marfil recorrerá la mitad de 12; 6 brazas.

Pero lo que es muy sensible cuando la resistencia es grande, no lo es tanto cuando hablamos del plomo y el ébano en el aire (Opere, VIII, 119) ya que aunque el plomo es 10 veces más denso que el ébano y diez mil veces más pesado que el aire, con el mismo razonamiento anterior, las diferencias en la caída serán mínimas. De lo cual se difiere que la importancia de los pesos será menor en comparación con el empuje que los sustenta. La resistencia del aire frena al plomo en 1/10.000, ya que esa es su relación de densidades, por tanto en un espacio dividido en 10.000 partes, el plomo por acción del empuje del aire recorrerá 9999 en el tiempo que hubiera descendido diez mil en el vacío. Mientras el ébano en ese mismo tiempo habrá bajado $10.000 - (1/1000) \cdot 10.000 = 9990$.

La ecuación sería:

$$s = s_0 \left(1 - \frac{\text{Peso}_{espcif_{fluido}}}{\text{Peso}_{espcif_{cuerpo}}} \right)$$

donde s es el espacio recorrido y s_0 el espacio que se recorrería

en el vacío (sin empuje): *espacio absoluto*.

Pero igual ocurre con la velocidad, y con la misma corrección:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\text{Peso específico}_{\text{fluido}}}{\text{Peso específico}_{\text{cuerpo}}}\right)$$

En ambos casos sin manejar la aceleración.

En el caso de la madera de encina (Opere, VIII, 120): Peso de la madera= 1000 (dracmas);
Peso del agua (del mismo volumen)= 950; Peso del aire= 2

Si la velocidad absoluta de la bola fuese 1000 grados entonces en el aire sería 998 y en el agua 50. Los mismos cálculos que aplicando la segunda ley de Newton.

Galileo no compara las diferentes resistencias de los medios, *sino que consideramos en qué medida excede el peso del móvil al peso de los medios.* (Opere, VIII, 120).

Esto, sin contar con la fricción del medio, sólo el empuje (*lo que la pesadez del medio -en realidad, la viscosidad- sustrae a la del móvil* (Opere, VIII, 119)), que como indica Galileo de forma implícita, debe ser proporcional a la velocidad, *la velocidad alcanza un punto tal, y la resistencia del medio tal magnitud, que ambas llegan a equilibrarse, eliminando la aceleración y reduciendo al móvil a un movimiento constante y uniforme.*

Galileo distingue tres interacciones, aunque posteriormente iguala velocidad a resistencia. Un cuerpo en el seno de un fluido cae por la acción de las siguientes fuerzas: el peso (inherente, según Galileo, al propio cuerpo, desconociendo su causa exterior), el empuje (que participa en los análisis de una manera principal y cuantitativa) y una fuerza de rozamiento debida al fluido en el que está inmerso el grave; esta fuerza queda relegada de forma cualitativa en los razonamientos anteriores.

El empuje ocupa en los cálculos de Galileo una importancia capital mientras que de la fricción del fluido sabemos que es proporcional a la velocidad (ya que va aumentando, *la velocidad alcanza un punto tal, y la resistencia del medio tal magnitud, que ambas llegan a equilibrarse, eliminando la aceleración y reduciendo al móvil a un movimiento constante*), La resistencia, como se señala más adelante, depende de la superficie (R^2) del grave. En realidad, en la fórmula de Stokes la fricción es proporcional a la velocidad, pero varía con el tamaño de una forma más suave, como R .

Hay que señalar, que Galileo compensa una velocidad a la resultante de dos fuerzas. Conceptualmente hay varios errores dinámicos. El peso, se equilibra con la acción de dos fuerzas opuestas: el empuje y la fricción del fluido. Combinado, pesos específicos relativos, tamaño del grave y fricción proporcional a la velocidad, resulta que cada cuerpo adquiere una velocidad característica.

Aristóteles sostenía que el cuerpo que cae se acelera, pero se amparaba en razones filosóficas cualitativas, el grave tiende a su lugar natural, lo más rápido posible. El académico inducía que el movimiento que presentaban los cuerpos en su caída era uniformemente acelerado, su velocidad va aumentando uniformemente, pero no creía en el movimiento natural y movimiento violento. Estudió, en esta primera jornada de los Discorsi, cómo variaba el espacio con la velocidad, y la velocidad con el peso específico relativo, y después quiso geometrizar este movimiento.

Galileo desmonta las tesis cinemáticas de Aristóteles, tanto de orden filosófico, como en la vertiente empírica y sitúa las dos magnitudes que someten el movimiento tradicional, peso y resistencia, en su “lugar natural”. Sustituye el espacio físico por un espacio euclidiano que permite el movimiento perpetuo y en el vacío como extrapolaciones muy meritorias.

Galileo maneja correctamente las interacciones vinculadas al medio por el que el móvil se desplaza, ahí donde Aristóteles los engloba en el término resistencia: el empuje del fluido en que está inmerso el cuerpo, y la fricción creciente con la velocidad que se opone al movimiento. Si no hubiera resistencia, los cuerpos caerían todos a la vez. Además, en la epistemología galileana el objeto real se sustituye por el cuerpo geométrico. Al estar inmersos en el seno de un fluido, como el aire o el agua, la resistencia aumentará con la superficie de contacto (como R^2) mientras el peso motor variará con el volumen (como R^3), por tanto, aunque la ecuación de Aristóteles estaba mal formulada, cierto es que un cuerpo pesado caerá más deprisa que uno ligero, siendo del mismo material.

La caída de los graves significa un innovador concepto de ciencia y un nuevo método de construirla. Su intención fue describir el movimiento natural de caída; sin indagar la causa que lo inducía, pasó por alto la gravedad como mecanismo exterior. Galileo asesta una herida mortal contra los argumentos del llamado sentido común (intuitivos). Fue además, consciente de los problemas metodológicos de la ciencia. Galileo funda la ciencia de la cinemática y con ello inicia la construcción de la metodología práctica marcando un camino en la física experimental. La ruptura con la concepción física de Aristóteles, la caída de graves, la naturaleza del vacío y en menor medida las oscilaciones son los aportes trascendentales que Galileo incorpora al proceso de producción científico apuntados en esta prime-

ra jornada. Además en su epistemología, Galileo trata de establecer conexiones entre hipótesis, razonamientos, observaciones y conclusiones.

Al terminar la jornada (Opere, VIII, 150) Salviati reconoce que de la materia que se pretendía estudiar, poco o nada hemos tratado. Se ha disertado acerca de toda índole de cuestiones mecánicas, pero se ha asestado un mazazo a la línea de flotación de la Física del sentido común.

SOCIEDAD DE LA INFORMACION

www.sociedadelainformacion.com

Edita:



Director: José Ángel Ruiz Felipe
Jefe de publicaciones: Antero Soria
Luján

D.L.: AB 293-2001
ISSN: 1578-326x