



LO QUE NO VIO STILLMAN DRAKE EN GALILEO. PARTE 2

Introducción

Esta segunda entrega del tema relacionado con la obra póstuma de Galileo Galilei, publicada en Leyden (Holanda) en el año 1638, titulada *Diálogo sobre dos Nuevas Ciencias* originalmente escrita en idioma italiano de la época, relatan algunos estudios recientes sobre los teoremas que aparecieron en esta obra, en los diálogos de tres interlocutores Sagredo, Salviati y Simplicio, que representaban las tendencias científicas de la región, pero traducida al Francés por miedo a las consecuencias de alguna disgresión religiosa que se le había aplicado a Galileo.

Esta obra, contiene cuatro "días" de diálogos entre los tres personajes señalados y recoge explicaciones acerca de "el movimiento de los proyectiles" y buena parte del material que le había indicado en carta a su amigo Arrighetti en 1633, acerca de la resistencia de los sólidos que yo he llamado: los inicios de la "teoría de la resistencia de los materiales".

Parece ser que la obra también contenía un quinto día de diálogos entre los tres interlocutores con enunciados referidos a la "fuerza de percusión y el uso de la catenaria". Sin embargo, en la medida que el libro salía de la imprenta de los Elzevir, se vieron ansiosos a publicarlo, sin la inclusión de ese material, bajo el nombre de "*Diiscorsi e Dimostrazioni Matematiche, Interno a Due Nueve Scienze*".

En esta ocasión, vamos a procurar indagar sobre los métodos, unidades y equipos utilizados para determinar los tiempos utilizados por la caída libre de

Ing. Joseba A. Lascurain
Ingeniero Civil, Industrial UCAB) Master of Science (Harvard)
Profesar Titular UCAB)

los cuerpos y, en particular, de los cuerpos esféricos deslizando en planos inclinados.

La medida del tiempo según Galileo

Me aprestaba a terminar las pruebas acerca de las características más relevantes de las falacias en la "teoría de la resistencia de los materiales" de Galileo, cuando comencé a preguntarme cuan precisas habían sido las observaciones de Galileo en sus dos siguientes jornadas (tercero y cuarto día) donde formula las leyes de la caída libre de los cuerpos y del movimiento de lanzamiento.

Los cuerpos que sensorialmente percibimos nos dan información acerca de la existencia de la materia. Su ubicación en distintos lugares produce la sensación del espacio, y si se [leva un registro de las sucesivas posiciones de unos cuerpos en relación a otros, engendran el sentido del tiempo. La Geometría, que dominaba con alta capacidad de discernimiento Galileo, era la más elemental de estas ciencias ya que estudiaba las relaciones referentes al espacio. Galileo cambia, después de 2000 años, las ideas que tenían [os antiguos sobre el movimiento de los graves, y funda la Cinemática que trata del movimiento puro, uniendo espacio y tiempo, sin penetrar en la naturaleza de la materia.

Con este aporte a la ciencia, Galileo recibió los mayores elogios de innumerables prohombres que han tenido la humanidad hasta nuestros días.

En relación al problema del tiempo, Galileo dedicó toda una vida al problema de su determinación y medición con algún instrumento o método, capaces de producir resultados satisfactorios de precisión y de fácil comprobación. Así por ejemplo:

1) En la pintura de Luigi Sabatellio, en el Museo de Física e Storia Naturale, Florencia, se representa al joven Galileo cuando a la edad de 19 años, siendo estudiante de Medicina en la Universidad de Pisa, en el año 1583, contempla una lámpara oscilando en la catedral de esa ciudad y observa su sincronismo, tomando como referencia del tiempo el pulso de su corazón. Este recuerdo perduró hasta casi [os últimos años de su vida y en 1641 (77 años) concibe la utilización del reloj de péndulo. Aunque siempre intentó utilizar esta importante observación en la hechura de un reloj (horologio) que funcionara con un péndulo, nunca pudo construirlo. Sin embargo, su hijo Vincenzo, construyó un modelo siguiendo los dibujos de su padre, que luego la ciudad de Florencia instaló en una torre.

Christian Huygens, el gran horologista, construyó en 1656 el primer reloj regulado por un péndulo y publicó, dos años después, un tratado (Horologium) con todos los detalles del mismo, declarando que su reloj era un instrumento ajustado a requerimientos para establecer la longitud cartográfica de la tierra y poder determinar la posición de los barcos en viajes oceánicos. En el año de 1675 patentó Huygens un mecanismo a base de un resorte en espiral, como alternativa al reloj con péndulo que en travesías marinas se descomponía por el oleaje y las tormentas, y así poder ajustar el movimiento de ruedas mecánicas a la determinación del tiempo.

2) Galileo no era marinero, pero sabía bien la importancia que tenía el posicionar las naves en sus rumbos y en sus coordenadas cartográficas de latitud y longitud. Observando las [unas de Júpiter, calculó los períodos orbitales de estos satélites en su vueltas de aparición y desaparición de cada satélite alrededor del planeta gigante en un período de varios meses, creando tablas de movimientos astronómicos, conocidas como efemérides. Aunque presentó su método a los gobiernos Toscano, Holandés y Español, no mereció aceptación para la navegación oceánica, pero en el año 1650, ya muerto Galileo, se utilizó para posicionar lugares en tierra.

3) Galileo trató en vano de medir el tiempo utilizando por las señales de luz viajando desde una linterna colocada en el tope de una colina, a un observador situado en el tope de otra. (La antigua carretera Romana que se dirige a la Germania presenta a lo largo de su trayecto numerosas colinas que, en su época usaban los guardias de caminos del imperio para comunicar eventos mediante señales de luz). El nunca detectó diferencia alguna en la velocidad de la luz, a pesar de aumentar la distancia entre los observadores en el tope de las colinas.

El astrónomo danés Ole Roemer utilizó las diferencias de tiempo en la predicción de los eclipses de los satélites de Júpiter vistos desde la tierra, cuando ésta se acercaba o alejaba en su rotación de Júpiter. Concluyendo, correctamente, que dichas diferencias se debían a la velocidad de la luz y al tiempo transcurrido para que la luz de los satélites atravesaran el espacio hasta llegar a la tierra. Esta velocidad la fijó en el año 1676 con un valor un poco por debajo de los 300.000 km/seg que se acepta en nuestros días!!!

4) Galileo publicó en el año 1586 (a los 22 años) una obrita titulada (La Bilancetta) donde describe la balanza hidráulica utilizada para determinar el peso

especifico de los materiales. Como referencia importante a este trabajo, hay que recordar que Arquímedes dejó asentado por más de 2000 años el principio del equilibrio de las balanzas con brazos iguales y que fue Galileo quien en su libro (día) segundo del *Diálogo...*, extendió el equilibrio a partir de un punto de apoyo (fulcrum) a brazos de longitud diferente. Pero lo importante es que la lectura nos dice que Galileo utilizó una balanza de alta precisión para determinar el peso del agua que le dio la medida del tiempo de la calda acelerada de una bola de bronce, en planos inclinados, que es el objeto del presente análisis.

Ahora bien, a propósito de Kepler, Dice Carl G. Hempel (*Filosofía de la Ciencia Natural*, 1966)

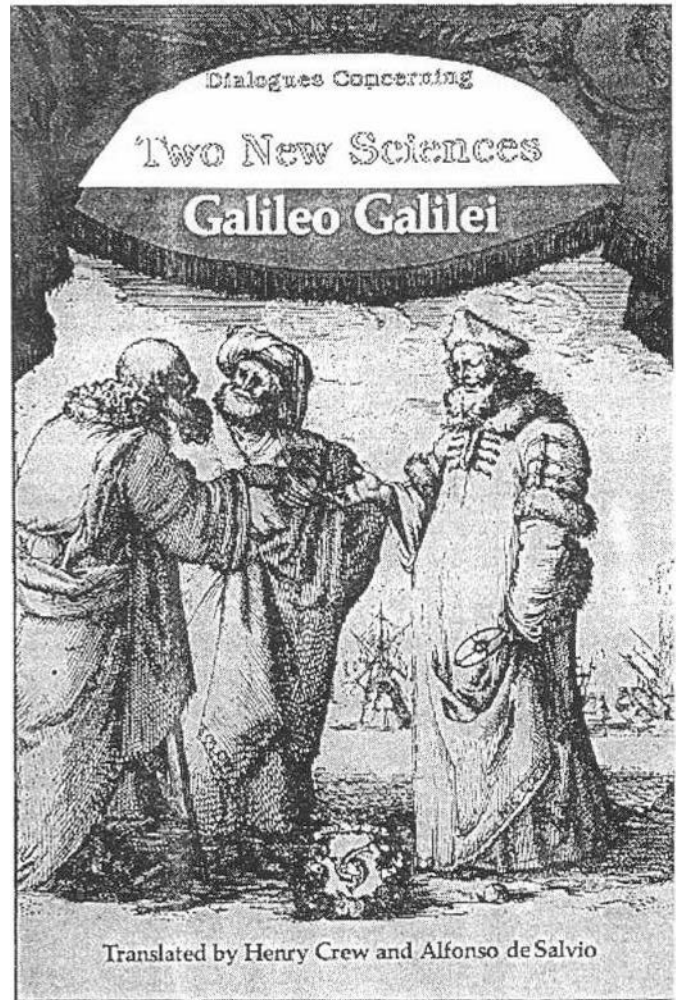
« Las investigaciones de Kepler acerca del movimiento de los planetas estaban inspiradas por el interés de aquél en una doctrina mística acerca de los números y por su pasión por demostrar la música de las esferas. Sin embargo, la objetividad científica queda salvaguardada por el principio de que, en la ciencia, si bien las hipótesis y teorías pueden ser libremente inventadas y propuestas sólo pueden ser aceptadas e incorporadas al *corpus* del conocimiento científico si resisten la revisión crítica, que comprende, en particular, la comprobación, mediante cuidadosa observación y experimentación, de las apropiadas implicaciones contrastadoras »

Aplicando esta reflexión al caso estudiado: ¿Qué nos dice Galileo acerca de la forma de medir el tiempo y el espacio en la obra analizada?

Yo trataba de encontrar, en los cuatro libros del *Dialogos* .. (que en la versión de Dover Publications Inc, 1954 titulada: *Two New Sciences*, by Galileo, contiene 300 páginas), cualquier información que pudiera dar razón de cómo Galileo medía el tiempo y las distancias, en todos los experimentos que reseñó. En muy apartado lugar de su tercer libro, dedicado a la caída libre y en planos inclinados, pp.178 y 179, líneas 30 a 67, se lee lo siguiente:

Dice Salviati (Galileo):

«Una pieza de moldeo o puntal de madera, cerca de 12 **cubits** de largo, medio **cubit** de ancho, y tres gruesos de dedos de espesor se tomó, en su borde se cortó un canal un poco mayor de un dedo de ancho; habiendo hecho esta cavidad muy recta, lisa y pulida y habiéndola revestido con un pergamino, también tan suave y pulido como fue posible, hicimos rodar en él una bola de bronce lisa, y muy redonda. Habiendo colocado esta tabla en posición inclinada, levantando un extremo entre uno o dos **cubits** sobre el otro,



Portada del libro "Two New Sciences. Galileo Galilei"
Cortesía de Dover Publications, Inc., New York

hicimos rodarla bola, como les iba diciendo, a lo largo del canal, notando, en la forma que vamos a describir actualmente, el tiempo requerido para hacer el descenso. Repetimos este experimento mas de una vez para medir el tiempo con tal precisión que la desviación entre dos observaciones nunca sobrepasaron **un décimo de una pulsación**. Habiendo realizado esta operación y habiéndonos asegurado de su confiabilidad, ahora rodamos la bola solo un cuarto de la longitud del canal; y habiendo medido el tiempo de este descenso, encontramos precisamente un medio del anterior. Luego probamos otras distancias, comparando el tiempo para toda la longitud con el de la mitad, o el de dos tercios, o tres cuartos, o verdaderamente para cualquier fracción; en tales experimentos, repetidos un completo centenar de veces, siempre encontramos que los espacios atravesados fueron a cada quien como el cuadrado de los tiempos, y esto era verdadero para todas las

inclinaciones del plano, p.e del canal, a lo largo del cual rodamos la bola. También observamos que los tiempos de descenso, para varias inclinaciones del plano, se relacionaban el uno con el otro precisamente en esa razón que, como veremos luego, el autor había predicho y demostrado.

Para medir el tiempo, empleamos un recipiente grande de agua colocado en una posición elevada, al fondo de este recipiente se soldó una tubería de pequeño diámetro que daba un pequeño chorro de agua, que era recogida en un vaso de agua, durante el tiempo de cada descenso, ora por toda la longitud del canal o bien por una parte de su longitud; el agua recogida era **pesada en una balanza muy precisa; las diferencias y las proporciones de estos pesos nos dieron las diferencias y tasas de tiempo**, y esto con una precisión que aunque la operación fue repetida muchas, y muchas veces, no había discrepancia apreciable en los resultados.»

Respuesta de Simplicio:

« Me hubiera gustado haber estado presente en estos experimentos; pero sintiendo confianza en el cuidado con que los ejecutaste, y en la fidelidad que los narraste, yo estoy satisfecho y las acepto como **verdaderos y válidos**»

¿Cuáles resultados? ¿De pesos o de tiempos?
¡¡No hay explicación del "mito" Galileo!!

¡¡Qué barbaridad!! ¡¡Buena manera de ser juez y parte!! ¡¡Así no puede perder!!!

Nota: Hay que recordar que Simplicio es un personaje ficticio y que por lo tanto, Galileo no presentó valores cuantitativos unequivocos que demostraran los valores encontrados, para precisar las relaciones de pesos versus tiempos; es decir que permitieran reproducir los resultados obtenidos en una relación doctrinal de causalidad (...) (según define M. Bunge).

¿Por qué haría esto si se hicieron multitud de pruebas de pesos de agua como medida del tiempo? Sigue siendo un misterio de su personalidad (...).

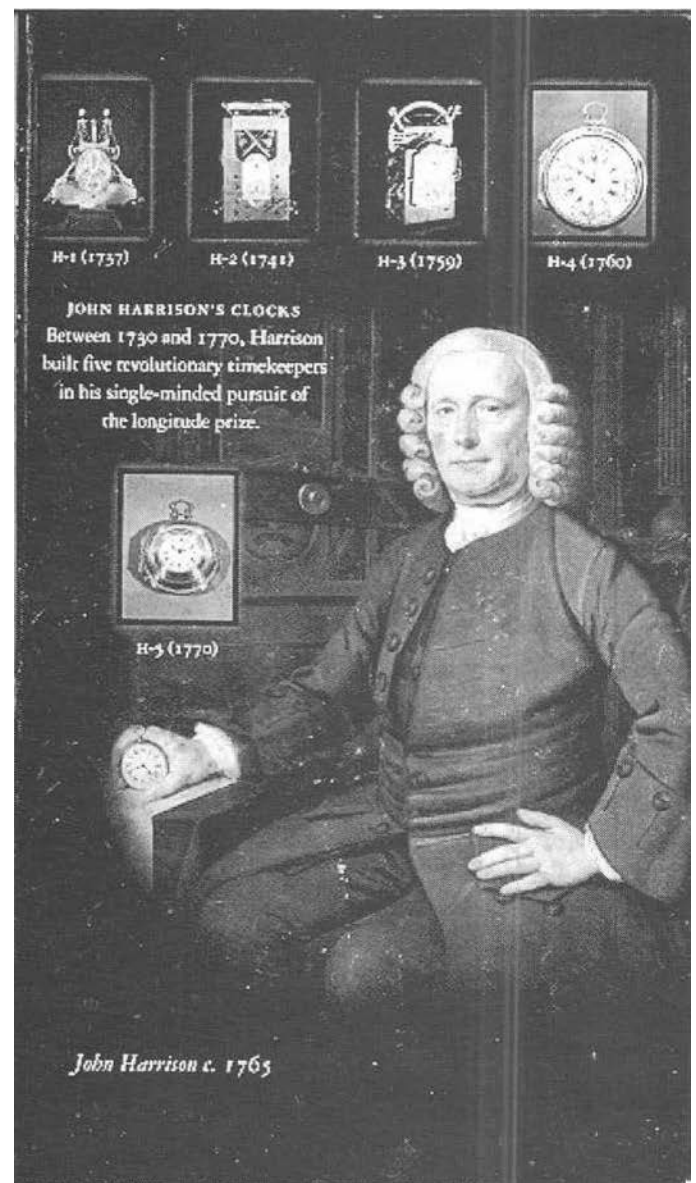
Más adelante vamos a intentar reproducir su "Reloj de Agua". Pero antes hace falta incluir en nuestra indagación dos puntos aclaratorios pertinentes.

Aclaración N.1) En la pp. 264 línea 12 opus cit. Galileo dice: «Por lo que respecta al tiempo tenemos la ya ampliamente adoptadas horas, primeros minutos y segundos minutos» siendo los segundos minutos los [*minuti secondi dora*].

Aclaratoria N.2) El canal se refiere a una pieza de madera, de 12 (braccia) de largo, medio (braccio) de ancho y tres dedos de espesor; con un corte

acanalado de un poco más de un dedo de ancho; siendo el canal muy recto, liso, y pulido, y revestido con un pergamino, también tan liso y pulido posible, al cual se le hacía rodar una muy redonda bola de bronce. Esta pieza se colocaba en forma inclinada, levantando un extremo uno o dos (braccio) para hacer rodar la bola (pp 179. Inicio, línea 01 opus cit.)

Como se observa, no hay medida (ni su equivalencia) del espacio (braccio) o codo; y aquí comienzan las investigaciones.



Contraportada del libro "Longitude" de Dava Sobel
Cortesía de Penguin Books USA Inc. New York
Illustrations of H-4 on title page spread used by permission of the
National Maritime Museum. London.
Harrison John 1693-1776

Según el Diccionario de la Lengua Castellana hay varias equivalencias de codo:

En España:

El codo del rey = 33 dedos = 0,574 metros
 El codo geométrico= media vara = 0,418 metros
 El codo mediano morisco = 0,6096 metros

En Italia:

En Bolonia = 0,640 metros
 Florencia = 0,584 metros
 Génova = 0,578 metros
 Milán = 0,595 metros
 Modena = 0,648 metros
 Parma = 0,542 metros
 En agrimensura = 0,644 metros
 Para compra/venta de telas en Reggio = 0,530 m
 Para compra/venta de lana en Venecia = 0,683 m
 Para compra/venta de seda en Venecia = 0,639 m

¿Cómo les parece? Al volver a leer por tercera vez la obra, encontré este importantísimo detalle:

« Que no es posible, bien sea por una bomba o por otra máquina, trabajando en el principio de atracción, elevar agua ni un pelo por encima de 18 (braccia = cubits = codos); este es el extremo límite de la elevación sea una bomba grande o pequeña». (pp. 16 . Inicio de la línea 30 opus cit.).

¡¡Jerónimo!! La respuesta ahora si la tenemos: la capacidad de elevación de agua teórica de una bomba es de una atmósfera (a nivel del mar), es decir la *atmósfera standard* (760 mm de mercurio a 32° F) es 10,33 metros. De donde se obtiene que un (1) braccio = cubit en inglés = codo de Galileo que es: 10,33 metros/18 codos= 0,574 metros = 33 dedos = al codo del rey de España!!

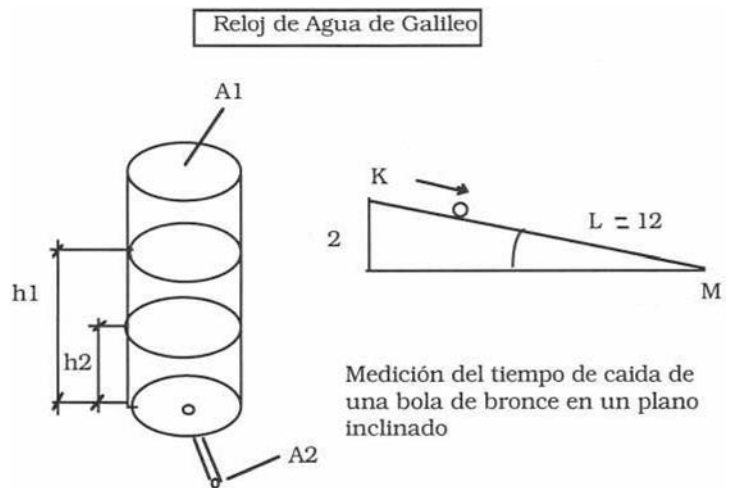
¿Qué pasa ahora con el reloj del tiempo, o bien: el Reloj de Agua de Galileo, arriba descrito por él mismo? Realmente es para morir de rabia. Veamos porqué.

En la época en la cual Galileo escribe su libro no existían relojes mecánicos. El cronómetro marino que permitía a los navegantes de los océanos poder situarse en posición de las longitudes y meridianos de la tierra no había nacido aún. Este complejo de piezas mecánicas sincronizadas de muy alta precisión fue inventado por John Harrison y en varias etapas mejoradas, desde su primer modelo H-1 en 1737, pasando por H-2 en 1741, H-3 en 1759 y el H-4 en 1760. Los cronómetros de Harrison son unas piezas

inmortales ya que podían lograr una atañá impresionante: Para ganar el premio de £ 20.000 (varios millones de dólares actuales) dispuesto por la Reina Ana de Inglaterra el 8 de Julio de 1714, el reloj marino debía encontrar la longitud geográfica dentro de 1/2 grado de precisión (debido a que 1/2 grado es igual a 2 minutos de tiempo); es decir, que no podía ganar o perder más de 3 segundos por cada 24 horas del día, en razón de que un viaje de Inglaterra a el Caribe duraba 40 días que a 30 segundos de error producía una diferencia de 120 segundos = 2 minutos. En los ensayos realizados en su época a estos ingenios, ¡¡los cronómetros de Harrison no tenían errores superiores a un (1) segundo por mes!! En comparación los relojes más finos producidos en el resto del mundo, en ese tiempo, tenían desviaciones de hasta un (1) minuto por día!!

De haber tenido Galileo estos instrumentos de medición del tiempo, a la mano, sus investigaciones hubieran sobrepasado lo inimaginable en precisión y riqueza de datos.

El gráfico que sigue a continuación permite ejemplificar un modelo de Reloj de Agua que explica (con las herramientas modernas y las fórmulas hidráulicas del siglo XX) lo que Galileo hizo en sus experimentos.



La ecuación que sigue permite determinar el tiempo de descarga, en segundos, de un recipiente lleno de agua, al cual se le ha soldado un tubo de salida, de acuerdo a la siguiente fórmula que representa los datos indicados en la figura superior:

$$t \text{ (segundos)} = \frac{2 \cdot A_1 \cdot (h_1 - h_2)}{C \cdot A_2 \cdot ((2gh_1)^{0,5} + (2gh_2)^{0,5})} \quad (1)$$

Nota: 1 Grado de longitud geográfica se expande a 60 millas náuticas

En esta ecuación se identifica:

- A_1 = Área de la sección recta del recipiente Galileano (centímetros cuadrados)
 A_2 Área de la sección recta del tubo de pequeño diámetro (centímetros cuadrados) =
 C Coeficiente de descarga del agua en el orificio de la tubería (adimensional) =
 g Aceleración de la gravedad (centímetros/s²)
 h_1, h_2 = Altura del agua en el recipiente, para distintas posiciones de la bola de bronce en su desplazamiento.

Las variables que intervienen en la determinación de la aceleración de la gravedad en el lugar donde se hicieron los experimentos (en la ciudad de Pisa) son las siguientes:

$$g(\text{m/seg}^2) = 9,80616 * (1 - 0,00259 * \cos 2\varphi - 2 * 10^{-7} * \text{Alt}) = 9,80502$$

En donde:

- φ = latitud geográfica de la ciudad de Pisa = 43,717 grados norte
 Alt = altitud sobre el nivel del mar de Pisa = aprox. 50 metros

Lo que Salviati (o sea Galileo) señala en sus experimentos se resume en estas simplificaciones algebraicas:

Si llamamos $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, \dots, t_n$, a los tiempos transcurridos para que la bola de bronce se desplace a lo largo del medidas desde el punto K $e_1 = 1/4L, e_2 = 1/2L, e_3 = 2/3L, e_4 = 3/4L, e_5 = 7/8L$ y cualquier fracción de la longitud L del canal $e_n = n * L$ se halla que:

canal en las posiciones indicadas

1)	2) y, por lo tanto:
$(t_1/t_2)^2 = e_1/e_2$	$t_2 = t_1 * (e_2/e_1)^{0,5} = 1,4142 * t_1$
$(t_1/t_3)^2 = e_1/e_3$	$t_3 = t_1 * (e_3/e_1)^{0,5} = 1,632 * t_1$
$(t_1/t_4)^2 = e_1/e_4$	$t_4 = t_1 * (e_4/e_1)^{0,5} = 1,732 * t_1$
$(t_1/t_5)^2 = e_1/e_5$	$t_5 = t_1 * (e_5/e_1)^{0,5} = 1,871 * t_1$
-	-
$(t_1/t_n)^2 = e_1/e_n$	$t_n = t_1 * (e_n/e_1)^{0,5} = n * t_1$

Pues bien, hasta aquí se cumple y asombra lo encontrado por Galileo, que es válido, pero dejó sin decirnos como sacó los tiempos absolutos de su tiempo de referencia t_1 y su relación con los volúmenes de agua (o pesos) recogidos en el vaso pequeño que eran pesados "en una balanza muy precisa (...)".

Con la ayuda de las computadoras del siglo XX se han calculado dos casos denominados: "Cálculo de la altura, volúmenes y pesos del agua desalojados por un recipiente (símil) usado como reloj de agua por Galileo" que utiliza la ecuación del tiempo, arriba descrita, para determinar el volumen de agua que se recoge en un recipiente, que cuando se pesa en una balanza muy precisa, debe dar el tiempo t_1 **que Galileo no precisó, para los dos ángulos de inclinación del tablero narrado, de manera de tener las alturas de «uno o dos codos» en el punto de altura K. En estos casos se encuentran los valores de las distintas combinaciones de tamaños y alturas de agua en recipientes que se pueden utilizar para obtener el tiempo de descenso de 0,3422 segundos y 0,4839 segundos que tarda la bola de bronce en bajar hasta el punto M de la madera.**

Se pide al lector que observe la precisión del resultado de los volúmenes (o sea pesos) que debía haber tenido Galileo para poder llegar a resultados satisfactorios.

¡¡¡No nos parece que su balanza pudo haber llegado a estos extremos de precisión en su época!?!

Conclusión

Repasando todo lo dicho en esta comparación con el caso descrito por Galileo, después de una revisión crítica a uno de sus libros: *Diálogos...*, debemos señalar con toda franqueza lo siguiente:

1) Estos dos casos permiten determinar los volúmenes (columna F) en litros y en gramos que se debían recoger para conocer los tiempos transcurridos, que requieren una precisión de 8 cifras decimales. y que debían ser pesados para obtener los valores correspondientes a los tiempos transcurridos, cosa que es difícil imaginar posible se pudiera realizar con balanzas de alta resolución en el siglo XVII.

2) Galileo no era un investigador que comprendía, ni se interesaba en comprender, el uso del instrumental que utilizaba para medir (casos como: el telescopio, las cadenas para dibujar las parábolas, el reloj de agua, las medidas de longitudes y la deflexión de las vigas, así como otros ejemplos adicionales) ni tampoco se preocupó en detallarlos con cálculos reproducibles unequivocamente en sus escritos. En un caso, que resultó en fuerte disputa pública y legal, explicó el funcionamiento de un compás de proporción de usos geométricos y militares (1606) construido por Marcantonio Mazzoleni.

