
EL PAPEL DE LOS INSTRUMENTOS EN LA ENSEÑANZA DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA

CARLOS MEDEROS MARTÍN
Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia

INTRODUCCIÓN:

En 1630 Galileo publica su «Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano». En la Jornada Tercera , dice, refiriéndose a la Teoría Heliocéntrica :

«No puedo dejar de admirar la eminencia de ingenio de quienes la han recibido y aceptado como verdadera [...]. No puedo encontrar término a mi admiración , al ver como en Aristarco y en Copérnico haya podido hacer la **razón** tanta violencia contra los **sentidos**, para que, en contra de éstos, ella se haya hecho dueña de sus credulidades»

En efecto, Aristarco de Samos fue un astrónomo de la Escuela de Alejandría que en el siglo III a.C. se propuso medir la distancia entre la Tierra y el Sol . Para ello aprovechó el hecho de que, en los cuartos lunares, el Sol la Tierra y la Luna se encuentran en los vértices de un triángulo rectángulo con el ángulo recto en la Luna, tal que el segmento Tierra - Luna es el cateto menor, y el segmento Tierra - Sol es la hipotenusa.

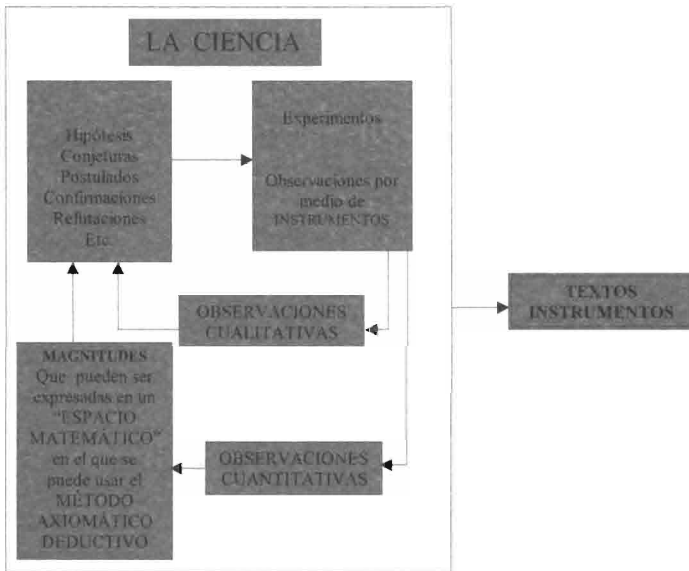
Aristarco midió en esta posición el ángulo Sol - Tierra - Luna (con vértice en la Tierra), obteniendo un valor de 87° (este ángulo es en realidad de $89^\circ 50'$). Luego observó un triángulo rectángulo tal que uno de sus ángulos agudos mida 87° , semejante al anterior, comprobando que la hipotenusa es veinte veces mayor que el cateto menor, y, por lo tanto, dado que los triángulos semejantes tienen sus lados proporcionales, Aristarco concluyó que la distancia Tierra - Sol es veinte veces mayor que la distancia Tierra - Luna (en realidad es 370 veces mayor). Observó, además, que los tamaños aparentes del Sol y la Luna son aproximadamente iguales, con lo que, si el Sol está mucho más lejos que la Luna, debe ser mucho más grande que ésta, e incluso más grande que la Tierra (la relación entre los tamaños de la Tierra y la Luna la había obtenido mediante otras consideraciones astronómicas; posiblemente observando la sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse). En estas condiciones, pensó Aristarco que no era razonable suponer que un Sol tan grande girase alrededor de la Tierra más pequeña que aquel. Surge así el primer modelo heliocéntrico del Universo.

En lo anterior podemos distinguir, por una parte, un cambio en la concepción cosmológica del Universo; por otra parte, se recurre a las figuras geométricas, la semejanza, las proporciones...; pero, ¿qué es lo que hay en medio...? En medio se encuentra la medida de un ángulo, un solo ángulo, que junto con la geometría permitió cambiar la Cosmología; y, evidentemente, este ángulo fue medido con cierto **instrumento**.

Por lo tanto, una de las posibles formas de recorrer la Historia de la Ciencia consiste en hacerlo a través del estudio de los **instrumentos científicos**. En efecto, podemos considerar la Ciencia como un "organismo" cuyo funcionamiento va dejando, a lo largo del tiempo, un rastro formado por dos "productos" fundamentales: los **textos escritos** y los **instrumentos**. Productos éstos bastante apropiados para su "manipulación" y cuyo estudio puede ser afrontado desde distintos puntos de vista, lo que hace que tengan una alta aplicabilidad a la didáctica. El esquema 1, que, hasta cierto punto, podemos considerar trivial, pretende hacer un resumen del funcionamiento del "sistema" científico:

En resumen, este esquema puede ser interpretado como el funcionamiento de un organismo, **la Ciencia**, que a lo largo de la Historia va dejando un reguero de "exquisitos desechos", por medio de los cuales podremos seguir su "trayectoria vital".

En lo que sigue nos centraremos en uno de estos productos y sus posibles aplicaciones didácticas: los instrumentos.



Esquema 1

En primer lugar queremos destacar que hablamos de instrumentos en un “sentido amplio”, es decir, consideramos instrumento cualquier artificio capaz de generar algún tipo de conocimiento; así, un acelerador de partículas es un instrumento, pero un simple poste clavado en el suelo (un gnomon) o una tabla numérica, por ejemplo, también lo son. De todas formas, teniendo en cuenta nuestros propósitos didácticos, un aspecto que consideraremos importante es la **sencillez**; o mejor aún, la relación entre sencillez y cantidad de conocimientos producidos.

En segundo lugar se observa que los instrumentos pueden ser considerados como un refinamiento de nuestros sentidos, los cuales adquieren por medio de aquellos, una mayor capacidad de penetración en la Naturaleza, aumentando nuestro poder de observación y facilitándonos los procesos de inducción, el establecimiento de conjeturas, de hipótesis, etc.; y fundamentalmente, la obtención de **medidas de magnitudes** que pueden ser representadas en un **espacio matemático abstracto** en el que se pueden aplicar los métodos **axiomático - deductivos** propios de la Matemática, lo cual nos permite, en muchos casos, comprobar, refutar o cambiar las afirmaciones establecidas anteriormente. De esta manera el instrumento se convierte en la llave que cierra (¿abre?) ese eterno círculo de hechos y desechos, de hacer y deshacer (como Penélope), que llamamos Ciencia.

Ahora bien, ¿cómo podemos materializar estas consideraciones en el marco de la enseñanza de la Historia de la Ciencia en Secundaria? Para responder a esta pregunta recurriremos, nuevamente, a las palabras de Galileo. En la Jornada Primera del libro «Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias», publicado en 1638, dice Salviati (portavoz del Académico), dirigiéndose a Sagredo y a Simplicio:

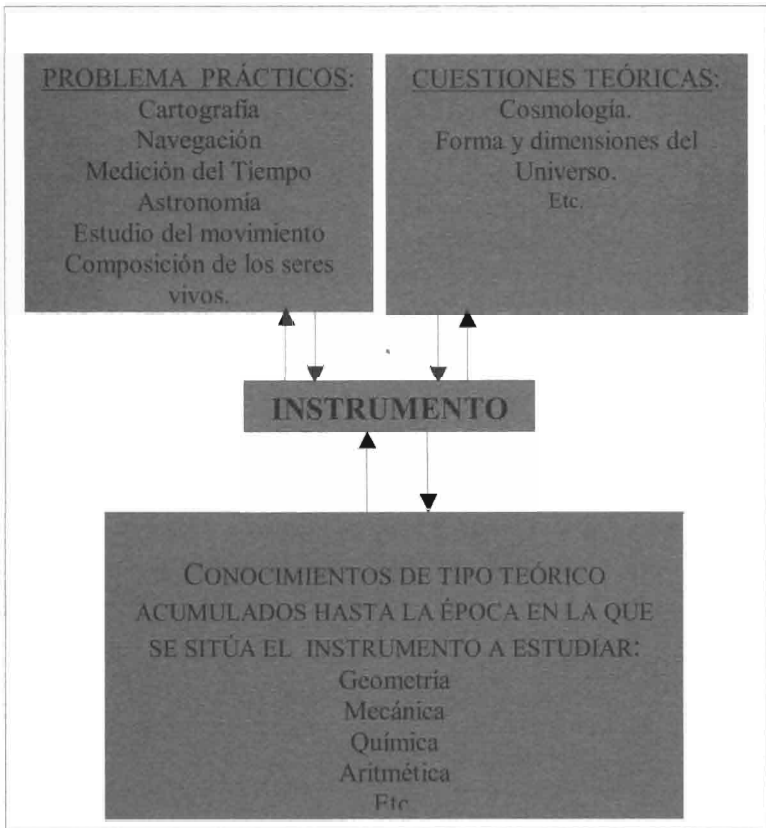
«SALV. Pienso que la frecuente actividad en vuestro famoso arsenal, Señores Venecianos, ofrece un gran campo para **filosofar** a los intelectos que especulan, especialmente, en aquella parte que se denomina mecánica, en donde se construyen continuamente todo tipo de **instrumentos** y de máquinas por gran número de **artesanos**, algunos de los cuales han de ser muy entendidos y con un talento muy agudizado debido tanto a las observaciones que sus predecesores han hecho como a lo que van descubriendo ellos mismos sin interrupción».

El significado de este texto puede ser interpretado como el reconocimiento, por parte de Galileo, de que la actividad científica que surge en el Renacimiento está relacionada con el abandono de los prejuicios elitistas griegos en contra de las artes prácticas, así como al aumento del interés por los problemas mecánicos relacionados con la producción artesanal, lo que hace surgir teorías científicas a partir de los descubrimientos empíricos acumulados por la tradición de los talleres artesanos. Del mismo modo, si queremos que nuestros alumnos de Secundaria adquieran conocimientos de Historia de la Ciencia de una forma significativa, también nosotros debemos abandonar nuestros «*prejuicios elitistas griegos*» (y académicos podríamos añadir) e intentar emular a los artesanos, construyendo, aunque sea en versión simplificada, algún instrumento del que podamos obtener conocimientos **empíricos**.

Por lo tanto, proponemos intentar construir el conocimiento científico de los alumnos recorriendo ese rastro de instrumentos dejados por la ciencia a lo largo de la historia, deteniéndonos especialmente en algunos puntos seleccionados; es decir, deteniéndonos en algunos instrumentos cuya relación entre sencillez y cantidad de conocimientos producidos, mencionada anteriormente, sea satisfactoria; y, además, distribuidos a lo largo del periodo histórico a estudiar. Cada uno de estos instrumentos seleccionados será la **conexión epistemológica** entre una determinada cuestión práctica, inserta en una época determinada y con todos los condicionantes políticos, eco-

nómicos, religiosos, cosmológicos etc. que le son inherentes por una parte y; por otra, algún tipo de conocimiento teórico como son la Geometría, la Mecánica, la Química, etc. De esta manera el instrumento se convierte en el núcleo alrededor del cual se concentra la actividad didáctica, la cual podrá ser afrontada desde distintas disciplinas, es decir, de una forma **interdisciplinar** y dirigida a una **diversidad** de alumnos, ya que entran en juego distintas actividades adaptables a diversas capacidades intelectuales: uso, construcción, diseño, explicación del funcionamiento, fundamentos teóricos etc. Esto último lo podemos resumir en el siguiente esquema:

A continuación se exponen algunos ejemplos del uso didáctico de instrumentos con el fin de aclarar lo anteriormente expuesto.



Esquema 2

ALGUNAS FORMAS DE ENTENDER EL USO DIDÁCTICO DE LOS INSTRUMENTOS:

En su aplicación didáctica los instrumentos pueden ser considerados desde muchos puntos de vista. A continuación se exponen algunos ejemplos sobre diversas formas de entender su uso en el aula que consideramos especialmente interesantes.

Un instrumento puede ser considerado como:

1) Un generador de nuevos conocimientos sobre el comportamiento de la Naturaleza con los que podemos resolver problemas.

Supongamos que estamos estudiando la Ciencia del siglo XVII. Uno de los temas más significativo de esta época es el estudio del movimiento de los cuerpos. En efecto, durante los siglos XVI y XVII se cuestionan las concepciones aristotélicas sobre el movimiento y surgen nuevas ideas al respecto, como por ejemplo la cristalización de la Ley de la Inercia; lo que conduce a nuevos planteamientos, que junto con la irrupción de la Matemática como lenguaje de la Naturaleza, sienta las bases de la Ciencia Moderna. Todo esto lo podemos encontrar, entre otros, en la obra de Galileo, quien en la tercera jornada de su libro, citado anteriormente, "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias", establece definiciones de movimiento uniforme y uniformemente acelerado que corresponden a la esencia de estos dos tipos de movimiento. Esta correspondencia, dice Galileo:

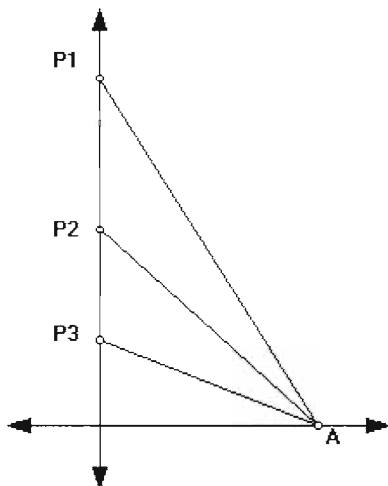
«[...] Creemos haberla logrado al fin, después de largas reflexiones, especialmente si tenemos en cuenta que las propiedades que hemos ido demostrando sucesivamente [*a partir de nuestra definición*] parece que corresponden y coinciden exactamente con lo que los experimentos naturales nos ponen delante de nuestros sentidos. En suma, el estudio del movimiento naturalmente acelerado nos ha llevado, como agarrados de la mano, la observación de las costumbres y reglas que sigue la misma naturaleza en todas sus obras restantes, para cuya ejecución suele hacer uso de los medios más inmediatos, más **simples y fáciles...**».

Pues bien, en este contexto situamos el siguiente ejemplo, cuya finalidad es ilustrar el uso de los INSTRUMENTOS CIENTÍ-

FICOS en la construcción del conocimiento y en la resolución de problemas, desde el punto de vista de la Historia de la Ciencia.

EL PROBLEMA

Si desde los puntos P_1 , P_2 y P_3 se deja caer un cuerpo hasta el punto A, siguiendo planos inclinados ¿cuál de los tres recorridos se hará en menos tiempo?

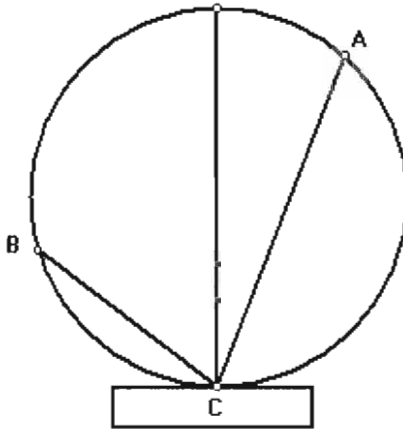


Para resolver este problema necesitamos algún método para medir o comparar los tiempos que tarda un cuerpo en caer a lo largo de cada uno de los planos inclinados; lo cual, en la época que nos hemos situado, representa un problema técnico complicado, teniendo en cuenta que aún no está muy desarrollada la construcción de relojes precisos.

EL INSTRUMENTO

Consideremos una circunferencia situada en un plano vertical en la que se han construido varios (en este caso dos) planos inclinados formando cuerdas que confluyen en el punto más bajo de un diámetro vertical, pero con distinta inclinación, y por los que se pueden dejar caer simultáneamente dos objetos iguales; como por ejemplo, dos bolas de cristal (para evitar, en la medida de lo posible, el rozamiento).

En la siguiente figura se presenta un esquema del instrumento:



Con este instrumento podemos comprobar “empíricamente” que los tiempos de caída a lo largo de todas las cuerdas consideradas son iguales, es decir, este instrumento PRODUCE nuevos conocimientos: “Los tiempos de caída a lo largo de las cuerdas que confluyen en el punto más bajo de un diámetro vertical son todos iguales”; o dicho de otro modo, dichas cuerdas son TAUTÓCRONAS (del griego: el mismo tiempo).

LOS CONOCIMIENTOS TEÓRICOS ASOCIADOS

Pero, como hemos señalado en el esquema, cada instrumento tiene asociados unos fundamentos teóricos de tipo mecánico, geométrico, aritmético, etc.; acumulados a lo largo de la historia, hasta la época en la que nos situamos. En el caso de nuestro instrumento, podemos PROBAR la propiedad obtenida empíricamente usando los Teoremas II y III sobre el movimiento naturalmente acelerado incluidos de la Tercera Jornada del “Consideraciones y Demostraciones Sobre Dos Nuevas Ciencias” de Galileo y el “Teorema del Cateto”, que podemos encontrar enunciado y demostrado en los “Elementos” de Euclides:

TEOREMA II: Si un móvil cae, partiendo del reposo, con un movimiento uniformemente acelerado, los espacios por él recorridos en cualquier tiempo que sea están entre sí como los cuadrados de los tiempos.

TEOREMA III: Si uno y el mismo móvil se mueve, partiendo del reposo, sobre un plano inclinado y a lo largo de uno vertical, teniendo ambos la misma altura, los tiempos de los movimientos estarán entre sí como las longitudes del plano y de la vertical.

TEOREMA DEL CATETO: El cateto es media proporcional entre la hipotenusa y su proyección sobre ella.

Usando los anteriores resultados, podemos realizar la siguiente demostración:

Demostrar:

$$t_A(AC) = t_B(BC)$$

En efecto:

Teor. III $\implies \frac{t_B(BC)}{t_P(PC)} = \frac{BC}{PC} = \frac{\sqrt{AC \cdot PC}}{PC} = \sqrt{\frac{AC}{PC}}$ (1)

Teor. II $\implies \frac{t_A(AC)}{t_P(PC)} = \sqrt{\frac{AC}{PC}}$ (2)

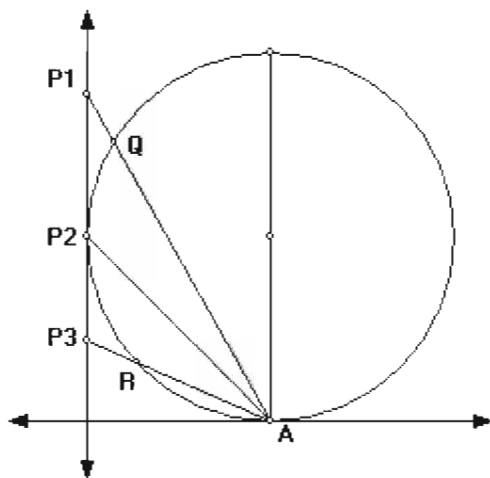
(1) $\frac{t_B(BC)}{t_P(PC)} = \frac{t_A(AC)}{t_P(PC)} \implies t_B(BC) = t_A(AC)$

(2)

Para terminar, usaremos los **conocimientos** adquiridos por medio del instrumento estudiado para resolver el problema que nos habíamos planteado:

LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

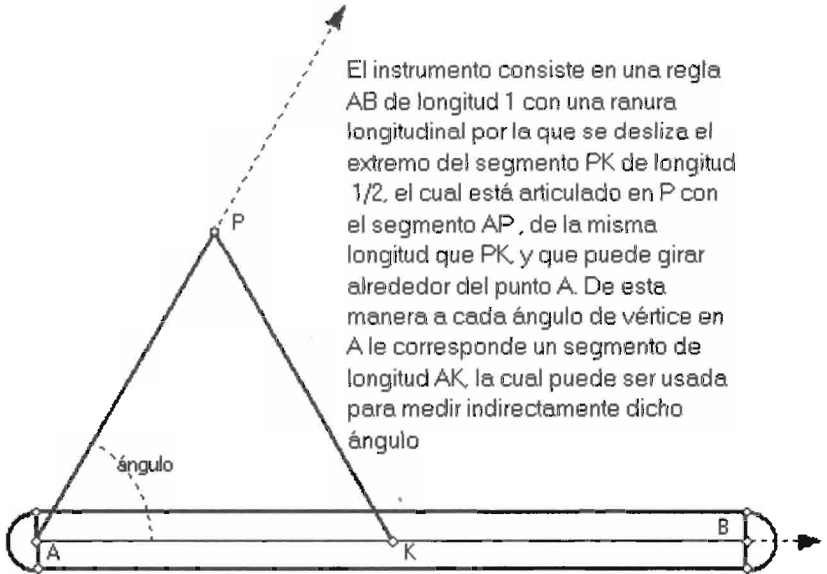
Si tenemos en cuenta el resultado teórico obtenido por medio del instrumento, observamos que los tiempos que tarda el móvil en caer desde los puntos Q, P₂ y R hasta A son iguales, por lo tanto el tiempo de P₂ a A es el menor, dado que en los otros planos inclinados el móvil ha de recorrer cierto espacio suplementario (el que está por fuera de la circunferencia), por lo que los tiempos serán mayores. La siguiente figura muestra la situación:



2) Un recurso didáctico.

Es decir, un objeto alrededor del cual se puede organizar diversas actividades orientadas a **diversos tipos de alumnos**. Alrededor de un instrumento se pueden diseñar actividades que van desde lo **artesanal** (uso de herramientas para su construcción) hasta la **formalización** más **abstracta** propia de la geometría que explica su funcionamiento, pasando por actividades **empíricas** (uso del instrumento para hacer observaciones y obtener información). De esta manera podemos intentar dar solución a uno de los grandes problemas planteado por las nuevas legislaciones educativas, las cuales tienden a asegurar el acceso a la educación de toda la población, independientemente de sus condiciones sociales, económicas, culturales, etc., lo que significa, por una parte, un avance en cuanto a la justicia social, pero, por otra, hace que los profesores se encuentren dentro de clase con

unos alumnos que quieren acceder a los estudios universitarios, junto a otros que no saben lo que quiere ser, y otros más que no quieren estar dentro de clase; sin embargo, hay que ofertar algo a cada uno de ellos. Pues bien, podríamos comenzar por proponer a los alumnos que no quieren estar en clase la construcción de un instrumento como el de la siguiente figura (llamado REGLA PARÁLACTICA):



Una vez construido, es muy posible que consigamos convencer a alguno de los alumnos que no tiene muy claro su futuro para que intente utilizar este instrumento para medir ángulos, después de que los que están interesados en alcanzar cierto nivel de conocimientos hayan investigado las relaciones geométricas necesarias para poder asociar a cada ángulo una longitud sobre la regla. De esta manera, la construcción del conocimiento recorre un camino que va desde la utilización de las manos (la artesanía) hasta ciertos niveles de abstracción, pasando por la adquisición de datos sobre lo que nos rodea usando instrumentos (el conocimiento empírico).

3) Un **almacén de conocimientos**, o lo que es lo mismo, un **libro** en el que está escrita la historia de la Ciencia. Estudiar la Ciencia

significa estudiar su historia, su génesis; y para ello hay que leer en estos libros por lo que debemos conocer el **lenguaje** en el que están escritos: LA GEOMETRÍA.

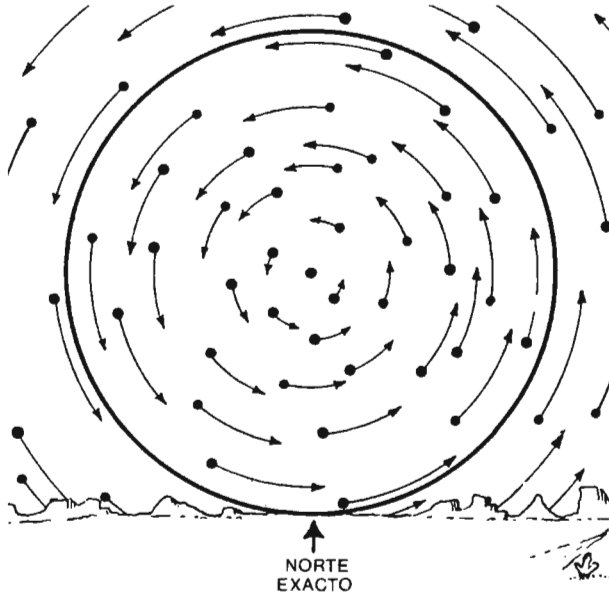
Un buen ejemplo para ilustrar esto último puede ser EL ASTROLABIO.



Es muy posible que la astronomía surgiera cuando alguien combinó la observación del cielo con la **memoria**. Si observamos el cielo una noche despejada veremos una infinidad de estrellas. Si lo observamos al cabo de un rato veremos que los astros han cambiado de posición, es decir, comprobamos que en el cielo hay **movimiento**. Repitiendo la observación y memorizando las posiciones anteriores de los distintos astros surge la idea de **trayectoria**: surge la **geometría del cosmos**, que más tarde se transformaría en Geometría simplemente.

Pero algo que se mueve espontáneamente no es **perfecto**, dado que si se mueve significa que no ocupa el lugar que le corresponde en un **cosmos ordenado**. ¿Quiere esto decir que el cosmos no es perfecto?. Para responder a esta pregunta observemos y memoricemos, es decir, hagamos geometría.

De esta manera surge una trayectoria que condicionará para siempre la geometría del cosmos: la circunferencia (¿la rueda?). En cualquier otra figura geométrica, si la hacemos girar cierto ángulo, sus puntos abandonarán la figura inicial; sin embargo, si hacemos girar una circunferencia alrededor de su centro, sus puntos siempre permanecerán dentro de la misma, es decir, es **inmutable**, o, dicho de otro modo, es **cerrada** con respecto al movimiento de rotación alrededor de su centro. En consecuencia, el único movimiento natural posible en un cosmos ordenado e inmutable es el que sigue una trayectoria circular, lo que hizo que el círculo y su extensión al espacio tridimensional, la esfera, se instauraran como las figuras geométricas básicas para la construcción de modelos explicativos del cosmos.



Surgen así las teorías de la antigüedad que van desde Eudoxo de Cnido (siglo IV a.C.), creador del primer modelo conocido que usaba esferas concéntricas para la explicación del movimiento de los astros, hasta Ptolomeo (siglo II d.C.), el cual fue capaz de proyectar la esfera celeste sobre un círculo lo que permitió la construcción instrumentos cuya geometría circular reproduce el "funcionamiento" del cosmos: el astrolabio, el nocturlabio, etc.

Estas teorías desarrolladas en el mundo helénico, junto con las aportaciones de las culturas orientales, así como las técnicas de construcción de instrumentos, fueron asimiladas y perfeccionadas por los árabes y difundidas en la Europa occidental durante la Edad Media.

Por último, podemos observar que las distintas “señales” que aparecen sobre los círculos que constituyen un astrolabio son las “huellas” dejadas por las aportaciones hechas a la astronomía a lo largo de los siglos, de manera que entender su significado (entender su funcionamiento) significa entender la historia de la astronomía, o lo que es lo mismo, entender la génesis del conocimiento astronómico. Y es evidente que esas señales están escritas en lenguaje geométrico sobre libros circulares que llamamos astrolabio, nocturlabio...

4) La **conexión** entre un **problema práctico o teórico** planteado en la sociedad en una época determinada bajo unas condiciones económicas, políticas, culturales, religiosas, etc. ; y una **teoría** científica, matemática, etc. más o menos abstracta. El estudio de este aspecto de los instrumentos nos permite efectuar planteamientos de tipo **interdisciplinar** en los que entran en juego materias relacionadas con todas las ramas del conocimiento.

EL RELOJ DE C. HUYGENS

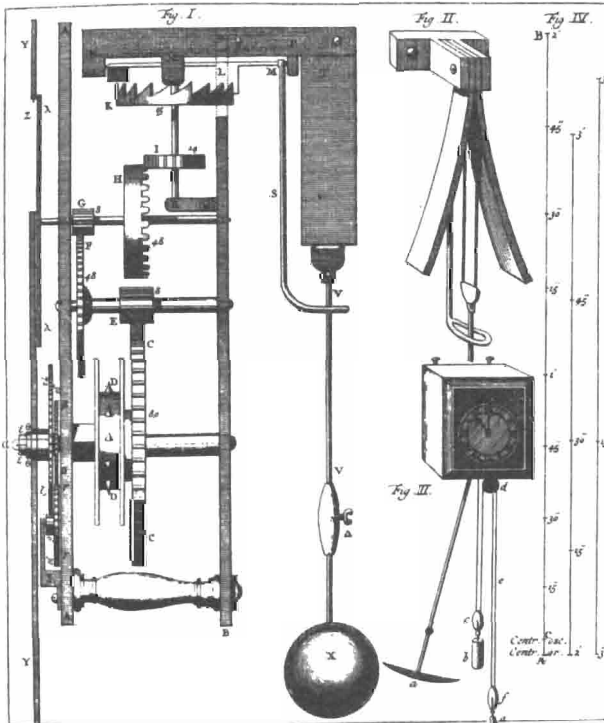
Uno de los problemas fundamentales con que se enfrentó la navegación durante la Edad Moderna fue el de la determinación exacta de la posición de los navíos en el mar. En el siglo XVI el problema de la determinación de la latitud estaba ya bien resuelto mediante la observación de la altura aparente de los astros en los diversos puntos del globo terrestre, no ocurría lo mismo con el de la longitud. La importancia de este problema era tal, dadas sus implicaciones económicas, políticas, geográficas etc., que se convirtió durante tres siglos en objeto permanente de investigación y en un verdadero reto para la ciencia de la época.

Desde el siglo XVI las monarquías europeas estuvieron interesadas en la solución de este problema y convocaron concursos internacionales, dotados de cuantiosos premios, para su resolución definitiva; además, se crearon juntas oficiales para discutir los métodos disponibles.

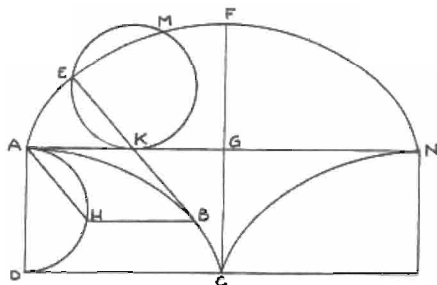
Los primeros intentos de solución surgieron de la Astronomía. En efecto, la observación de sucesos astronómicos cuando se hacía simultáneamente en lugares diversos permitía establecer fácilmente la posición. De este modo surgieron los métodos basados en la observación de los eclipses de Sol y de Luna, el de los satélites de Júpiter y, especialmente, el de las distancias lunares.

El escaso fruto de estos métodos, junto con las dificultades de cálculo para la elaboración de tablas, hizo que se dirigiera la atención hacia el uso de relojes que permitieran comparar la hora del puerto de origen con la del barco, deduciendo así la diferencia de longitud.

Uno de los intentos de solución se debe a Christian Huyghens, quien en el libro "HOROLOGIUM OSCILLATORIUM", publicado en 1673, describe, entre otras cosas, la construcción de un reloj de péndulo basado en las propiedades de la curva cicloide que funcionase en un barco, independientemente del movimiento de éste debido a las olas. Resulta ser una pro-



puesta de gran «belleza geométrica» debido a lo sorprendente de las propiedades de dicha curva.



La evoluta de una cicloide es otra cicloide, de forma que el péndulo, al oscilar, resulta ser tautócrono.

Los conocimientos teóricos asociados con estos instrumentos son fundamentalmente sus propiedades mecánicas, la BRAQUISTOCRONÍA y la TAUTOCRONÍA, y sus propiedades geométricas; que podemos encontrar en la obra de Huyghens ya citada: "Horologium Oscillatorium". Dichas propiedades pueden ser comprobadas empíricamente con los instrumentos mencionados en el apartado anterior y DEMOSTRADAS usando la Geometría Euclídea y los resultados sobre el movimiento de caída de graves obtenidos por Galileo.

