

Historia del Cronómetro Naval

Tempus Vitam Regit

GUILLERMO GRABINSKY*

Ubicar la posición de un barco en altamar ha sido de vital importancia desde que el hombre se aventuró a cruzar los mares. Durante la época de los extraordinarios viajes de exploración y el descubrimiento de nuevas tierras y de sus formidables tesoros, encontrar tal posición se convirtió en una cuestión de valor estratégico, pues es evidente que un método que permitiera resolver este problema transformaría a cualquier nación marítima en una potencia naval indiscutible.

Como el lector sabe, el hombre ha dividido a la tierra por medio de una serie de líneas imaginarias llamadas paralelos y meridianos, y así, como en el plano cartesiano, un punto sobre ella queda únicamente descrito mediante dos coordenadas: longitud y latitud. Estas corresponden respectivamente a los paralelos y meridianos. Desde hace muchísimos años, con ayuda del astrolabio, la latitud podía obtenerse fácilmente y con cierta precisión, no así la longitud.

En 1530 el astrónomo holandés Gemma Frisius (1508-1555) opinó que sería sencillo para el capitán de una nave conocer su posición en altamar si llevase consigo un reloj bastante preciso que conservara el horario del punto de partida, entonces, comparando tal hora con la hora local —la cual puede ser obtenida midiendo la altura del sol o, de noche consultando un almanaque que contenga la posición de las estrellas, la diferencia entre ambas horas daría la posición del barco. Esto se obtiene considerando que un minuto de tiempo equivale a 15 minutos de longitud, pues hay 1440 minutos en 24 horas por los 360 minutos x 60 de longitud que tiene el globo terráqueo. Por otro lado, sin nos movemos por el ecuador, un minuto de tiempo equivale a cerca de 15 millas náuticas (aprox. 27.8 km) por lo que se comprenderá que una medición poco cuidadosa podría traer consecuencias funestas.

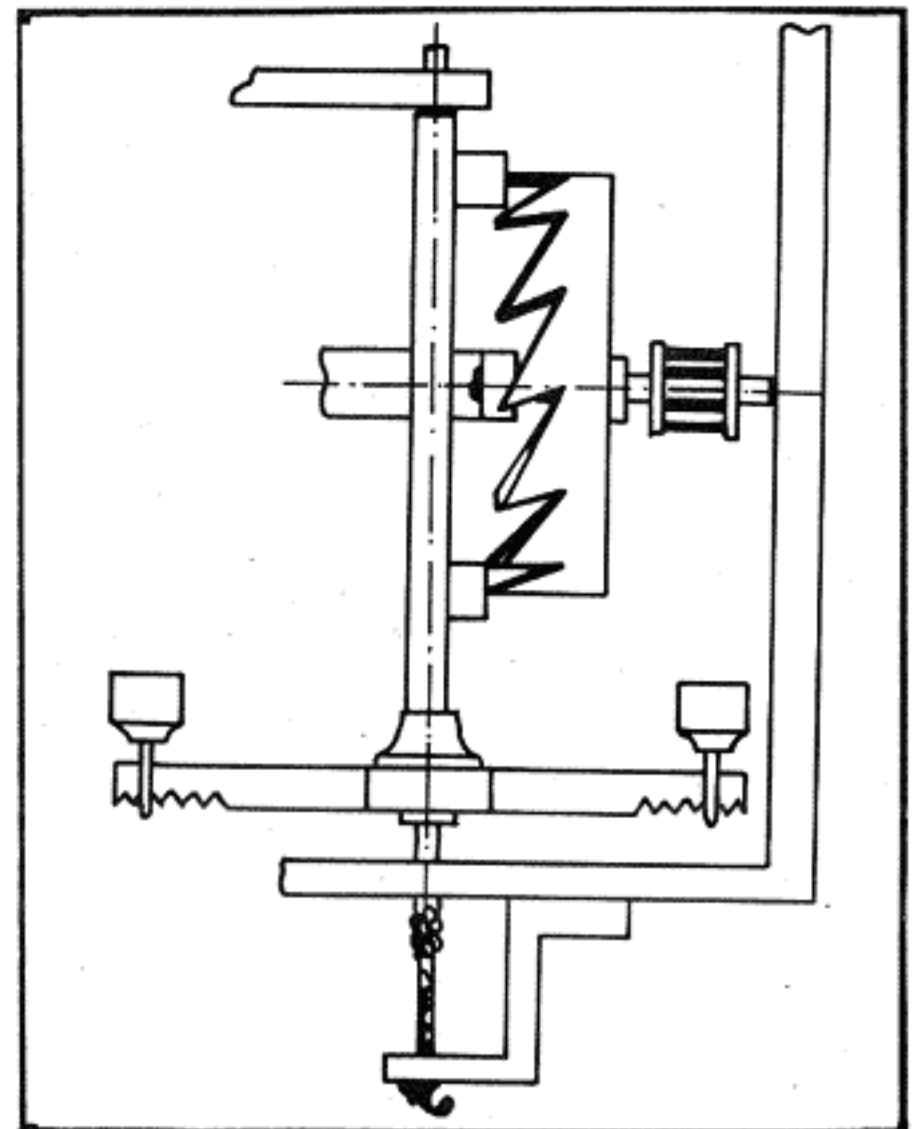
GALILEO Y EL PÉNDULO

El primer mecanismo de medición del tiempo razonablemente confiable nace al adaptarse el péndulo como sistema de escape para un sistema de engranes. Cuenta la leyenda que tal idea surgió en 1583, cuando un joven de 19 años, Galileo Galilei (1564-1642), observó la lámpara oscilante del Duomo de Pisa, recién movida por el sacristán y se le ocurrió comparar el ciclo

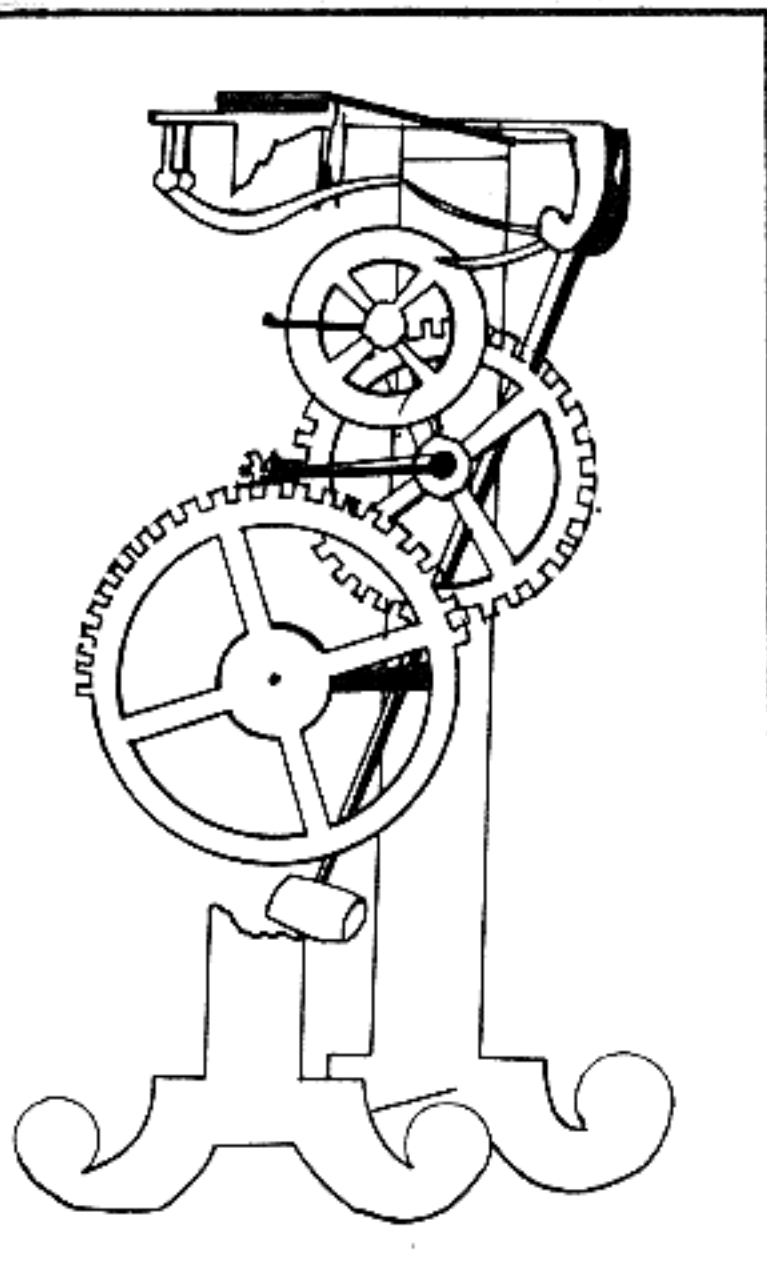
de ésta con sus propias pulsaciones. La conclusión a la que llegó es que las oscilaciones del péndulo circular son isócronas, es decir, de ciclos de igual duración, independientemente de la amplitud del arco, lo cual es incorrecto.

En 1639 Galileo pone por escrito su idea de utilizar el péndulo en un reloj. Pero no fue sino hasta 1641, casi al final de su vida, estando ya ciego, que se materializa la aplicación del péndulo como regulador para sustituir el uso del primitivo regulador *verge et foliot* (ver diagrama 1). Fue su hijo Vincenzo Galilei, quien construyó el modelo (ver diagrama 2).

Diagrama 1. Esquema de un escape de paletas primitivo, con regulador de foliot



* Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, UNAM.



Técnicamente, la introducción del péndulo logra inmediatamente que un reloj de pesas pueda mantener una precisión que debe ser cifrada ya en fracciones de minuto al día. A partir de entonces aparece la manecilla de los minutos (el segundero tardará un poco más en aparecer).

APARECE HUYGENS

El físico holandés Christian Huygens (1629-1693) es quien, en 1657, puso el principio sobre bases prácticas. Mas cuando los detalles de la invención de Huygens llegaron a Italia, la comunidad científica muy indignada, lo acusó de haber plagiado el invento de Galileo. Entre los acusadores se encontraba Leopoldo de Me-

dicis, príncipe toscano y mecenas de relojeros. Finalmente Huygens logró obtener una patente para su reloj en Holanda, pero su solicitud fue rechazada tres veces en Francia. Huygens quedó muy dolido por tales cargos en su contra y grandes fueron sus esfuerzos para convencer a sus acusadores de que él no tuvo conocimiento previo de los trabajos de Galileo. Más aún, Huygens afirmaba que su reloj era superior, puesto que el péndulo se encontraba suspendido por un hilo de seda y no estaba pivotado como el de Galileo, lo cual, según él, hacía que el mecanismo

HUYGENS, HOOKE Y EL RESORTE ESPIRAL

terminara por detenerse. Años más tarde Leopoldo de Medicis concedió la posibilidad de que no hubiese habido plagio. Huygens era un gran inventor y esto lo metía constantemente en conflictos. Otro de sus inventos es el *resorte espiral*, sin el cual no se hubiesen desarrollado los relojes portátiles, ya que éste imparte al volante movimiento alternado correspondiente al del péndulo y tolera los cambios bruscos de posición (ver diagrama 5). Pero su "paternidad" sobre tal invento no fue aceptada unánimemente. El irascible físico inglés Robert Hooke (1635-1703), que era en cierta forma su peor enemigo, tenía la costumbre de abandonar todo proyecto que no le reportara alguna utilidad, así, en el momento en que Huygens daba a conocer su resorte espiral (1675) los trabajos de Hooke llevaban 17 años metidos en un cajón. Más bien, para 1670 la noción de espiral estaba en el "ambiente" a disposición de quien la tomara.

Pero no hay que olvidar que Hooke tenía su propia inventiva. En 1670 diseña una máquina cortadora de engranes, lo que permite que, por primera vez, se produzcan ruedas dentadas de calidad excelente y uniforme. Antes estas piezas se hacían a mano con una lima y un pulso firme. Este es el primer paso en el sendero que llevaría a la industria relojera a la producción en masa de relojes con refacciones intercambiables de calibres estandarizados.

HOROLOGIUM OSCILLATORIUM

En un reloj cuyo péndulo es circular, al pasar la amplitud de la oscilación de 1 a 2 grados de semiarco (= 1/2 ciclo) el reloj se

dicis, príncipe toscano y mecenas de relojeros. Finalmente Huygens logró obtener una patente para su reloj en Holanda, pero su solicitud fue rechazada tres veces en Francia. Huygens quedó muy dolido por tales cargos en su contra y grandes fueron sus esfuerzos para convencer a sus acusadores de que él no tuvo conocimiento previo de los trabajos de Galileo. Más aún, Huygens afirmaba que su reloj era superior, puesto que el péndulo se encontraba suspendido por un hilo de seda y no estaba pivotado como el de Galileo, lo cual, según él, hacía que el mecanismo

FUERZA MOTRIZ

Para los relojes portátiles la fuerza consistía, y aún la encontramos en los relojes mecánicos actuales, de una cinta metálica enrollada (la cuerda o muelle real) y colocada dentro de un barrilete. Esta cuerda era de acero y la fabricaban los herreros de la época, pero a pesar de cierto dominio en la forja de metales, las cintas que producían variaban en anchura y grosor por tramos, lo que originaba que se transmitiera al tren de marcha una fuerza motriz poco uniforme. Además, cada vez que se daba cuerda al reloj, éste se detenía, por lo que era necesario un segundo reloj para poner el primero a la hora. Era común que una cuerda completa durara tan sólo 13 ó 16 horas.

Otro problema adicional era que la marcha del reloj era más rápida cuando se tenía la cuerda completa y tendía a retrasarse en la medida en que ésta se desenrollaba. La solución a este problema se consiguió usando el elegante mecanismo conocido como el "fusse" o "cubo y caracol" (ver diagrama 3), cuya concepción se remonta al menos a la época de Leonardo da Vinci. Este aparece en uno de sus dibujos cercanos a 1490. La fuerza de la cuerda hace que la cadena se enrolle alrededor del cubo, pero al empezar del extremo más fino del caracol hacia el más ancho, a medida que la cuerda se desenrolla y pierde potencia, los engranes del caracol

transmiten al tren una fuerza prácticamente constante.

En lo que respecta a los relojes de pared o de piso la fuerza motriz era accionada por un sistema de cordones, pesas y poleas y era proporcionada por la fuerza

constante de la gravedad. También, mediante un ingenioso artificio inventado por Huygens, era posible darle cuerda sin detenerlos. Esto nos muestra claramente que el problema estaba resuelto al menos para este tipo de relojes (diagrama 4).

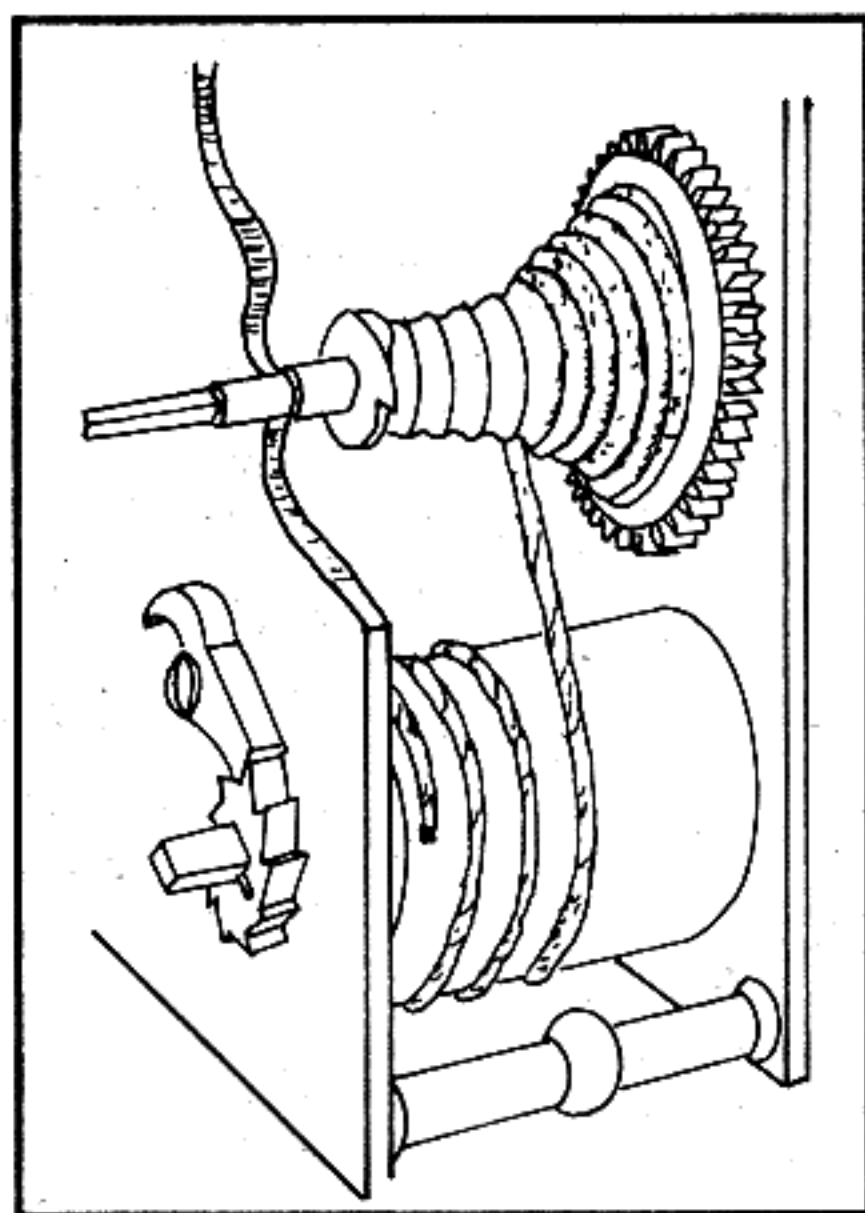


Diagrama 3. Sistema de cubo y caracol en el que la cadena ha sido reemplazada por tripa de gato

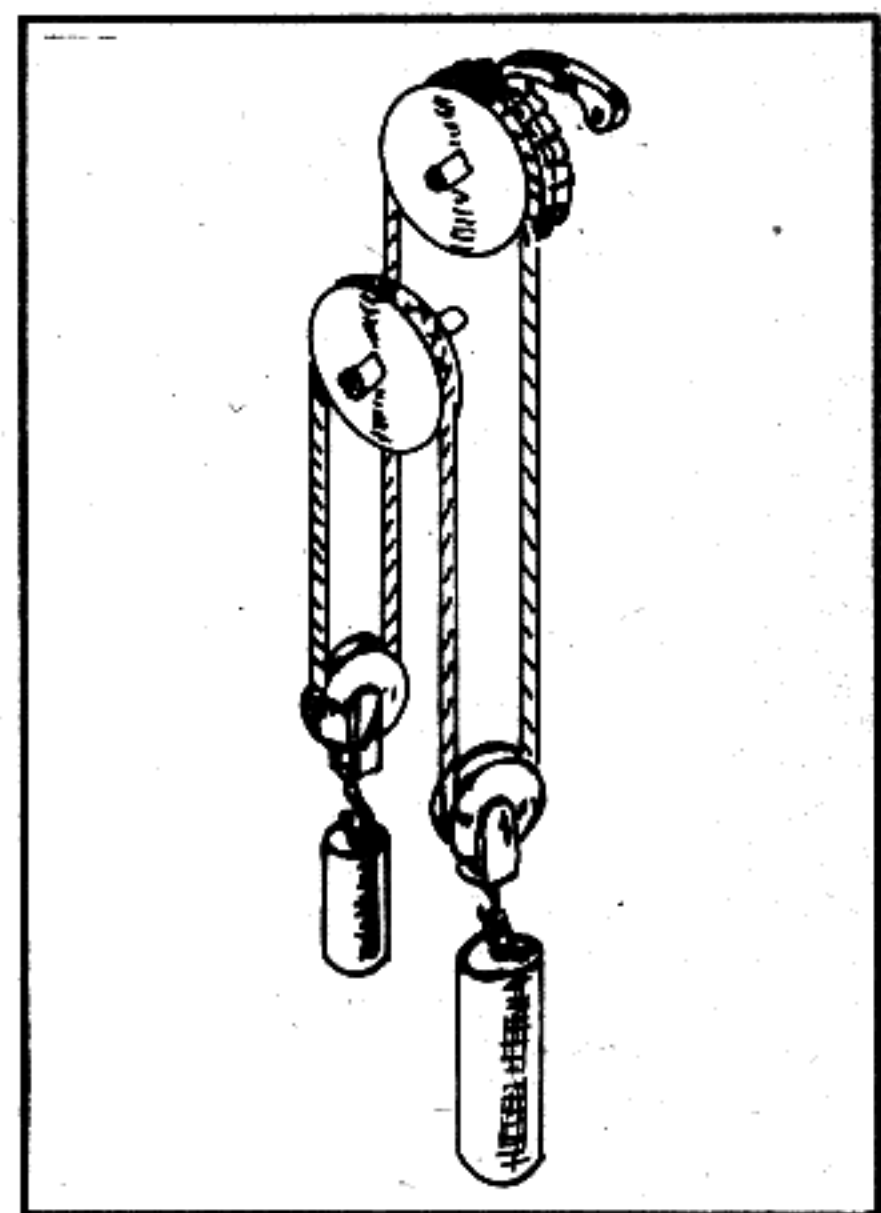


Diagrama 4. Cuerda sin fin de Huygens

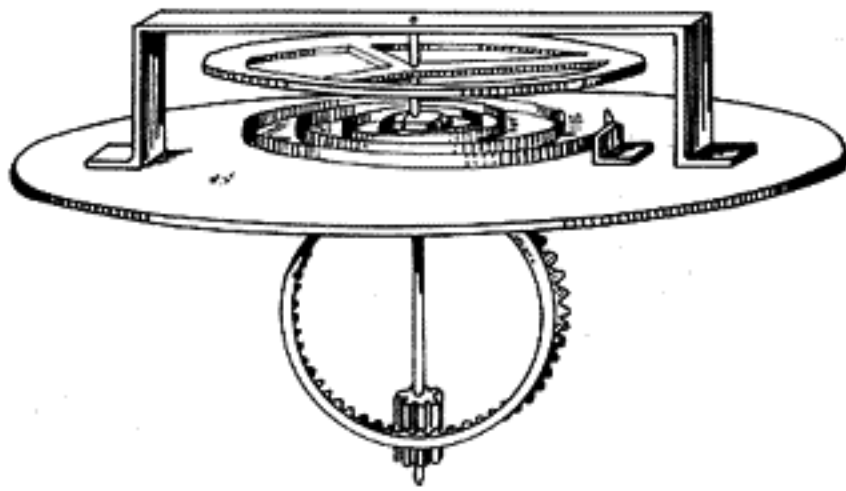


Diagrama 5. Esquema original de Huygens, que representa un volante provisto de su resorte-espiral

atrasará 4.95 segundos al día, mientras que si esta pasa de 5 a 6 grados, el reloj se atrasará 18.09 segundos al día (ver "error circular"). Como se puede apreciar estas diferencias son relevantes, resulta sorprendente que hayan pasado inadvertidas para un observador tan metódico como Galileo. A la desviación del péndulo circular se le conoce como el "error circular".

Una solución a este problema se debe a Huygens, quien descubrió empíricamente que la trayectoria idónea que debe trazar la punta del péndulo es un arco de *cicloide* y no de círculo, por ser la primera una curva braquistócrona, es decir, de caída más rápida (ver el concurso de Bernoulli) por lo que adaptó al péndulo un par de láminas de acero de forma cicloidal para forzarlo a describir tal trayectoria, que por cierto, resultó un artificio mecánico inútil que posteriormente abandonaría (diagrama 6).

Era natural que este sabio fuese el primer científico en intentar seriamente resolver el problema de la longitud y debido a que los mejores instrumentos eran los de péndulo, pensó en medir el tiempo en el mar mediante este tipo de reloj, uno de los cuales colocó en un sistema de suspensión para que el cabeceo del barco no alterara su marcha. El método funcionó razonablemente en aguas tranquilas, pero el reloj se detenía en aguas moderadamen-

FRICCIÓN

La fuerza motriz acciona una serie de engranes y piñones que embonan con perfecta geometría, sin embargo estos rozan entre sí y contra las dos placas de latón entre las que giran los ejes. La combinación del acero, material con que están hechos los pivotes de las ruedas y el latón, material con que están hechas las placas que sostienen el mecanismo, es una combinación desigual, ya que el latón es siempre el gran perdedor por su suavidad, y con el tiempo los pivotes ensanchan los orificios que los contienen, dando lugar a un "juego" indeseable que transmite irregularidades a todo el tren y termina por transroscarlo.

La solución definitiva es proporcionada por el matemático suizo Nicholas Fatio de Duillier (1664-1753) quien patenta en mayo de 1704, en Inglaterra, un método para perforar piedras preciosas para ser usadas como cojinetes para los piñones. Los rubíes, granates y zafiros eran las gemas de uso más común. El método se guardó celosamente y fue el principal responsable de la supremacía del reloj inglés por más de un siglo. Aún en la actualidad el número de joyas funcionales en un reloj da una buena indicación de la calidad de la máquina de éste, aunque por lo general ya sólo se usan gemas sintéticas.

te agitadas. La descripción de los resultados en relojería de Huygens están contenidos en sus importantes libros "Horologium" (1658) y "Horologium Oscillatorium" (1673).

Parecía que los relojes de péndulo estaban condenados a permanecer perpetuamente en tierra, ya fuese como relojes de piso o colgados en la pared. Más no hay que menospreciar que cumplieron su misión durante muchos años de manera sobresaliente en los observatorios.

EL CONCURSO

En el año de 1713 (concretamente el 12 de noviembre de 1713) y a instancias de Issac Newton, el parlamento británico ofrece una serie de premios para aquél o aquellos que fuesen capaces de construir un reloj portátil de construcción práctica y fácilmente reproducible, con las virtudes que a continuación se detallan:

£10 000 para una precisión de un grado de longitud en un viaje de las islas Británicas a las Antillas.

£15 000 para una precisión de 40 minutos de longitud en el mismo viaje.

£20 000 para una precisión de menos de 30 minutos de longitud en el viaje ya descrito.

Un viaje así duraba aproximadamente 6 semanas, por lo que, para ganar el gran premio, el reloj debería mantener una precisión de 3 segundos al día. Si consideramos que £20 000 corresponden a £240 000 de hoy, se comprenderá que las recompensas eran principescas, aunque los obstáculos a vencer parecían insalvables. (Se intentará describir brevemente en los recuadros algunos de ellos, y proporcionar una idea del estado del arte relojero a fines del siglo XVII, que permite apreciar mejor la magnitud de los problemas a los que se enfrentaban los concursantes).

EL GANADOR Y SUS LOGROS

La historia de John Harrison merece una narración extensa. Nace en la aldea de Barrow, en Lincolnshire, en 1693. Se dedica junto con su padre y su hermano James a la carpintería. Pero desde



Christiaan Huygens (1629-1695)

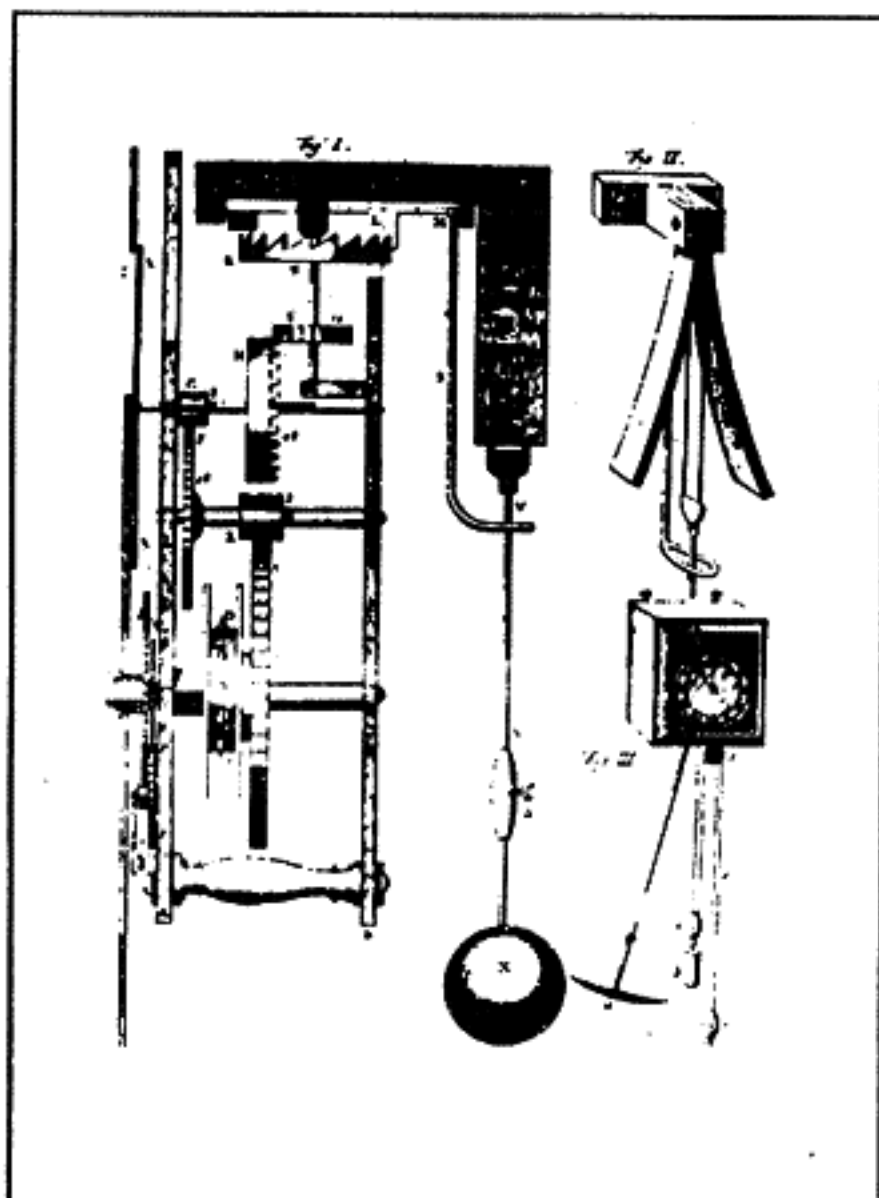


Diagrama 6. Reloj de Huygens de 1673 aún con láminas cicloidales

joven muestra una fuerte afición a la mecánica y en particular en la fabricación de relojes de madera. Estos están hechos en parte de *Lignum vitae*, una madera durísima y de naturaleza aceitosa.

En 1726 resuelve ingeniosamente el problema de los cambios de temperatura para relojes de piso, al diseñar un péndulo llamado "gridiron" o de "parrilla". Su cuerpo consiste en una serie alternada de varillas de acero y de latón que poseen diferente coeficiente de dilatación, al estar así dispuestas, mantienen el centro de gravedad del péndulo sin cambio (diagrama 7). Hoy en día los finos relojes de piso de tipo "grandfather" lo siguen usando. Se afirma que un reloj de piso construido por Harrison no varió en más de un minuto en diez años.

La noticia de los premios llega hasta la aldea de Harrison y sin duda alguna sobre su capacidad, decide ganar el premio mayor. En 1730 se presenta con algunos de sus trabajos y un diagrama en papel ante el astrónomo Edmond Halley (1656-1742), célebre, por su descubrimiento del cometa que lleva su nombre, para solicitarle un adelanto. Halley formaba parte en aquel entonces de la "Comisión de Longitudes" que se había constituido con el exclusivo propósito de juzgar los méritos de los relojes concursantes (Newton perteneció a la misma durante algún tiempo).

Halley se impresiona por la vehemencia del joven inventor y solicita la opinión de George Graham (el mejor relojero de entonces). El siempre desconfiado Harrison teme que le sean robadas sus ideas y acepta a regañadientes la entrevista. Esta transcurre cordialmente a pesar de un choque inicial de personalidades, y no sólo se le alienta a construir su cronómetro, sino que además se le adelantan 200 libras.

EL H₁

Harrison vuelve a su aldea y reanuda su trabajo de reparador de relojes. No es sino hasta 1735 que termina su primer reloj marino, el H₁, un pesado aparato de 73 libras, cuyos avances técnicos son verdaderamente importantes: un sistema regulador llamado "grasshopper", que sin estar totalmente liberado de la fricción, la reduce de manera considerable. Salvo por la parte del escape, los engranes del H₁ son de diversas maderas, mientras que los pivotes giran sobre ruedas antifricción que eliminan la necesidad de su engrase. Además, incorpora un sistema llamado *Remontoir* que permite mantener la marcha del reloj sin detenerlo ni alterar su ritmo mientras se le da cuerda. Es interesante remarcar que únicamente este último invento sobrevive en los cronómetros marinos y en los relojes de muy alta calidad.

En 1736 la Comisión de Longitudes efectúa una prueba a bordo del H.M.S. Centurión, durante un corto viaje de ida y vuelta a Lisboa, pues en ese año Inglaterra y España se encontraban en guerra y no descaban arriesgarse a que el reloj fuese capturado. Harrison acompaña a su cronómetro y obtiene una corrección de sesenta millas sobre las mediciones del capitán. Este hecho es muy significativo, ya que se trataba esencialmente de un viaje de tipo norte-sur con poco cambio de longitud.

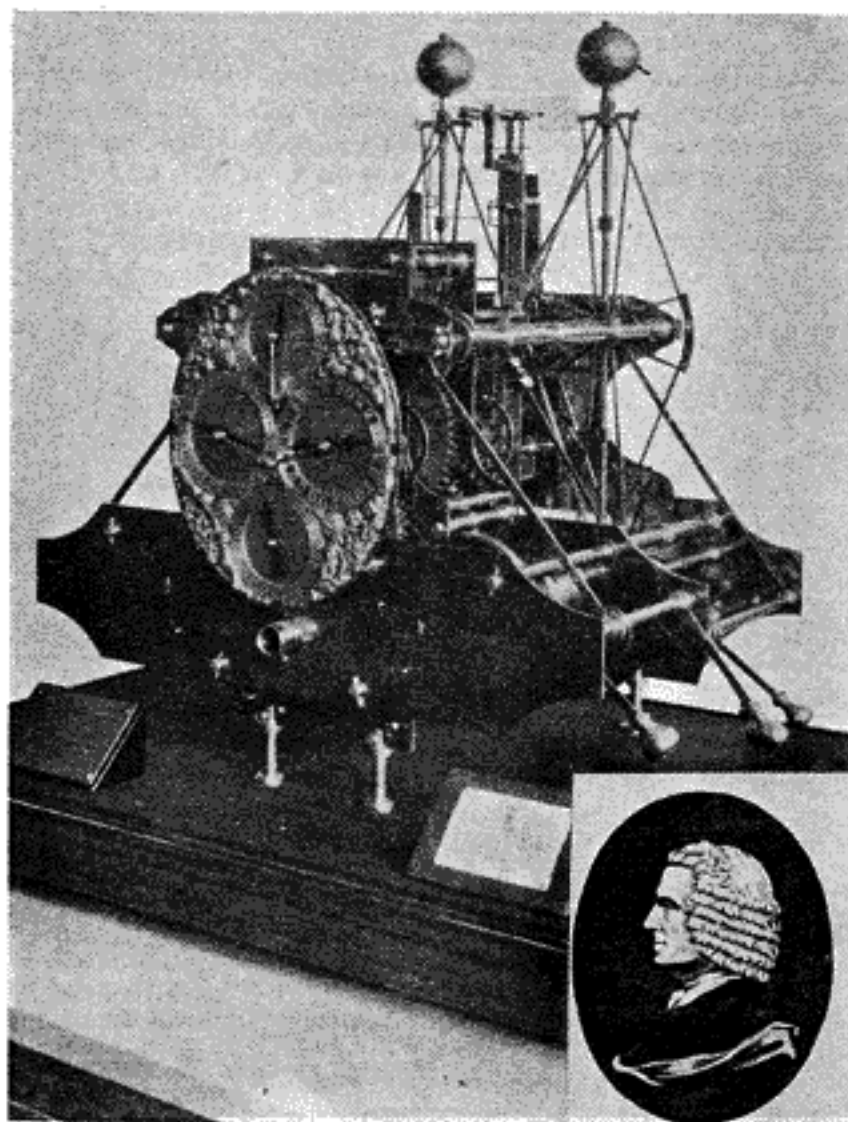
Harrison conservó en su propia casa el H₁, funcionando ininterrumpidamente durante 30 años, manteniendo la misma precisión que lo caracteriza. La Comisión juzga el desempeño del reloj lo suficientemente bueno, y decide adelantarle 500 libras a Harrison para la construcción de un segundo prototipo más liviano. De acuerdo con la opinión de algunos expertos, con un poco más de suerte, el H₁ hubiera ganado el premio de 10 000 libras.

DEL H₂ AL H₄

Harrison construye el H₂, un aparato hecho totalmente de metal, de 103 libras de peso —sin incluir la caja y la suspensión cardánica en donde venía montado. Jamás sería probado en el mar. En 1741 la Comisión otorga a Harrison un nuevo adelanto de 500 libras para la fabricación de un tercer cronómetro. El H₃ no es terminado sino hasta 1757, año en que Harrison anuncia a la Comisión que se encuentra listo para ser probado. Al mismo tiempo que construye el H₃, y para justificar el retraso y las posteriores erogaciones de la Comisión, construye un reloj cronómetro de dimensiones más modestas, el H₄. Harrison decide terminarlo antes de la prueba del H₃, ya que desea que realicen juntos la travesía. Finalmente el 18 de noviembre de 1761, zarpa del puerto de Portsmouth el buque "H.M.S. DEPTFORD" rumbo a Jamaica, pero llevando solamente el H₄. Lo acompaña

ENGRASE

Para reducir el roce entre las piezas, éstas eran lubricadas en los puntos de mayor fricción. Esta operación se efectuaba con aceites no inertes de origen animal. Al principio el resultado era el deseado, pero con el tiempo el polvo que se le adhería, los cambios químicos y de clima convertían al aceite en una pasta gomosa sumamente abrasiva que terminaba por detener la marcha del reloj, lo cual exigía el lavado de las piezas y un nuevo engrase. Lo que se necesitaba eran mejores aceites, otra disposición general de las piezas y nuevos materiales que redujeran la necesidad del engrase. Aún a principios del siglo XIX, el gran relojero Abraham Louis Breguet, inventor entre otras cosas del reloj automático y del reloj contra golpes, afirmaba: "Dadme el aceite perfecto y os daré el reloj perfecto".

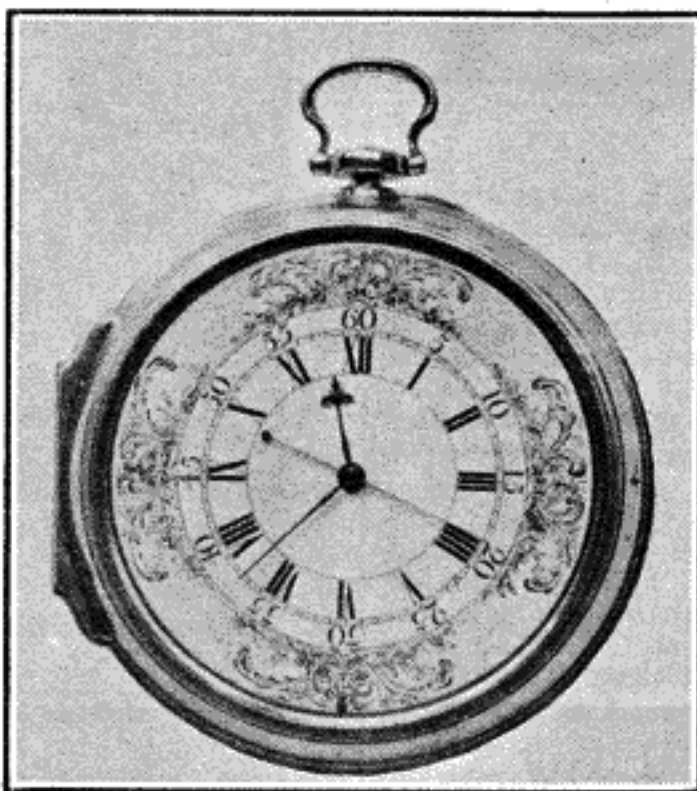


John Harrison y su cronómetro, el H₁

(¿Recuerda el lector *Motín a bordo* o *Motín en el Bounty*, ganadora del Oscar en 1935 como la mejor película, protagonizada por Charles Laughton, como Bligh y Clark Gable?). El K₂ fue robado por Fletcher Christian, jefe de los amotinados, quien junto con sus compañeros colonizó la isla Pitcairn. Años después, un cazador de focas norteamericano que la visitó, se llevó la sorpresa de su vida al descubrir que los nativos hablaban inglés y tenían en su poder: ibújula, sextante y cronómetro! El K₂ no volvió a Inglaterra sino hasta 1843, después de una serie de aventuras y ello gracias a un marino inglés que lo descubrió y lo compró en Valparaíso, Chile. Una tercera copia, el K₃, acompañó a J. Cook en su tercer y último viaje a bordo del "H.M.S. Discovery".

El relojero del Comité técnico, Thomas Mudge (1715-1794) es también digno de mencionarse, pues él es el inventor del escape de áncora libre, tan común hoy en día. Mudge nunca estuvo consciente de la importancia de su invención, que terminó imponiéndose sobre los otros reguladores un siglo más tarde.

Mientras tanto, las relaciones entre J. Harrison y la Comisión de Longitudes se habían agriado sensiblemente. Si antes se le otorgó apoyo tanto económico



El H₄

como moral, ahora la Comisión buscaba cualquier medio en su poder para oponerse, mientras que Harrison vertía su frustración en panfletos escritos en términos cada vez más virulentos en contra de la Comisión. La pugna entre ellos pasó a ser el prototipo de la lucha entre David y Goliath. Para Harrison el gigante a vencer estaba representado por el astrónomo real y comisionado Rev. Nevil Maskelyne, quien tenía un interés muy personal en que nadie (salvo él) ganara el premio. Maskelyne creía haber descubierto otro camino para hallar la longitud, basándose en observaciones cuidadosas de la posición de la luna, al que llamó el "método lunar". El principio es el siguiente: la luna es el cuerpo celeste visible de más rápido movimiento relativo a través de la bóveda celeste (aprox. 33 segundos de arco por cada minuto de tiempo). Este rápido movimiento permite que la luna sirva de manecilla de un monumental reloj astronómico cuya carátula es la bóveda celeste y las estrellas sus puntos de referencia. Si se midiese a una hora local convenida la distancia angular de la luna con respecto a una estrella fija y comparase este dato con la hora pronosticada en tablas de la misma observación desde algún punto de longitud conocida, la diferencia en tiempo podría convertirse en diferencia en distancia, fijando así la longitud.

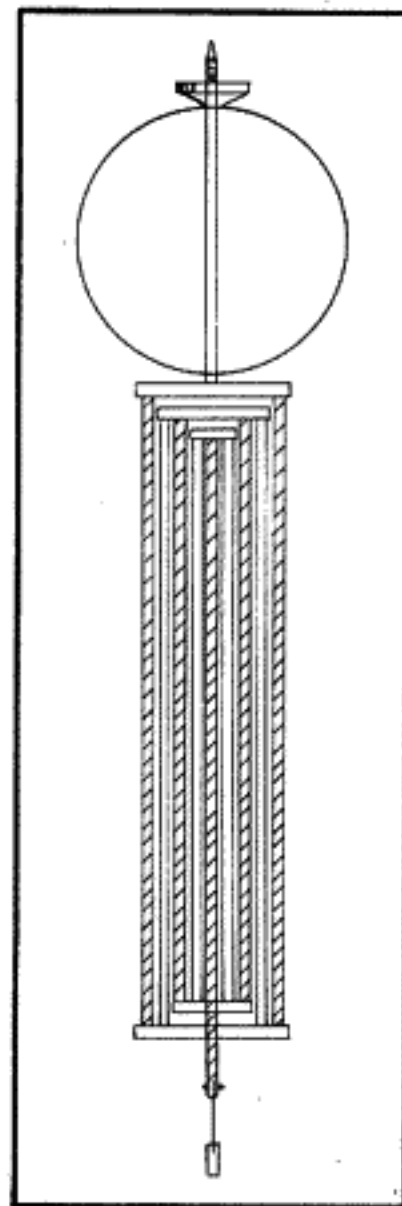


Diagrama 7. Péndulo de Harrison

Para esto era necesario entre otras cosas: 1) Un reloj que pudiera mantenerse razonablemente preciso durante unas 18 horas, tiempo suficiente entre una observación solar (para fijar la hora local) y la observación lunar. 2) Unas tablas con las distancias lunares pronosticadas, así como los tiempos asociados desde algún lugar de longitud conocida. 3) Un instrumento que permitiera medir distancias lunares. Con los avances hechos por relojeros precedentes a Harrison, el primer punto quedaba resuelto; pero el segundo punto resultaba más problemático, ya que requirió de miles de observaciones de la luna realizadas por múltiples científicos, como Halley, Clairaut y L. Euler entre otros. Inclusive el mismo Newton consideraba difícil predecir el errático movimiento de la luna, a tal punto que confesaba que era el único problema que le había producido jaquecas. Aun así, en 1713 obtuvo unas tablas con un error de 5 minutos en promedio. Finalmente en 1752 Tobias Mayer, un profesor autodidacta, logró producir tablas suficientemente precisas.

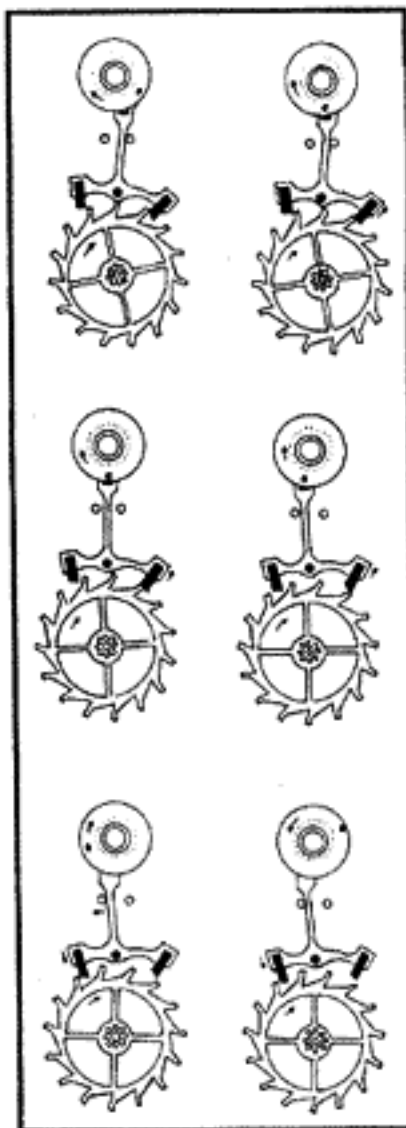


Diagrama 8. Diagramas sucesivos, que muestran la acción del escape de áncora.

El tercer punto lo resolvió en 1731 John Hadley, al inventar el *octante*, el cual lleva su nombre.

Sin embargo el método lunar estaba plagado de dificultades. Entre otras la posibilidad de obtener mediciones precisas sobre la inestable cubierta de un barco. Por lo general, cuatro observadores independientes se apostaban en diferentes puntos de la cubierta, hacían sus mediciones y el cálculo final se realizaba promediando los datos obtenidos, lo que claramente era un proceso complejo y tedioso. En esta ocasión fue el mecánico quien triunfó sobre el astrónomo.

Una tenacidad a toda prueba lleva a Harrison a terminar ya cerca de su octogésimo cumpleaños un quinto reloj, el H₅, similar al H₄, aunque más simple. Harrison se lo obsequia al rey Jorge III (muy aficionado a la horología) a quien ruega que lo pruebe en su observatorio de Kew. El examen dura 10 semanas y se obtiene un error de tan sólo 4 1/2 segundos, hecho suficiente para convencer al rey que la razón pertenece a Harrison. El rey interpone su influencia para que la Comisión le otorgue por fin la merecida recompensa. Esto es aprobado en un acto privado del parlamento, frente a las mismísimas narices de los comisionados,

quienes en venganza sólo pagaron a Harrison la suma total de 18 750 libras esterlinas, logrando escamotearle 1 250. Sólo lo consolaría la muerte tres años más tarde, en 1776.

Correspondería a los relojeros ingleses J. Arnold y T. Earnshaw, así como a los franceses F. Berthoud y P. Le Roy, encontrar soluciones más simples que las de Harrison. Esto permitió abatir el costo de los cronómetros y darles un aspecto como el que tienen actualmente.

El más famoso reloj de todos los tiempos, el H₄, junto con sus hermanos el H₁, H₂, H₃ y H₅ y las copias K₁, K₂ y K₃ se

EL OSCILADOR O REGULADOR

Esta parte del reloj es sin lugar a dudas la más importante y frágil del mecanismo, y como su nombre lo indica, regula la marcha del mismo. Sin él los engranes girarían a una velocidad cada vez mayor hasta agotar la fuerza motriz y la marcha duraría tan sólo unos segundos. La misión del regulador es liberar lenta y uniformemente la energía potencial acumulada en la cuerda. El rítmico tic-tac de nuestro reloj es la manifestación acústica de su trabajo. Para un relojero experto el examen auditivo equivale al que efectúa un médico con su estetoscopio.

El problema de los reguladores de la época era que permanecían en contacto con el tren de rodaje durante casi todo el ciclo de oscilación, lo que implicaba un roce en el momento más crítico. Además, mediante este contacto, las irregularidades le eran transmitidas casi íntegramente. El camino a seguir era evidente: diseñar un oscilador que fuese lo más libre posible, en donde el momento del impulso fuese más corto.

La invención del escape de áncora libre, adoptado casi universalmente, es consecuencia de estos esfuerzos (diagrama 8).

EL ERROR CIRCULAR

Una fórmula aproximada para el error circular $K \sim 1.65 \alpha^2$ donde α es el semiarco medido en grados y es válida independientemente de la longitud del péndulo. A continuación incluimos una tabla con algunos valores de K:

Semiarco	Segundos adicionales por día
0° 30'	.41
1° 00'	1.65
1° 30'	3.71
2° 00'	6.60
3° 00'	14.85
5° 00'	41.12
6° 00'	59.21
9° 00'	133.22
10° 00'	164.46
12° 00'	236.84

encuentran en perfecto estado y en exhibición permanente (salvo cuando se les da mantenimiento) en el museo Marítimo Nacional, en Greenwich, Gran Bretaña. □

REFERENCIAS

- Henry G. Abbot, (1898). *American Watchmaker and Jeweler*. Geo. K. Hazlitt & Co. Chicago. U.S.A.
- Frederick J. Britten, (1982) *Old Clocks & Watches and their makers*. Methuen London Ltd, novena edición (la primera edición data de 1899). England.
- Eric Bruton, (1979). *The History of Clocks and Watches*. Rizzoli, New York. U.S.A.
- Donald de Carle, (1959). *Watch and Clock Encyclopedia*. London N.A.G. Press. England.
- José Miguel Echeverría, (1979). *Coleccionismo de relojes antiguos*. Editorial Everest S.A. España.
- David S. Landes, (1983). *Revolution in Time*. Belknap, Harvard Press. U.S.A.

