

Cómo el joven Galileo va construyendo su método de hacer ciencia y tecnología

EDVATIO PHYSICORVM



QVO NON ASCENDAM?

ISSN 1870-9095

Rafael Zamorano Ulloa¹, Ignacio Colín Durán¹, Verónica Lucero Villegas Rueda²

¹Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas IPN, Av. IPN S/N, UPALM Edificio 9, Col. San Pedro Zacatenco, CP 07038, CDMX.

²Departamento de Ciencias Básicas, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías Y Tecnologías Avanzadas IPN, Av. IPN, La Laguna del Barrio Ticomán, CP 07325, CDMX.

E-mail: davoizam@yahoo.com, vvillegasr@ipn.mx

(Recibido el 22 de octubre de 2024, aceptado el 16 de diciembre de 2024)

Resumen

Galileo es considerado “el padre de la física, y en verdad de toda la ciencia” en palabras de A. Einstein. Ya para 1604 describe su primera ley de movimiento de los cuerpos correcta y en forma matemática y se basa en cientos de experimentos con planos inclinados. ¿En qué momento se inició tal transformación? ¿Quién, quienes la impulsaron? Aquí encontramos que el Galileo científico ya apareció en su juventud, varios años antes de su invento del telescopio, 1609. En este trabajo describimos su evolución y etapas cruciales. Consideramos que para las nuevas generaciones es instructivo y motivante conocer más de cerca la evolución científica del joven Galileo

Palabras clave: Galileo Galilei, planos inclinados, la torre inclinada de Pisa, el telescopio.

Abstract

Galileo is considered “the father of physics and indeed of all science” in A. Einstein words. In the year 1604 Galileo describes his first law of motion of bodies correct and in mathematical form. It is based on hundreds of experiments with inclined planes. At what point in time that transformation took place? Who or what promoted or motivated such transformation? Here, we find that the scientific Galileo emerged during his youth, several years before his telescope invention in 1609. In this work we describe Galileo’s evolution and the crucial stages. We consider that for the new generations of scientists and technologists-to-be is instructive and motivating to know with some depth the scientific evolution of young Galileo

Keywords: Galileo Galilei, inclined plane, leaning tower of Pisa, telescope.

I. INTRODUCCIÓN

Galileo Galilei es sin duda un personaje pilar en la historia de la humanidad. Galileo es considerado como “el padre de la física, y en verdad de toda la ciencia” en palabras de A. Einstein pronunciadas en 1933 [1, 2, 3]. Otros científicos como Max Born en 1954 dicen: la actitud científica y métodos experimentales y la investigación teórica han sido los mismos a través de los siglos desde Galileo y seguirán siendo así. Y filósofos, como Bertrand Russell opinan similarmente. Menos sonoro, pero igual de impactante es la opinión de científicos actuales sobre su obra y su método. Para entender porque esto es así, empecemos desde su nacimiento. Galileo Galilei (1564-1642) crece en Pisa y Florencia durante el Renacimiento Italiano, época en la que se da un gran auge a la Arquitectura, Arte, Pintura, Escultura, Literatura, Música y el redescubrimiento y gran revalorización de los clásicos. La figura 1 muestra una vista panorámica de Florencia alrededor del 1500 y en donde está en apogeo el renacimiento. Un gran número de obras clásicas vuelven a ser traducidas y difundidas por toda Italia y Europa, gracias

a un interés renovado y a la imprenta. Entre ellos, y de forma importante están las obras de Arquímedes que representan el punto más avanzado, quizá, de la física (clásicos griegos) con desarrollos matemáticos importantes en forma geométrica, quizá inspirados por Euclides, y de proporciones matemáticas con teoremas y demostraciones. Estas traducciones de Arquímedes por el famoso Niccolo Tartaglia (Matemático 1499-1557) van a ser muy importantes en el desarrollo científico de Galileo desde su juventud, Galileo dice más adelante en su vida: «Todos los demás ingenios son inferiores al de Arquímedes y [...] poca esperanza puede quedar a cualquiera de poder descubrir alguna vez cosas semejantes». Galileo muy joven se convirtió en un gran, gran discípulo de Arquímedes y en un especialista en la física y métodos de Arquímedes y a partir de 1986 los aplica y amplía [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].



FIGURA 1. Florencia alrededor del 1500, al tiempo de Tartaglia y antes de que naciera Vincenzo Galilei, padre de Galileo. La Corte de los Medicis ya ésta muy bien establecida y es una familia de banqueros muy rica que es generosa otorgando recursos a artistas, poetas, literatos, músicos. Por varios años el papá de Galileo frecuentó la corte y recibió apoyo de ella.

Galileo Galilei fue crecido y educado, en un ambiente intelectual. Aunque de clase económica más bien media-baja. Su padre Vincenzo Galilei era un músico especialista en el laúd, ejecutaba con maestría y perteneció a un grupo “musical” con acceso a la corte de los Medicis donde el arte, la música, la escultura y literatura eran ampliamente promovidas y estimadas. (La familia “Gobernante” de Florencia, muy, muy adinerada y gran promotora de pintores, escultores, escritores y músicos y Matemáticos) [8, 9, 10, 11]. El padre de Galileo era un músico experimentado y le interesaba mucho la teoría musical y no aceptaba la teoría reinante en su tiempo debida a Gioseffo Zarlino por un tiempo Vincenzo se trasladó de Florencia a Venecia a estudiar con Zarlino que era considerado una autoridad musical en ese tiempo. De regreso Vincenzo se pone a hacer experimentos con cuerdas probando otros sonidos, otros tonos. Los historiadores proponen que el niño Galileo ya era expuesto a tales experimentos y quizá le ayuda a su padre [11, 12, 13]. A la edad de 10-11 años es mandado a estudiar en el monasterio de Vallombrosa a las afueras de Florencia y allí pasa varios años recibiendo una educación intelectual completa que veremos más adelante, así se va convirtiendo en un joven culto, intelectual del renacimiento.

Aquí ahondaremos en estas etapas de su juventud pasando como estudiante en la Universidad de Pisa, luego regresa, pocos años después como profesor de matemáticas, pero ya trae un bagaje imponente sobre Euclides y Arquímedes, luego pasará a la Universidad de Padua y se meterá de lleno a hacer experimentos con caída libre, planos inclinados, etc., todo esto es varios años anterior a su invención del telescopio y sus observaciones de la luna, la vía láctea, Júpiter, las manchas solares. Aquí vemos como el joven Galileo ya realiza experimentos del movimiento de los cuerpos, diseñados por él, que tienen ya la forma de experimentación actual.

Vincenzo también era teórico de la música y tenía completamente claro que para avanzar su teoría musical tenía que “probar”, ensayar sonidos “nuevos” que hicieran sentido, nuevos sonidos, tonos que apoyaran sus ideas (que

incluían una extensión de las proporciones de longitudes de cuerdas de Laud para generar notas musicales, o sea, además de las clásicas establecidas $1/2$, $2/3$, $3/4$, él ya podía probar que $3/7$, $2/5$, $4/9$, $17/23$, etc. podían también generar notas musicales en el laud) si la tensión de las cuerdas y sus longitudes eran adecuadas. Así de forma natural, el padre del niño Galileo hacia experimentos de sonidos con cuerdas tensionadas en su casa y en presencia de sus hijos, el mayor era Galileo y al mismo tiempo que su padre le enseñaba a tocar el Laud (como también a su hermano menor Michel Angelo) también lo “exponía” a sus experimentos, ensayos, exploraciones, pruebas y errores [11, 12].

II. DESARROLLO

A. Etapa cero: instrucción musical en casa. Desafiando la autoridad

Expuesto a experimentos musicales tensionando cuerdas y buscando notas musicales por parte de su padre Vincenzo Galilei. Vincenzo como teórico de la música tenía completamente claro que para avanzar su teoría musical tenía que “probar”, ensayar sonidos “nuevos” que hicieran sentido, nuevos sonidos, tonos que apoyaran sus ideas (que incluían una extensión de las proporciones de longitudes de cuerdas de laúd para generar notas musicales, o sea, además de las clásicas establecidas ($1/2$, $2/3$, $3/4$, él ya podía probar que $3/7$, $2/5$, $4/9$, etc. podían también generar notas musicales en el laúd). El aprendizaje de ejecutar experimentos acústicos buscando ciertos objetivos estaba ya incitando la curiosidad, y preguntas en ambos, padre e hijo. Los sonidos producidos, los cambios en el diseño que hiciera su padre una y otra vez estaban siendo absorbidos, asimilados por el pequeño Galileo. A la edad de 10-11 años es matriculado en el monasterio de Vallombrosa a unos 27 km de Florencia y ahí permanece unos 5 años (su pubertad y parte de su adolescencia).

B. La primera gran etapa de instrucción académica e intelectual

• EL MONASTERIO DE VALLOMBROSA 1575-1581

Ya allí en el monasterio de Vallombrosa recibe una completa educación religiosa y una rica educación intelectual que incluyó: Letras, latín, Retórica, Literatura, Música y Matemáticas elementales. Se dice que tal monasterio daba hospedaje a artistas, pintores, poetas que anduvieran de paso por Florencia. El mismo Abad del monasterio era un padre muy culto que tenía gran interés por algunas de estas ramas, inclusive se dice que era un polimath (persona muy interesada e informada en una amplia gama de áreas del saber y de la literatura, música, arte, etc.) y que esta personalidad también marco al joven Galileo en su amplio interés de aprendizaje intelectual. La figura 2 es una vista del monasterio que además de instrucción religiosa era un “lugar de cultivo” de conocimiento, artes, literatura. Los monjes tenían cierta libertad para indagar el (los) campos que quisieran.

Vallombrosa parece haber cultivado un ambiente intelectual “muy” renacentista cultivando muchas áreas de la cultura universal. Cuando Galileo tiene aproximadamente 15-16 años su padre lo saca del monasterio (Galileo mostraba tendencia a tomar los hábitos y su padre tenía otros planes para él) para matricularlo en la universidad de Pisa como estudiante de Medicina. Deseo más de su padre que de él mismo.

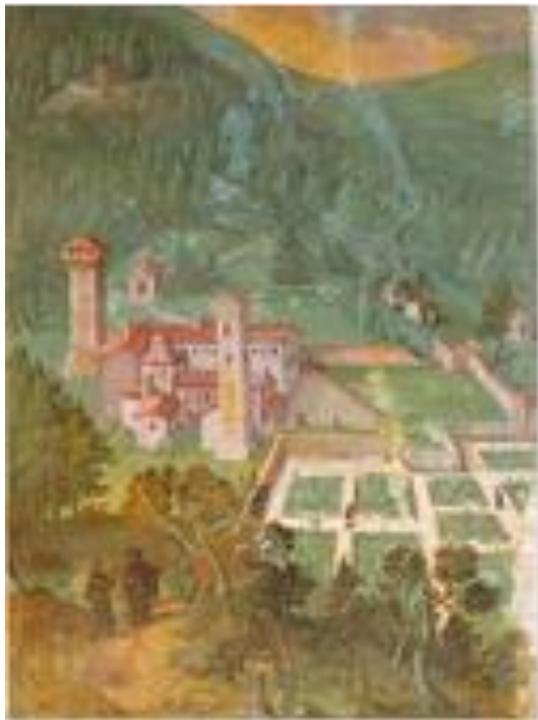


FIGURA 2. Monasterio de Vallombrosa donde el adolescente Galileo recibió una importante educación intelectual, formal y artística propia del renacimiento. Aquí los monjes enseñaban a los estudiantes y ellos mismos seguían sus propios intereses intelectuales. Ello ya es enseñanza a los estudiantes de seguir su propio camino intelectual e independizarse en sus ideas, pensamientos y proyectos, esto va de la mano con las enseñanzas de su padre y del propio camino independiente que siguió su padre en su búsqueda de una mejor teoría musical.

- **ENTRA COMO ESTUDIANTE DE MEDICINA A LA UNIVERSIDAD DE PISA A LOS 16 AÑOS**

El Aristotelismo, la filosofía natural, son la base de su preparación. Se llevan a cabo las “Disputatio philosophae” que incluyen una gran dosis de estudio del movimiento siguiendo la física de Aristóteles y sus métodos especulativos junto a su “Análisis Posterior”. Las deducciones teóricas a partir de los principios (¿hipótesis?) de Aristóteles son la base de estudio, sin matemáticas, sin experimentación. Algunos filósofos-profesores de cierto renombre en la época de Galileo son: Niccolo Tartaglia, Giambattista Benedetti, Guido Ubaldo, Por otro lado en el colegio Romano (Roma, Jesuitas y muy conectados con el Papa) muy afamado por su gran nivel filosófico (Aristotélico) en general y en filosofía natural en particular, Galileo se hizo de fuertes adversarios conforme incluye las matemáticas de Arquímedes y la experimentación en su

filosofía natural. En ambas instituciones las discusiones especulativas sobre el movimiento de los cuerpos y sus causas (de primera a 4ta causas de Aristóteles) en la caída libre de los cuerpos ligeros, por un lado, y los pesados por otro y la comparación de caída libre de uno ligero vs. uno pesado y/o constituidos de materia diferente como metal hierro, cobre, o madera, eran temas cotidianos en tiempos de Galileo.

Los resultados encontrados en plena época de Galileo en Pisa (y algunos anteriores) eran controversiales, no había consistencia de las observaciones, ¡¡unos decían que caían en igual tiempo sin medirlo!! (no había relojes), otros que caían a tiempos diferentes, solo la observación y la percepción estaban involucradas, así que las discusiones filosóficas (muy bien argumentadas y con retórica sólida) se iban al infinito. Era obligatorio asistir todos los viernes a las disputatio de philosophae naturalis donde en cada sesión un profesor iniciaba con una proposición, sobre movimiento, e iniciaba la “disputatio” interviniendo profesores y alumnos y el formato era a manera de preguntas y había que darles respuesta. Experimentación, medición, relaciones matemáticas eran totalmente secundarias y hechas a un lado, si es que las había en una mínima expresión. La lógica, el modo de argumentar, la retórica y las causas del movimiento eran lo más importante. Galileo dirá poco después “yo prefiero estudiar y encontrar resultados más particulares (de casos concretos) de movimiento, vr.g. sólo caída libre o movimiento de proyectiles, que entrar en esas discusiones tan generales y especulativas”. En el seno de las clases, de las enseñanzas, de las “disputatio” semanales está surgiendo un Joven Galileo que prefiere la experimentación, la medición y la matematización del movimiento para casos concretos y así, también se aleja un tanto de buscar las causas, primero quiere encontrar las relaciones (proporciones) matemáticas.

De esa época o un poco posterior puede ser la anécdota de su descubrimiento del isocronismo de péndulos al observar las oscilaciones (pequeñas) de una lampara de la catedral de Pisa. La figura 3 contiene dos representaciones distintas del hecho observacional de Galileo. En estas pinturas se plasma un momento cumbre de la curiosidad y observación profunda que ya tenía a esa edad. Además de observar el simple vaivén de la lampara, se percata que para unas “pocas” oscilaciones, están duran igual tiempo en completar sus ciclos.

Ahora sabemos que esta relacionando movimiento periódico-cíclico con tiempos de duración, ósea períodos que el estimaba iguales y los correlaciona con su propio pulso, así su pulso le sirve de un reloj (no tan preciso) suficiente para proponer isocronismo. De cualquier forma, esta anécdota apunta a una curiosidad singular por fenómenos naturales de movimiento. Ya correlaciona movimiento con tiempo de duración de forma, podemos decir, semicuantitativa, ya está intentando incorporar una estimación (más no medición precisa) del tiempo en su entendimiento de este movimiento pendular. A partir de su juventud y hasta el final de su vida estudiará el movimiento de péndulos y sus relaciones entre tensión, longitud de cuerdas, tiempos de oscilación.



FIGURA 3. Dos representaciones de la anécdota de su observación de la lámpara oscilando en la catedral y que Galileo la visualiza como un péndulo oscilando sincrónicamente.

III. ENCUENTRA EL AMOR DE SU VIDA: LAS MATEMÁTICAS YA COMO ESTUDIANTE DE MEDICINA EN LA UNIVERSIDAD DE PISA

Conoce en ~ 1583 al afamado matemático Ricci, queda prendado de la precisión de las matemáticas de Euclides y Ostilio Ricci lo introduce también a los trabajos de Arquímedes. Para 1583 encuentra el amor de su vida que serán las matemáticas. Ostilio Ricci, un maestro de matemáticas afamado y que gustaba de aplicaciones matemáticas del cual, escuchando una conferencia, a la cual Galileo asistió, lo impactará para siempre. El joven Galileo decidido le pide ayuda a Ricci para convencer a su padre que la medicina no es lo suyo, sin embargo, las Matemáticas sí. Ricci descubre en el joven Galileo grandes aptitudes para las matemáticas y una gran sed de conocimiento, así Ricci accede a hablar con el padre de Galileo para convencerlo de la recién descubierta vocación de su hijo. Vincenzo Galileo accede ante los argumentos de Ricci que le manifiesta que Galileo tiene grandes aptitudes para las matemáticas, así Ricci lo instruye en la Geometría de Euclides, con todo su formalismo, con todos sus teoremas y demostraciones y en los trabajos de Arquímedes. Galileo ve y absorbe geometría, matemáticas de proporciones, métodos y teoremas de estos grandes clásicos griegos.

• REGRESA A FLORENCIA EN 1585 PARA VOLVERSE MATEMÁTICO

Al prepararse intensamente en la Geometría de Euclides y Física y matemáticas y métodos de Arquímedes descuida sus estudios de medicina, estudios que no le llamaban la atención. Para 1585 abandona sus estudios de medicina en Pisa, sin graduarse, y regresa a Florencia y continúa profundizando en Matemáticas, Euclides y Arquímedes. Para 1586 ya da clases particulares de Matemáticas a hijos de cortesanos y nobles. En este tiempo, al repasar la historia del Eureka de Arquímedes en la tina de baño donde descubre el fraude de la hechura de la corona del rey Hieron que no es de puro oro sino una mezcla de oro con plata, por medio del diferencial de volumen de agua que expulsa de la tina una y otra “corona” (piezas modelo), Galileo, a la edad de 22 años, indica que ese método no es lo suficientemente

preciso para detectar la diferencia y dice que tal observación de sólo determinar el fraude por observar la diferencia de agua desplazada de la tina es demasiado crudo y grotesco para ser achacado al gran Arquímedes y propone que Arquímedes debió usar una balanza más fina, precisa, como la que Galileo describe y diseña y fabrica y usa y publica. La figura 4 muestra una representación de tal balanza. Con esto Galileo “cree”, está seguro de que está avanzando, mejorando la medición de los pesos específicos de los dos cuerpos y detectando la pequeña diferencia (modernamente calculada de 1.7 mm a 2.3mm) de altura. Con esto Galileo a la edad de 22 años entra al mundo de la experimentación, mediciones más precisas (el busca como un objetivo una mayor precisión de estas medidas), diseño y fabricación de equipo de medición (balanza). Galileo aquí genera una continuación técnica y científica de Arquímedes y lo mejora en precisión usando su física de palancas y de hidrostática. Galileo es, aquí, una continuación científica de Arquímedes con aproximadamente 2000 años de discontinuidad! Justo aquí estamos presenciando un momento crucial en la transformación científica de Galileo. La demostración irrefutable esta en el contenido y la descripción de la Bilancetta con el detalle descrito de como alcanza la mayor precisión que reporta. La figura 4 muestra una foto de la pasta original del libro “Bilancetta” publicado en 1586. Ya publicado lo usó para dar clases y seminarios sobre este tema.



FIGURA 4. Un modelo de la balanza diseñada y construida por Galileo para darle más fundamento cuantitativo a la medición y descubrimiento de Arquímedes. A la derecha la primera página de la publicación.

IV. ESCRIBE SU PRIMEL LIBRO LA BILANCETTA, PROPONE UN MÉTODO MEJOR, MAS PRECISO PARA OBTENER LOS RESULTADOS DE ARQUIMIDES

Publica su primer libro “la Bilancetta” en 1586 donde describe su construcción, el cómo opera y como mide con mayor resolución. La medición del equilibrio de las palancas en ambos brazos de la balanza es una obra de arte experimental Se dice que usó cuerda de Laud enrollada a la manera de solenoide y re-pasaba de una vuelta a la siguiente con una especie de peine que producía sonido que le permitía terminar de balancear ambos brazos ¡muy preciso! Estamos presenciando aquí ya un Galileo joven

transformándose en científico siguiendo los pasos de Arquímedes.

Existe también la anécdota, ya mencionada arriba, que puede ser previa a esta fecha sobre su observación de las oscilaciones (de péndulo) de una lámpara en la catedral de Pisa mientras en misa y se da cuenta que las oscilaciones (¿pequeñas?) parecen durar el mismo tiempo, o sea son isocronías se dice que tal observación la checo con su pulso, mientras observaba las oscilaciones. De regreso a casa y según una leyenda y con unos amigos montaron varios péndulos los pusieron a oscilar y checaron el isocronismo de ellos con sus pulsos y observaron también la “constancia” de la amplitud de movimiento para unas cuantas oscilaciones. Parece que esta anécdota la recuerda Galileo a sus 70 y tantos años de edad cuando está recapitulando etapas de su vida y de su trabajo junto con el joven Viviani que se convertirá en su primer biógrafo.

Este evento “anecdótico” también pudo haber sucedido más o menos al tiempo del trabajo de la Bilancetta o posterior pero quizá anterior de su ida de regreso de Pisa en 1589 ya como profesor de matemáticas. Muchos años después seguirá experimentando con péndulos y encontrando leyes de su movimiento.

De esta manera vemos que a su edad de 22 años (aproximadamente) alrededor de 1586 Galileo Galilei muestra su gran interés en fenómenos físicos en péndulos, cuerdas bajo diferentes tensiones y tonos (experimentos de su padre) los comentaba en casa, el problema de medir pesos específicos y sus diferencias como en el caso de la corona del rey Hieron. Los problemas de la física mencionados son puntuales, casos particulares y no teoría del comportamiento físico de la naturaleza bajo principios filosóficos generales, tipo Aristóteles. A esta edad ya se ha alejado grandemente de Aristóteles y acercado y aprendido de Arquímedes y Euclides e inyectando una originalidad galileana. Esta aproximación experimental hacia la naturaleza y por casos individuales diverge totalmente del enfoque de la filosofía natural Aristotélica basada en principios universales a la cual ya fue expuesta durante sus 5 años de estudiante de Medicina de la Universidad de Pisa y que volverá a revivir de regreso a Pisa de 1589-1592 como profesor de matemáticas y luego en la Universidad de Padua en la que estuvo 18 años los mejores de su vida (manifestado por el mismo).

- DEMUESTRA UN TEOREMA SOBRE CENTROS DE GRAVEDAD QUE LE GENERAN CIERTA FAMA ENTRE MATEMÁTICOS

Sabemos con certeza que ya para 1587 es un especialista en Arquímedes y en este tiempo demuestra un teorema importante sobre centros de gravedad con pesos desiguales, distribuidos no regularmente a lo largo de una barra sólida. Este teorema y su demostración sobre equilibrio de centros de gravedad le trae cierto renombre entre matemáticos y le abre el camino para una gran recomendación para concursar por una plaza de maestro de matemáticas en la U. de Pisa, plaza que gana y es contratado como maestro de matemáticas, aunque con un salario muy bajo.

V. ENTRA COMO MAESTRO DE MATEMÁTICAS A LA U. DE PISA. SE LLENA HASTA EL COPETE DE ARISTOTELISMO EN TODAS SUS FORMAS

No le convencen discusiones y especulaciones hasta el infinito como medio de obtener conocimiento, se da cuenta que esa forma académica lleva cientos y cientos de años sin establecer un verdadero conocimiento y definitivo de la naturaleza. Sin embargo, al revisar los trabajos de Arquímedes sí que lo hay, se clava por esa línea. No le asusta explorar nuevos caminos para el conocimiento, además los métodos (científicos) de Arquímedes y Euclides ya están hyper probados, aunque cayeron en desuso por más de mil años durante el medioevo europeo y por la quema de la biblioteca de Alejandría. Esa actitud de regresar a los clásicos probados esta impresa en un buen número de autores, intelectuales, renacentistas. El Renacimiento es en buena medida regresar a los clásicos, es recuperar a los clásicos y sus grandes obras, ya sea arquitectura, escultura, poesía, física (de Arquímedes) y matemáticas (principalmente Euclides), esto y las acciones, explorativas, experimentales de su padre le inoculan de tanto Aristotelismo Pisano con sus disputatio semanales, el decide buscar otro camino para obtener conocimiento y encuentra las matemáticas y las empieza a aplicar al movimiento de los cuerpos

Pronto ya de regreso como profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa se interesará de lleno en el movimiento de los cuerpos: a) Caída libre; b) Movimiento uniforme; c) Movimiento uniformemente acelerado; d) Movimiento relativo en un barco que se mueve; e) Movimiento de proyectiles (tiro parabólico) f) Movimiento de péndulos.

- ESCRIBE EL DE MOTU ANTICUORUM APROX 1590, YA INTRODUCE IMPETU Y PROPORCIONES A LA ARQUÍMEDES. AQUÍ SUS PRINCIPIOS SIGUEN SIENDO LOS DE ARISTÓTELES

Entre 1589 – 1592 escribe (por partes, por secciones) su manuscrito sobre movimiento “De Motu Antiquorum” que nunca publica y que quizá usa en sus clases en la U. de Pisa. Conoce con gran detalle su contenido, el movimiento de los cuerpos. En Motu se ve claro el rechazo a la autoridad dogmática de Aristóteles, la introducción de conceptos no Aristotélicos como el ímpetu ya introducido siglos atrás. Su análisis es Galileano, pero dentro de una física Aristotélica (toda errónea) con la búsqueda incesante de las causas de porque se mueven los cuerpos. Varios aspectos del movimiento son corregidos ya por Galileo, pero muchos otros quedan totalmente Aristotélicos. No se sabe porque Galileo no publicó Motu, existe la hipótesis de que no lo publicó porque se sentía insatisfecho de dicho tratamiento que no le terminaban de convencer varias de las descripciones “Antiquorum”. Si esto fuera cierto, se tardó toda su vida en corregir los errores, encontrar resultados experimentales irrefutables y explicados con su nueva física tal como lo hace en su último libro que publica en

1638 pocos años antes de morir ya enfermo y perdiendo la vista a gran velocidad, ¡ahh! y en arresto domiciliario por la condena de la inquisición [13].

Aquí estamos en un momento palpable, como si fuera una fotografía, de su proceso de transformación. Nunca publica tal obra, se ha propuesto que fundamentalmente las usaba en sus clases, porque no se sentía plenamente convencido ni satisfecho con tal *Motu Antiquorum*, que significa algo así como el movimiento como lo vieron los antiguos, al que, Galileo, consideraba que necesitaba ser modernizado, actualizado, pero no sabía exactamente cómo hacerlo. Al cabo de los años y ya en Padua encontraría el modo.

- EN 1592 PASA DE LA U. DE PISA A LA U. DE PADUA GRACIAS A UNA GRAN RECOMENDACIÓN Y CON UN SALARIO 3 VECES MAYOR

Galileo dirá más adelante que los 18 años que vivió y trabajó e hizo ciencia en Padua fueron los más felices de su vida, la figura 5 muestra una imagen de Padua antigua, del siglo XVII, y su catedral al tiempo que Galileo vivió y se juntó con María Gamba y tuvo sus tres hijos allí.



FIGURA 5. La ciudad de Padua más o menos al tiempo de la estancia de Galileo. A la derecha la catedral de Padua

VI. INVENTOS E INSTRUMENTOS DE GALILEO. LA BILANCETTA Y POSTERIORES A ELLA

Para sus observaciones y mediciones, siempre, desde el primer instrumento, buscando una mayor precisión en sus medidas construyó varios instrumentos, la figura 6 muestra algunos de ellos, presentados en orden cronológico.

- SUS EXPERIMENTOS EN CAÍDA LIBRE, MOVIMIENTO PARABÓLICO, PLANOS INCLINADOS. MANUSCRITOS ORIGINALES COMO SI FUERAN NOTAS DE LABORATORIO.

Su interés, su preocupación por entender mejor el movimiento se refleja en experimentos que realizó quizá desde que estaba en Pisa (como la anécdota de bolas en caída libre desde la torre inclinada de Pisa que él mostró a estudiantes y profesores). Tales experiencias-demonstraciones ya eran populares en su época y aún años subsiguientes hechas por profesores de filosofía natural sin

mayor control, no medición del tiempo (no existía) y resultados contradictorios. En pocos años Galileo se mete de lleno a experimentos en el movimiento de los cuerpos, algunos folios originales (originales muy desgastados) se muestran en la figura 7.



FIGURA 6. Algunos de los instrumentos construidos por Galileo. A) La bilancetta (1586) en Florencia, B) El compás militar (1607) en Padua, C) un termoscopio, D) el telescopio (1609) en Padua.

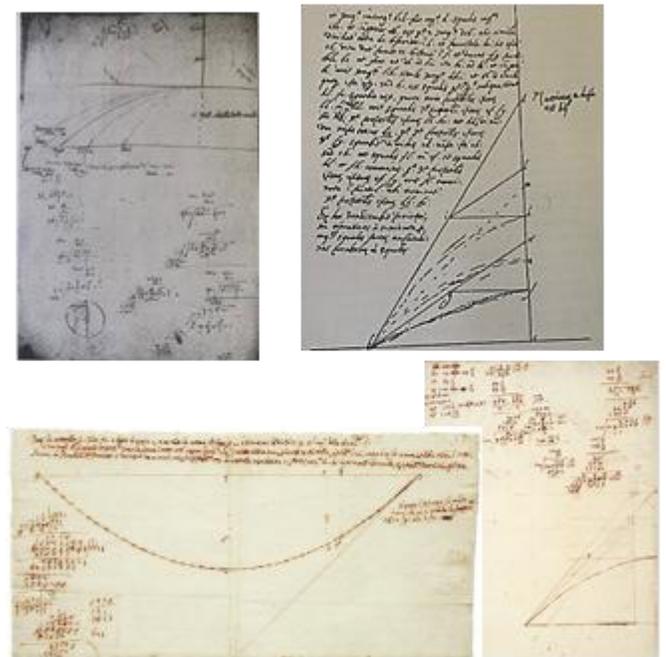


FIGURA 7. Esquemas originales, manuscritos, de Galileo que muestran su actividad científica (al modo moderno), nótese que hace apuntes, toma mediciones numéricas, se equivoca, corrige, hace tablas de valores, diagramas con triángulos “de velocidades”, proposición de trayectorias. La mayoría de estos experimentos se cree, datan de 1600 a 1609. Los folios están muy desgastados en la misma biblioteca de la ciencia de Florencia.

Su interés en el movimiento de los cuerpos continúa, si no es que crece, sin duda, cuando pasó a la Universidad de Padua desde 1592. Han aparecido hojas manuscritas originales de su puño y letra, llamados folios, redescubiertas mayormente en el siglo XX. La figura 7 muestra algunos folios (que están resguardados en la biblioteca nacional de ciencia en Florencia, Italia, de los cuales se tomaron fotos que se presentan aquí. Especulaciones de algunos historiadores de la ciencia sobre si realmente Galileo hizo experimentos reales, además de los experimentos pensados (que Galileo mismo reporta) y de experimentos anecdóticos que tal vez él nunca realizó, han sido completamente invalidadas por estos manuscritos [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] que presentamos en no orden particular, véanse figuras 7 y 8.

Los folios manuscritos de Galileo indican con claridad sus experimentos con bolas rodando y bajando planos inclinados, análisis geométrico a un lado, tablas de valores en otra parte de la hoja. Otros folios muestran tiro parabólico, movimiento horizontal. Estos folios son más hojas de trabajo que reporte de investigación. Como son hojas sueltas no sabemos si el mismo Galileo las preservaba en algún orden o las mantuvo separadas sin una clasificación particular.

Las figuras 7 y 8 muestran algunos de estos folios originales junto con reproducciones modernas hechas por diversos historiadores de la ciencia (v.gr. S. Drake). Es común encontrar correcciones en ellos, corrigiendo por mediciones nuevas o por variación en el modelo que esté pensando si ajusta mejor los datos o no. Esta actividad experimental repetida y repetida con cambios de paradigma son, sin duda, actividades científicas muy parecidas a como ejecutamos experimentos en el laboratorio hoy en día [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Este Galileo realizando estos experimentos de mecánica entre 1600 y 1609 cuyas algunas notas de laboratorio han sido recuperadas puede ser confundido con un maestro de física en el laboratorio actual de mecánica. La única diferencia sería la vestimenta que lo delataría como un personaje de los inicios de los 1600's y ser contemporáneo de Descartes, de Francis Bacon, Boyle y otros. Aquí tenemos ya, sin duda un científico moderno, como lo son hoy en día, ya plenamente desarrollado y acumulando más y más experiencia y conocimiento. Y esto justo los años anteriores al telescopio que construyó en 1609 y con el cual realizó grandes descubrimientos astronómicos y con los cuales obtuvo fama mundial casi instantánea y logró que la casa de los Medici el título de Astrónomo y matemático de la corte. Además, con un salario, también, de muy buen nivel. La figura 9 muestra a Galileo mostrándole el uso y el alcance de su telescopio al Príncipe Giovanni de Medici. Que su nuevo nombramiento fuera ambas cosas resalta la importancia de ser matemático tanto como astrónomo de este alto nivel.

Este título lo solicitó el personalmente al Conde Ferninand de Medici. El Galileo que llega al telescopio es un científico ya hecho y con ciertos años de experiencia, al menos unos 5 años (desde 1604 mostrado por su carta a su amigo Paolo Sarpi). Pero a los resultados que describe en su carta de 1604 no se llega de la noche a la mañana, podemos suponer que para 1604 ya llevaba varios años incursionando y construyendo su modo propio de hacer física.

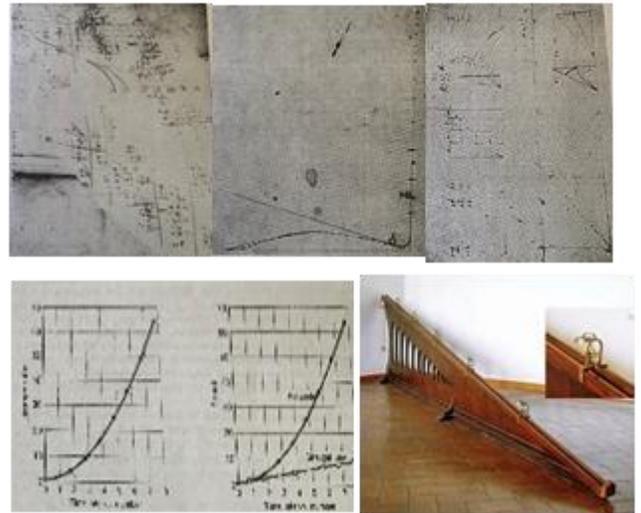


FIGURA 8. Más esquemas originales, manuscritos, de Galileo que muestran su actividad científica (al modo moderno), nótese que hace apuntes, toma mediciones numéricas, corrige, hace tablas de valores, diagramas con triángulos “de velocidades”, proposición de trayectorias, escribe más de una vez sobre la misma hoja en tiempos distintos con tintas distintas. Incluimos representaciones modernas de dichos experimentos. El plano inclinado mostrado fue usado por Galileo en sus experimentos. La mayoría de estos experimentos se cree, datan de 1601, hasta 1609 [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

La fecha en que realiza su primer experimento con planos inclinados, diluyendo el efecto de la gravedad y midiendo el tiempo de caída con un reloj de agua de su invención marcan el inicio de su nueva física, la física tal como la conocemos hoy.

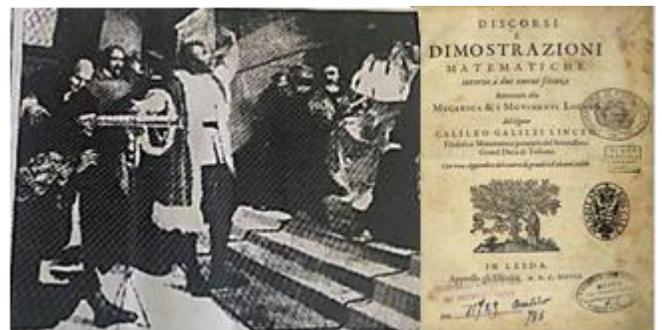


FIGURA 9. A) Ante el príncipe Giovanni de Medici en la corte Galileo le muestra el instrumento y las observaciones de la Luna, Júpiter, La Vía Láctea. Esta demostración impactó al príncipe y a muchos más y le valió ser nombrado Matemático y Astrónomo de la casa de los Medici, un gran honor que vino acompañado de un gran salario y el privilegio de no dar clases. B) La pasta de su obra cumbre de física ya al final de su vida: Discursos y demostraciones matemáticas de dos nuevas ciencias.

Este proceso de transformación, nos gusta aparejarlo al del nacimiento de una mariposa ya volando a partir de que se desarrolla en el capullo: la crisálida se convierte en mariposa. El momento de la apertura del capullo, sin duda, está marcado en la carta de 1604 que manda a su amigo Sartri donde con emoción le anuncia que acaba de descubrir su primera ley del movimiento que es que para caída libre el

desplazamiento vertical es proporcional al cuadrado del tiempo, $s^2 \propto t^2$, la cuál es correcta, y que la velocidad del móvil es proporcional al desplazamiento, $v \propto s$ (la cual es incorrecta) se da cuenta y en poco tiempo la corrige a $v^2 \propto s$.

Ha nacido un Galileo Galilei científico, ha nacido la ciencia moderna tal como la conocemos. Este trabajo culmina aquí, aunque la vida y obra de Galileo sigue y es muy extensa.

VII. CONCLUSIONES

Galileo dedicó 72 años de su vida trabajando en problemas de mecánica y de astronomía, además de enfrentar a la inquisición. Los primeros escritos de mecánica de Galileo: *De Motu Antiquora* pertenecen definitivamente a una pre-evolución científica. Ya para 1604 describe su primera ley de movimiento de los cuerpos correcta y en forma matemática. Tal transformación se dio en su juventud cuando decide irse por las matemáticas, aún quizá antes cuando acompaña a su padre Vincenzo en sus experimentos musicales y aprendió a desafiar la autoridad super establecida (en este caso Aristóteles). Estos momentos en su vida son parte de su transformación. Su padre Vincenzo, los académicos del monasterio Vallombrosa, su maestro de matemáticas Ostilio Ricci, Arquímedes, Euclides y los filósofos naturales de su época impulsaron tal transformación. Galileo es un genio único, singular, y encontramos que el Galileo científico (en el sentido moderno) ya apareció en su juventud. Ya en 1586 cuando publica la Bilancetta, a la edad de 22 años, su exploración en las profundidades de Arquímedes y Euclides. Aquí hemos repasado como se fue dando tal transformación a lo largo de su juventud. Luego conoce al amor de su vida, las matemáticas y su vida da un giro de 180° en ese momento. Consideramos que, para las nuevas generaciones de matemáticos, físicos, médicos, ingenieros, robóticos, biólogos, etcétera, es revelador, instructivo y hasta motivante el conocer más de cerca la evolución académica y científica del joven Galileo, el cómo Galileo fue construyendo su método de hacer ciencia a lo largo de su vida.

REFERENCIAS

[1] De Angelis A, Galileo Galilei's "Two New Sciences" For Modern Readers, History of Physics Series, (Springer Nature Switzerland, 2021). ISSN 2730-7549

- [2] Righini, M.L., Shea, W., Reason, R., *Experiment, and Mysticism in The Scientific Revolution*, (SHP Science History Publications, New York. USA, 1975)
- [3] Shea, W. R., *Galileo's Intellectual Revolution*, (McMillan, Ed. USA, 1973).
- [4] Drake, S., *Galileo, A Brief Insight with Illustrations*, (Sterling Publishing, New York, USA, 2010).
- [5] Palmerino, C. R. y Thijssen J. M., *The reception of the Galilean Science of Motion in the Seventeenth Century Europe*, (Springer Science+Business media 2004).
- [6] Drake S., *Mathematics and Discovery in Galileo's Physics*, *Historia Mathematica I*, 136-137 (1976).
- [7] Corcho R., *El Método Científico. La Naturaleza se escribe con fórmulas*, (National Geographic, Ed. RBA. España 2012).
- [8] Libio, M., *Galileo and the Science Deniers*, (Simon & Schuster, New York, USA. 2017).
- [9] *My History Lab*, chp. 17. The Scientific Revolution **17**, 525-551 (2021).
- [10] Brezina, C., *Galileo Galilei, Leaders of the Scientific Revolution*, (Rosen Publishing Group, New York, USA. 2018).
- [11] Palisca, C., *Renaissance Music and Experimental Science*, *J. of the History of Ideas* **31**, 483-500 (1970).
- [12] Drake, S., *The Role of Music in Galileo's Experiments*, *Scientific American* 98-104 (June 1975).
- [13] Galilei, G., *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, (traducción al español por J. San Román Villasante, Biblioteca de Obras Maestras del Pensamiento, 2003, Ed. Losada, 1945, Buenos Aires, Argentina. 2003) ISBN: 950-03-9213-5.
- [14] Álvarez, J. L., Marquina, J. E., *Rev. Ciencia UNAM*, **26**, 15-26 (1992).
- [15] Drake, S., *Galileo's Work on Free Fall in 1604*, *Physics* **16**, 309-322 (1974).
- [16] Drake, S., *Impetus Theory Teapt, with illustrations raised*, *J. of the History of Ideas* **36**, 38-41 (1975)
- [17] Drake, S., *Acceleration, Space and Time*, *British J. History Siense* **5**, 23-24 (1970).
- [18] Hall, A. R., *Another Galilean Error*, *Isis* **50**, 261-262 (1959)
- [19] Drake, S., *The Uniform Motion Equivalent to a Uniformly Accelerated Motion From Rest*, *Isis* **63**, 28-38 (1972).
- [20] Cavicchi, E., *Watching Galileo Learning*, (Explorations in College Algebra, Jhon Wiley & Sons, New York, USA, 2022), pp. 585-595.