Planos y Clepsidras

Jorge a. Naranjo*

Alvaro A. Gómez O.**

1. UN ERROR LAMENTABLE

Es casi un lugar común en nuestras universidades (y por reflejo en nuestros colegio) enseñar que los experimentos galileanos sobre caída de los graves -con planos inclinados, péndulos y proyectiles- fueron, sobre todo y en ocasiones exclusivamente. "experimentos imaginarios" ó "ideales". admirables construcciones mentales pero realizaciones imprecisas, sin ningún valor probatorio. La habilidad retórica de un famoso historiador ha convencido a casi todos los estudiosos de que Galileo sólo experimentaba con la cabeza, con los "ojos de la mente". Y como la historia de la fisica no la enseñan físicos sino historiadores y filósofos humanistas, ese craso error se propaga como verdad segura, como "axioma" de ciertas posturas epistemológicas y metodológicas bastante usuales, por desgracia. entre muchos académicos.

La cuestión no sería preocupante si ese punto de vista no irrigara todo el campo educativo y no deformara de manera irreparable los conceptos y la experiencia del estudiante sobre la índole del trabajo en ciencia natural. Pues - con apoyo en ese lugar común errado - se siembra en el joven la idea de que la precisión experimental es casi imposible; y, más en lo hondo, se inculca la idea de una realidad natural imprecisa y confusa, de donde resulta la concepción de la ciencia como tarea esencialmente abstracta, ideal, sin lazos orgánicos con la experiencia y la realidad empírica.

Semejante pedagogía no solamente reseca toda actitud experimentalista en el estudiante, sino que le priva del acceso a la primera fuente de conocimiento, llenándolo de suspicacia respecto de sus propias potencias perceptivas. Se le enseña a desconfiar de la naturaleza, a minusvalorarla. "Lo real es impreciso", "La buena fisica se hace a priori" enseñan casi todas las cartillas, sin importar - al parecer - la propia lección galileana, sus expresiones de aprecio por la

* Jorge A. Naranjo Fac. de Minas

** Alvaro A. Gómez. Lic. Manuel J. Betancur

experiencia, su confianza en la percepción, su destreza de experimentador: y retorciendo hasta tornar irreconocible el sentido de la sentencia según la cual la naturaleza está escrita en caracteres geométricos. Es la metafísica obstaculizando, una vez más, el acceso a la física. Lo real se sigue posponiendo tras un bosque de símbolos, y la fantasía suplanta los trabajos y los días del Experimentador de la Naturaleza. Parece que no saldremos jamás de la caverna.

2. EL DESMONTE DE ESE ERROR

Las objeciones a ese punto de vista y a esas lecciones sobre los trabajos de Galileo, a pesar de su relativo éxito, no han tenido en nuestro medio mayor resonancia. Se tejen velos de silencio en torno de autores y obras que desmontan en todo o en parte el sofisticado argumento del historiador. No interesa tanto la verdad cuanto el prestigio, y las pruebas experimentales no conmueven tan intensamente como la magia de un estilo discursivo. Es particularmente elocuente el silencio tendido en torno de los trabajos de Stillman Drake, esa "rémora" - como lo llamó un escoliasta susceptible.

La situación es tan desoladora que parece inútil querer seguir convenciendo a nuestros humanistas de la falacia de su punto de vista sobre los trabajos galileanos, y de la irresponsabilidad que implica seguir enseñando una teoría que falsifica las condiciones propias de la experimentación de Galileo. Sería como arar en el desierto predicarles sobre los peligros filosofales de esa enseñanza. Es preferible buscar otros interlocutores, y preparar las condiciones para que cada estudiante pueda, por sus propios medios, y gracias a sus primeras lecciones de física, ponderar la justeza de las apreciaciones en boga sobre el carácter de los trabajos experimentales de Galileo y sobre la índole del trabajo en ciencia.
Cuando nuestros estudiantes puedan llegar a los cursos de epistemología, metodología, filosofía de las ciencias, teoría del conocimiento y otros afines con una experiencia previa suficiente acerca de los experimentos y teorias galileanos, ningún discurso borrará sus impresiones y sus ánimos de experimentador, ni distorsionará gravemente su idea de la ciencia. En cambio, de rebote, es poco probable que esa actitud contribuya a reformar los espíritus de los docentes. Mejor que la desesperación es la indiferencia. Pero, una generación más tarde, el contexto habrá cambiado, en favor, esperamos, de una mejor educación.

Por eso nos interesa tanto esta reunión con profesores de física y matemáticas de bachillerato y universidad. Vamos a presentar una serie de experimentos realizados en estrictas condiciones galileas, y a medir su distancia con la teoría sobre planos inclinados que Galileo expuso en la tercera jornada de sus "Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias". Como se verá, la discrepancia entre lo previsto por la teoría y lo que dán las experiencias no excede al 5% del valor teórico previsto y en muchos casos no alcanza ni un 2% . Dicho de otro modo, la precisión del ajuste entre los datos experimentales y los previstos es de 95% y hasta de 98%. Esto suena increible sólo porque estamos maleducados y no esperamos gran cosa de la experiencia.

3. LA DESCRIPCION DE GALILEO

Nos interesa en primer lugar examinar las condiciones de los experimentos que Galileo describe. El texto básico es el siguiente, tomado de "Dos Nuevas Ciencias" (páginas 211, 212 del manuscrito) :
" En un listón o, lo que es lo mismo,en un tablón de una longitud aproximada de doce codos, de medio codo de anchura más ó menos y un espesor de tres dedos, hicimos una cavidad o pequeño canal a lo largo de la cara menor, de anchura de un poco más de un dedo. Este canal, tallado lo más recto posible, se había hecho enormemente

suave y liso, colocando dentro un papel de pergamino lustrado al máximo. Después, hacíamos descender por él una bola de bronce, muy dura y pulida. Habiendo colocado dicho listón de forma inclinada se elevaba sobre la horizontal una de sus extremidades, hasta la altura de uno o dos codos, según pareciera, y se dejaba caer (como he dicho) la bola por dicho canal, tomando nota, como he de decir enseguida, del tiempo que tardaba en recorrerlo todo. Repetimos el mismo experimento muchas veces para asegurarnos bien de la cantidad de tiempo y pudimos constatar que no se hallaba nunca una diferencia ni siquiera de la décima parte de una pulsación. Establecida exactamente esta operación, hicimos que esa misma bola descendiese solamente por una cuarta parte de la longitud en cuestión en el canal. Medido el tiempo de caida, resulta ser siempre la mitad del otro. Haciendo despúes el experimento con otras partes, bien el tiempo de la longitud completa con el tiempo de la mitad, con el de dos tercios , con el de tres cuartos, o con cualquier otra fracción, llegabamos a la conclusión, después de repetir tales pruebas una y mil veces, que los espacios recorridos estaban entre sí como los cuadrados de los tiempos. Esto se podía aplicar a todas las inclinaciones del plano, es decir , del canal a través del cual se hacía descender la bola. Observamos también que los tiempos de las caídas por diversas inclinaciones guardan de modo riguroso una proporción que es, como veremos después, la que les asignó y demostró el autor. En lo que a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande, llena de agua, sostenida a una buena altura y que a través de un pequeño canal muy fino, iba vertiéndo un hilillo de agua, siendo recogido en un vaso pequeño durante todo el tiempo en que la bola descendía, bien por todo el canal o sólo por alguna de sus partes. Se iban pesando después en una balanza muy precisa aquellas partículas de agua recogidas del modo descrito, con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias y las proporciones de los tiempos. Ocurría esto con tal exactitud que, como he indicado, tales operaciones, repetidas muchísimas veces, jamás diferían de una manera sensible".

Esta descripción - notémoslo - sólo se refiere a teoremas sobre razones y proporciones, no a medidas absolutas de tiempos. Mucho menos se refiere esa descripción a mediciones de la aceleración de la gravedad. Los espacios están entre sí como los cuadrados de los tiempos en caídas por un plano a inclinación constante. Las discrepancias en las medidad de tiempos, en experimentos repetidos "una y mil veces", no excedían, para una misma longitud de caída, la décima parte de una pulsación, es decir, aproximadamente unas 8 centésimas de segundo (suponiendo 72 pulsaciones por minuto como un valor razonable). Bajo variación de las inclinaciones, resultaron cumplidas otras proporciones previstas, sin mayor discrepancia. Para medir los tiempos se usó un frasco especial, después conocido como "clepsidra de Torricelli". de cuyo principio teórico de funcionamiento nada se informa en el texto, pero cuyas características y modo de operación se describen perfectamente. Un recipiente de boca muy ancha, con un pequeño orificio, lleno con agua bajo buena carga, dejando fluir un hililllo cuyo volumen y su peso total son proporcionales al tiempo de fluencia. Pero no se afora volumen, sino peso : esto es clave para garantizar precisión (como se sabe, Galileo inventó, planteó y produjo para la venta una balanza de gran exactitud, la "bilancetta").

De esa descripción galileana se han escrito toda clase de comentarios. Entre nosotros impera el que descarta de plano que semejante instrumental y procedimiento pudieran dar ningún resultado confiable. Hasta profesores de física ha habido - por fortuna muy pocos - que, sin haber hecho un sólo ensayo, descartan los experimentos galileanos. Se imaginan, por tanto, que se trata de experimentos imaginarios. Vamos a mostrar que no es así.

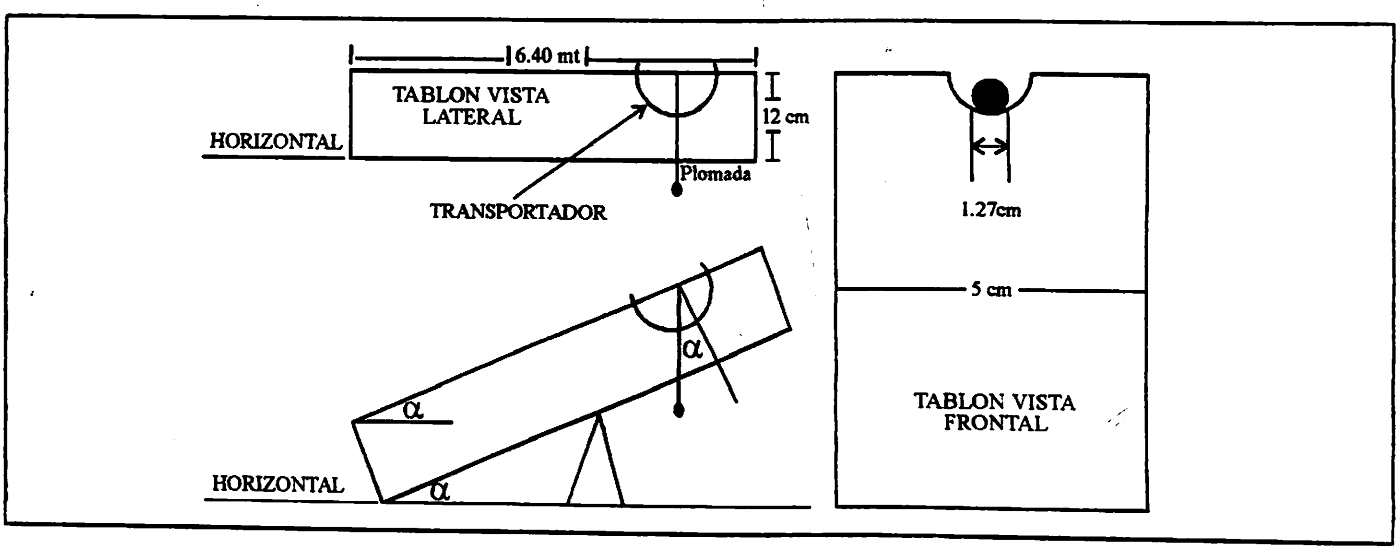
4. TABLON Y CLEPSIDRA

Para reproducir los experimentos hicimos construir un "plano" como el galileano, en madera de abarco, de 6.40 metros de largo, con un canal de 3.3 cm. de díametro, semicircular, labrado a lo largo del tablón por su cara más estrecha. El labrado inicial se hizo en una carpintería, y luego se hizo cuidadoso pulimento en el laboratorio de física. Se chequeo su buena nivelación, y se usó una plomada y un transportador para medir su inclinación. Galileo indica -según la descripción anterior - que usaba inclinaciones bajas, ángulos tales que su seno no excedía 2/12, es decir menores de 10 grados angulares. Se usaron cuatro inclinaciones en ese rango (2.50°, 4.07 °, 6.00 °, 8.00 °). Estas medidas deben hacerse con mucho cuidado; para usos finos del plano (por ejemplo la medida de la aceleración de la gravedad) un error no muy grande en inclinación es crítico.

Como clepsidra usamos una "caja de Galileo - Torricelli" (cf bibliografía No. 12) adaptada para estos fines. La base del tanque tiene 36x36 cm^2, el orificio de desagüe tiene 3mm. de diámetro, la carga de agua sobre el orificio fué de 20 cm. Durante el tiempo más largo medido (6.28 seg), que dió un flujo total; de 85.29 gramos de agua, el nivel del agua no desciende ni una décima de milímetro, de manera que el aforo puede suponerse bajo "cabeza" o carga de agua constante, y la ley de Torricelli se aplica perfectamente. Además se usó una balanza con precisión de 0.1 gramos para pesar el agua recogida en cada tiempo de caída.

Se midieron caídas a lo largo de cuatro longitudes (3, 4, 5, 6 metros) a las cuatro inclinaciones. En cada experimento se medían pues tres variables :el recorrido X, el ángulo, el "tiempo másico" M. Cada punto experimental (X,α, M) se obtuvo de promediar quince experimentos. Y se construyeron en total quince puntos experimentales (no se midió el punto (3, 2.50°, M)).

Los ensayos los realizaron, cada vez, tres personas. Una lanzaba una señal, mientras soltaba la esfera por el canal, golpeando con una regla sobre una mesa. Otra abría el orificio de la clepsidra y recogía el chorrito de agua en un beaker que acercaba al orificio no bien escuchaba la señal de lanzamiento. Otra esperaba con una hoja metálica el momento en que la esfera en caída la golpeara, puesta la hoja en el término del trayecto prescrito. En ese momento, el relojero retiraba el beaker y se pesaba la masa de agua recogida. Con el registro de quince de esas mediciones, fijos X y α, se obtenía el tiempo másico M promedio, y el punto (X, α, M)



5. LAS MEDICIONES

En la tabla No. 1 se presentan todas las medidas tomadas a inclinación 2.50°, de las que, promediando los tiempos másicos (en gramos), se obtuvieron los puntos
(6, 2.50°, 85.29)
(5, 2.50°, 78.33)
(4, 2.50°, 70.93)

Los valores de la desviación estándar son muy pequeños e indican que los datos se distribuyen muy cerca de los valores medios. Del mismo modo se tabularon las medidas para las demás inclinaciones. En total fueron 225 experimentos. En la tabla No. 2 se presenta el resumen de lo hecho con los quince puntos (X, α, M) obtenidos experimentalmente.

La precisión en medida de tiempos másicos es muy grande. El error relativo máximo(1/320.6) apenas alcanza el 0.3%.

6. EL TEOREMA II DE LA TEORIA GALILEANA

La caída de los graves en plano inclinado es un caso particular de movimiento uniformemente acelerado. Esto lo afirman muchos como artículo de fé, sin prueba alguna. Galileo, por el contrario, tenía de ello una prueba empírica, y la enunció, y no se le quiere prestar atención, o se le presta una atención torcida,admirando esa prueba como proeza imaginaria.

El teorema II sobre movimientos naturales acelerados dice asi (D. N. C., III jornada) : "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 el cuadrado de la proporción entre los tiempos, o lo que es lo mismo, como los cuadrados de los tiempos ".

TABLA No. 1. EXPERIMENTOS A BAJA INCLINACION, α = 2.50°

	X = 6 metros	X = 5 metros	X = 4 metros	X = 3 metros
α = 2.50	86.25 gramos	79.05 gramos	69.65 gramos	
	84.90	79.15	71.25	
	84.90	78.75	70.65	
	89.30	77.35	69.35	
	84.10	79.05	68.95	
	85.50	77.75	71.45	
	85.65	80.45	70.75	
	85.05	76.75	72.85	
	85.55	80.55	73.05	
	85.05	80.15	71.65	
	85.75	77.95	72.35	
	85.05	77.45	70.75	
	86.25	79.25	70.55	
	85.95	79.15	70.15	
	84.15	79.65	70.55	
TIEMPO MASICO PROMEDIO	85.29 g	78.83 g	70.93 g	
DESVIACION ESTANDAR	0.63 g	1.12 g	1.20 g	

TABLA No. 2. LOS QUINCE PUNTOS (X, a ,M) OBTENIDOS

	α= 2.50°	= 4.07°	= 6.00°	= 8.00°
X =	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
6 m	85.29	65.10	52.97	45.07
5 m	78.83	59.37	48.37	41.58
4 m	70.93	54.23	44.16	37.61
3 m		46.54	37.39	32.06

Con los datos de la tabla No. 2 podemos chequear este resultado, y la descripción galileana citada en 2., comparando espacios y tiempos másicos a cada inclinación fija. calculamos las razones Xi / Xj, $(Mi / Mj)^2$, para cada ángulo, y observamos su discrepancia ξ_{II} como

$$\xi_{II} = \frac{|(Xi / Xj) - (Mi / Mj)^2|}{(Xi / Xj)}$$

En la tabla No. 3 se presentan los resultados:

¿ Acumulación de fuentes de error, imprecisiones mayores,experimentos mentales? Por el contrario, el experimento es muy preciso y funciona exactamente como lo describe Galileo, con errores minúsculos, con baja desviación de las medidas. Hasta aquello de la décima parte de una pulsación es correcto, como puede probarse asumiendo un valor para la gravedad (Galileo no lo hizo así, claro, sino que lo intuyó por una ponderación aproximada de la equivalencia de masas con tiempos).

TABLA No. 3 EL TEOREMA II Y LA EXPERIENCIA

Xi	Xj	Xi / Xj	$(Mi / Mj)^2$		$(Mi / Mj)^2$		$(Mi / Mj)^2$		$(Mi / Mj)^2$	
6	5	1.20	1.17,	2.5%	1.20	0%	1.20,	0%	1.17,	2.5%
6	4	1.50	1.45,	3.3%	1.44,	4%	1.44,	4%	1.44,	4%
6	3	2.00	-		1.96,	2%	2.01,	0.5%	1.98,	1%
5	4	1.25	1.24,	0.8%	1.20,	4%	1.20,	4%	1.22,	2.4%
5	3	1.67	-		1.63,	2.4%	1.67,	0%	1.68,	0.6%
4	3	1.33	-		1.36,	2.3%	1.40,	5.3%	1.38,	3.8%
					α = 2.50°		α = 4.07		α = 6.00°	α = 8.00°

Resulta así que la mayor discrepancia entre la teoría y la experiencia es, aquí, de un cinco por ciento.

Asumiendo g = 9.78 m / seg^2, resulta que el error en medida de tiempos era del orden de dos centésimas de segundo. La precisión aducida por Galileo era, recordemos, de 8 centésimas. El resultado es plenamente consistente, y sería un placer si algún teórico del "experimento imaginario " pudiera explicar cómo hizo Galileo para inventarse hasta el grado de precisión de manera correcta ...

7. EL TEOREMA IV DE LA TEORIA GALILEANA

Para el caso de caídas por planos de diferente inclinación, las comparaciones iniciales de Galileo se hacían en tramos de igual longitud. El cuarto teorema dice que: "Los tiempos de caída a lo largo de planos de la misma longitud pero de diferente inclinación están entre sí en una proporción que es la inversa de la raíz cuadrada de sus alturas".

Según las mediciones reseñadas en la Tabla No.2, podiamos calcular las alturas de caída ($X \operatorname{Sen} \alpha$) y compararlas con los tiempos másicos en la forma prevista por el teorema, aplicando la comparación a tramos equilargos. De la Tabla No. 2 se obtiene la tabla No. 4 :

TABLA No. 4 RAICES DE LAS ALTURAS DESCENDIDAS

α	$\sqrt{H_{6,\alpha}}$	$\sqrt{H_{5,\alpha}}$	$\sqrt{H_{4,\alpha}}$	$\sqrt{H_{3,\alpha}}$
2.5°	0.51 mt½	0.47	0.42	–
4.07°	0.65	0.60	0.53	0.46
6.0°	0.79	0.72	0.65	0.56
8.0°	0.91	0.83	0.75	0.65

Fijo X, hemos de comparar $\sqrt{H_{x\alpha i}} \,/\, \sqrt{H_{x\alpha j}}$ con M_j / M_i. La discrepancia se mide como :

$$\xi_{IV} = \frac{\left(\sqrt{H_{x\alpha i}}\ \sqrt{H_{x\alpha j}} - Mj / Mi\right)}{\sqrt{H_{x\alpha i}} / \sqrt{H_{x\alpha j}}}$$

En la tabla No. 5 se presentan los cálculos de los cocientes de tiempos, M_j / M_i. En la primera columna van los valores fijos que producen el cociente de raíces de las alturas, esto es :

$$\frac{\sqrt{H_{x\alpha i}}}{\sqrt{H_{x\alpha j}}} = \frac{\sqrt{\operatorname{Sen} \alpha\, i}}{\sqrt{\operatorname{Sen} \alpha\, j}}$$

independiente del recorrido común X.

La máxima discrepancia no excede 6.1%: y en la mayoría de los casos está por debajo del cinco por ciento. Galileo no inventó nada en su descripción de los experimentos con planos.

8. EL TEOREMA V DE LA TEORIA GALILEANA

En el teorema II se comparan tramos y tiempos fijos los ángulos; en el teorema IV se comparan ángulos y tiempos fijos los tramos. En el teorema V se comparan números con las tres variables variando. Dice así : " La proporción entre los tiempos de las caídas por planos de diversas inclinación, longitud y altura es el producto de la proporción de las respectivas longitudes por la raíz cuadrada de la inversa de sus alturas ".

Con los datos de la Tabla No. 2 (y la No. 4), podemos chequear el ajuste de la relación :

$$\frac{Xi}{Xj} = \frac{Hj}{Hi} = \frac{Mi}{Mj} = \frac{Ti}{Tj}$$

a lo medido. Se mide la discrepancia como

$$\xi_v = \frac{(X_i / X_j)\left(\sqrt{H_j} / \sqrt{H_i}\right) - M_i / M_j}{(X_i / X_j)\left(\sqrt{H_j} / \sqrt{H_i}\right)}$$

En la tabla No. 6 se presentan los resultados.

De un total de 36 casos comparados, Sólo seis presentan discrepancia ξ_X mayor de 5%, con un máximo de 7.3%. Más de la mitad de las comparaciones dan discrepancias menores del 3%. El resultado es contundente, porque se combinan las tres variables medidas. Y queda probado que Galileo no inventó nada con sus cifras,que algunos descartan... por ser tan exactas...

TABLA No. 5: EL TEOREMA IV Y LA EXPERIENCIA

$\frac{Hx\alpha_i}{Hx\alpha_j}$	X=6 Mj / Mi	X=5 Mj / Mi	X=4 Mj / Mi	X=3 Mj / Mi
$\frac{H_{X4.07^\circ}}{H_{X2.5^\circ}} = 1.28$	1.31, 2.3 %	1.33, 3.9 %	1.31,2.3 %	-
$\frac{H_{X6.0^\circ}}{H_{X2.5^\circ}} = 1.55$	1.61, 3.9 %	1.63, 5.2 %	1.61, 3.9 %	-
$\frac{H_{X8.0^\circ}}{H_{X2.5^\circ}} = 1.79$	1.89,5.6 %	1.90,6.1 %	1.89,5.6 %	-
$\frac{H_{X6.0^\circ}}{H_{X4.07^\circ}} =1.21$	1.23,1.7 %	1.23, 1.7 %	1.23, 1.7 %	1.24, 2.5%
$\frac{H_{X8.0^\circ}}{H_{X4.07^\circ}} = 1.40$	1.44, 2.9 %	1.43, 2.1 %	1.44, 2.9 %	1.45,3.6 %
$\frac{H_{X8.0^\circ}}{H_{X6.0^\circ}} = 1.15$	1.18, 2.6 %	1.16, 0.9 %	1.17, 1.7 %	1.17,1.7 %

TABLA No. 6. EL TEOREMA V Y LA EXPERIENCIA

X_i	X_j	α_i	α_j	$\frac{X_i\sqrt{\overline{H_j}}}{X_j\sqrt{\overline{H_i}}}$	$\frac{M_i}{M_j}$	ξ_v
6	5	2.5	4.07	1.40	1.44	2.9%
6	5	2.5	6.0	1.70	1.76	3.5%
6	5	2.5	8.0	1.96	2.05	4.6%
6	4	2.5	4.07	1.56	1.57	0.6%
6	4	2.5	6.0	1.90	1.95	2.6%
6	4	2.5	8.0	2.19	2.27	5.5%
6	3	2.5	4.07	1.80	1.83	1.7%
6	3	2.5	6.0	2.19	2.28	4.1%
6	3	2.5	8.0	2.53	2.66	5.1%
6	5	4.07	6.0	1.33	1.35	1.5%
6	5	4.07	8.0	1.53	1.57	2.6%
6	4	4.07	6.0	1.49	1.48	0.7%
6	4	4.07	8.0	1.72	1.73	0.6%
6	3	4.07	6.0	1.72	1.74	1.2%
6	3	4.07	8.0	1.98	2.03	2.5%
6	5	6.0	8.0	1.26	1.27	0.8%
6	4	6.0	8.0	1.41	1.41	0.0%
6	3	6.0	8.0	1.63	1.65	1.2%
5	4	2.5	4.07	1.43	1.45	1.4%
5	4	2.5	6.0	1.73	1.80	4.0%
5	4	2.5	8.0	2.00	2.10	5.0%
5	3	2.5	4.07	1.65	1.69	2.4%
5	3	2.5	6.0	2.00	2.11	5.5%
5	3	2.5	8.0	2.31	2.46	6.5%
5	4	4.07	6.0	1.36	1.35	0.7%
5	4	4.07	8.0	1.57	1.58	0.6%
5	3	4.07	6.0	1.57	1.59	1.2%
5	3	4.07	8.0	1.81	1.85	2.2%
5	4	6.0	8.0	1.29	1.29	0.0%
5	3	6.0	8.0	1.49	1.51	1.3%
4	3	2.5	4.07	1.47	1.52	3.4%
4	3	2.5	6.0	1.79	1.90	6.1%
4	3	2.5	8.0	2.06	2.21	7.3%
4	3	4.07	6.0	1.40	1.45	3.6%
4	3	4.07	8.0	1.62	1.69	4.3%
4	3	6.0	8.0	1.33	1.37	3.0%

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Muchos otros teoremas galileanos podrían examinarse a la luz de las anteriores mediciones Algunos de ellos ya fueron objeto de cuidadosos estudios. y cuando las cuentas se hacen bien, las discrepancias entre previsiones y mediciones son, como las aquí obtenidas. minúsculas. Salta pues, a la vista, una primera conclusión: que los que descartan los procedimientos y las medidas de los experimentos galileanos. empezando por Mersenne y concluyendo por el famoso historiador y sus discípulos. o no han hecho las experiencias, o las han hecho muy superficialmente, o han interpretado los resultados con un modelo teórico equivocado.

Los primeros intentos conscientes y seguidos de obtener mediciones confiables deben pues, en contra de las opiniones de moda, atribuirse - de nuevo - a Galileo Galilei por sus experimentos con los planos inclinados. Es un sofisma de distracción acentuar que Galileo no tenía precisión suficiente para medir la aceleración de la gravedad : tal no era su objeto, él buscaba pruebas para ciertas razones y proporciones. él nunca escribió su teoría como si su verificacón dependiese de poder medir g, no lo necesitaba. Sólo precisaba aceleraciones constantes. sin importar su valor.

El efecto de conocimiento que esta conclusión acarrea es inmediato: la lectura e interpretación de la obra de Galileo debe reemprender suprimiendo todo valor a la hipótesis - a priori - de que los experimentos descritos por el gran Florentino son "imaginarios" o "mentales". Pueden reproducirse en estrictas condiciones de literalidad, y brindan resultados muy ajustados a las descripciones galileanas. La hipótesis del "experimento imaginario" debe ser sustituida por la hipótesis de trabajo experimental siguiente :
En principio, toda descripción experimental galileana debe tomarse por guía para montar y reproducir los experimentos. Mientras eso no se haga, descartar esas descripciones, o lo que es lo mismo, "elevarlas" a fantasías o imaginaciones. es una equivocación contra Galileo y su obra. contra la física, y contra la propia capacidad de discernimiento.

Lo cierto es que, bajo el punto de vista que criticamos, el estudiante jamás podra tropezarse con los resultados aquí expuestos, perdiéndose una vía maravillosa por su sencillez y exactitud para entender las sutilezas del movimiento uniformemente acelerado y de las caídas por plano inclinado. Qué le queda a uno para estudiar esas leyes cuando le descartan los instrumentos accesibles para medirlas ? Esperar el riel sin fricción, esperar que caiga nieve sobre los taludes? Acaso convertirse en predicador de una ciencia sin experiencia ? El problema es político. Nuestro equipo -el equipo de Galileo en últimas-no cuesta en total cien dólares, y no consume energía eléctrica. Se construye aquí, se le dá trabajo a maese carpintero, a maese vidriero. Y luego. ya en el laboratorio, los trabajos de pulimento y adaptación del plano (suave lijado del canalete. embetunado de la pista, metrizado del recorrido. nivelación y calibración de inclinaciones) y de la clepsidra (carga de agua bien nivelada y suficientemente alta para garantizar permanencia del régimen de flujo durante el vaciado. aforos volumétricos y másicos), el aprendizaje de las sincronizaciones entre los operarios, y hasta la escuela de paciencia por la que debe pasarse mientras se repiten los ensayos centenares de veces, todo ello abre ya un itinerario pedagógico muy interesante, inaccesible por vías que no sean las de la experiencia, donde el ánimo del experimentador se forja una alegría propia y su pensamiento se va modulando ante las objeciones de la experiencia. donde los sentidos se van afinando y el alma se llena de contemplaciones.

Por otra parte para que el dispositivo. aparentemente anodino. entregue sus claves maravillosas, el estudiante - y antes, claro el profesor- se ve inducido a estudiar con mucha hondura las leyes de la cinemática y la dinámica de los movimientos uniformemente acelerados, y de la caida de los graves. Quizá hasta se acerque al propio texto galileano - lo cual sólo beneficios podrá brindarle. Al experimentar así forzosamente se enriquece el nivel teórico y la compresión de los fenómenos.

Si los profesores siguen en la enseñanza de la física, el método galileano, la "mutua elucidación" de experiencia y teoría hará mucho más eficaz y saludable el estudio de la materia. En tal caso se hará más fácil inculcar el sentimiento de aprecio por las lecciones físicas de Galileo. El gran florentino escribió para nosotros, con los ojos en la frente y en la mente, para liberarnos de la autoridad de libros y autores, para llevarnos hasta las puertas de una experiencia inteligible, para acrecentar nuestra confianza y nuestra admiración por la naturaleza. No será hora ya de hacerle caso ? Pero hoy, como hace tres siglos y medio, Galileo parece condenado al ostracismo. De ustedes profesores de física, depende liberar esa obra para beneficio de nuestra pedagogía.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro reconocimiento y gratitud a quienes participaron con su entusiasmo y dedicación en el buen desarrollo de este trabajo a la secretaría de Educación, Cultura y Recreación de Medellín y a su departamento de Educación, y al liceo Manuel J. Betancur, y en forma muy especial al señor Rector Marcel Díaz L., quien nos brindó toda su valiosa cooperación, como tambien al señor Javier Arias y a los profesores Juan Manuel Ramírez y Albeiro Cano, los cuales nos facilitaron el uso del laboratorio de física y algunos instrumentos de trabajo.

Deseamos así mismo destacar la colaboración de los profesores Guillermo Mesa (U. Nacional) y Orlando Mesa (U. de A.), y Hernando Giraldo (U. de A.) quienes nos facilitaron los equipos de cómputo y nos asesoraron para procesar la información. En lo referente a la toma de datos vale resaltar el apoyo de los alumnos de 9° y 10° del liceo Manuel J. Betancur, quienes de una u otra forma hicieron posible la culminación de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. GALILEO GALILEI. "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias ". Editora Nacional. Madrid. 1976.
2. DRAKE, S., GALILEO. De. Allianza Universidad. Madrid. 1982.
3. GEYMONAT, L. Galileo Galilei. Ediciones Península. Barcelona 1969.

4. HARZANY. ¡ E pur si muove ! (La vida de Galileo Galilei). Coepla Buenos aires 1945.

5. DRAKE S. MACLAHLAN J. Galileo's Discovery of parabolic Motion. Scientific American. March 1965.

6. DRAKE S., Galileo's experimental confirmation of horizontal Inertial: Umpublished Manuscripts. Isis, 64. 1973, pag. 291 - 305.
7. MACLAHLAN J., The test of an "Imaginary"Experiment of Galileo's. Isis. 64. 1973, pag. 374.9.
8. LINDBERG, D.C. Galileo's experiments of falling Bodies. Isis. 56. 1965.
9. SETTLE T.B., An Experiment in the history of Science. Science. 133. 1961.
10. KOYRE, A., Un experimento de medición. en estudios de historia del pensamiento científico. Ed. Siglo XXI, México.
11. THUILLIER, P., Galileo y la experimentación. Mundo científico, 26,1983.
12. NARANJO J.A., Los trabajos experimentales

de Galileo Galilei. ed. Univ. Nacional , Bogotá, 1988.
13. NARANJO J.A.. Los planos inclinados galileanos. VI Foro Nacional de Filosofía, ed. Univ. Antioquia, Medellín, 1985.
14. MONSALVE M.. Naranjo J.A., Planos Inclinados Galileanos. Revista de ciencias Humanas. U. N, Medellín, No. 6.
15. HEMLEBEN J.. Galileo. Salvat, Barcelona, 1985.

ANEXO No. 1. Rodamiento Puro de Esferas por Planos

Sea una esfera de radio **R** y masa **M** homogénea, en caída por plano inclinado . Sobre ella, en la dirección de descanso, opera la componente Mg sen de la gravedad, y en dirección opuesta la fricción $\mathbf{F_f}$ Asumimos que la esfera rueda sin deslizar. de suerte que $\mathbf{X = R\,\Xi, X' = R\Xi', y\ X'' = R\Xi''}$, siendo **X** el desplazamiento lineal, a lo largo del plano, y Ξ el giro angular de cada parte de la esfera durante la caída. Por la segunda ley de Newton se establece que :

$$\mathbf{Mg\,sen\alpha - F_f = MX''}$$
$$\mathbf{RF_f = I\Xi''}$$

Siendo I el momento de inercia de la esfera respecto de un eje centroidal paralelo al eje de giro. Ese momento de inercia vale en tal caso, como se demuestra con facilidad, (2/5) MR^2.
Entonces

$$\mathbf{RF_f = (2/5)\ MR^2X''/R}$$
$$\mathbf{F_f = (2/5)\ MX''}$$

Por tanto, arriba, resulta que

$$\mathbf{X'' = (5/7)\ g\ sen\alpha}$$

Esta es la aceleración del rodamiento puro, un movimiento uniformemente acelerado, por lo menos en teoría. Los experimentos galileanos corresponden a rodamientos puros, y los resultados muestran que el comportamiento real se ajusta bien a la teoría de ese movimiento. Entonces, para esferas soltadas desde el reposo.

$$\mathbf{X = (1/2)\ (5/7)\ g\ sen\alpha\ .\ t^2}$$

De allí resultan inmediatamente las pruebas teóricas de los teoremas II, IV. V de Galileo. Con base en dicha fórmula, y mediciones precisas de **X, α , t,** el plano es capaz de ofrecer buenos valores de **g.**

ANEXO No. 2. La Clepsidra de Torricelli :

La ecuación de Bernoulli. aplicada entre la superficie libre del agua y el punto de salida del hililio.

$$\mathbf{Patm + \rho gh + 0 = Patm + 0 + \tfrac{1}{2}\,\rho v^2}$$

Produce $v = \sqrt{2gh}$ como expresión para la velocidad de salida. Por el orificio fluye pues una masa **ΔM** en **Δt**, y

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \rho\, A_0 \sqrt{2gh}$$

Entonces

$$\Delta t = \frac{\Delta M}{\rho\, A_0 \sqrt{2gh}}$$

y el tiempo transcurrido es proporcional a la masa que ha fluido. El término $\mathbf{A_0}$ **2g** es constante.

En dos experimentos habrá dos intervalos $\mathbf{\Delta t_1}$. $\mathbf{\Delta t_2}$ correspondientes a masas M_1. M_2 recogidas en el beaker.

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta M_1}{\rho\, A_0 \sqrt{2gh}}$$

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta M_2}{\rho\, A_0 \sqrt{2gh}}$$

Dividiendo,

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\Delta M_1}{\Delta M_2}$$

multiplicando y dividiendo a la derecha por g, obtenemos :

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\text{Peso } 1}{\text{Peso } 2}$$

De esta manera usaba Galileo la Clepsidra, sin conocer a ciencia cierta la ley Torricelliana, pero intuyendo perfectamente su funcionamiento. Para mayores detalles, consulte Bibl. No. 12.

DYNA

Invita a todos sus lectores a participar con artículos de carácter divulgativo, de temas afines a la ingeniería.
Las contribuciones deben hacerse llegar al Comité Editorial REVISTA DYNA. Facultad de Minas, oficina 209 bloque M4 (teléfono 234 15 38) así:

Dos copias del artículo en papel, con una extensión máxima de 10 (diez) cuartillas a doble espacio y tamaño de letra 12 cpi.

Un diskette de 3 1/2" HD con el archivo en *Word for Windows* 6.0.

Todos los gráficos y ecuaciones deben estar incluídos en el texto.

Los gráficos deben estar como archivos .TIF o .EPS.

Las ecuaciones en el editor de ecuaciones del *Word for Windows*.

Si hay fotografías, deben enviarse copias en papel mate alto contraste.

COMITE
EDITORIAL