

# La medida del tiempo I: Relojes clásicos

**J. Mariano Merino de la Fuente**

Catedrático de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid

**Ramiro Merino de la Fuente**

Prof. Titular de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid

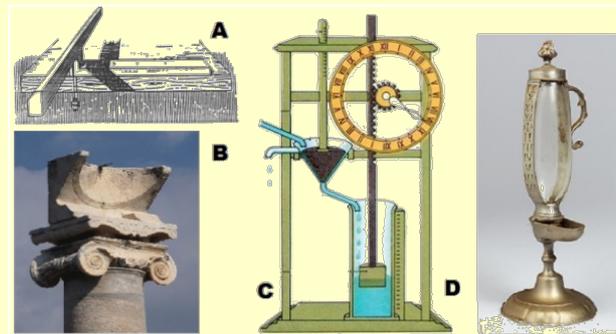
La medida del tiempo ha sido siempre la respuesta al empeño del ser humano por controlar y conocer su propia vida y la evolución del mundo que le rodea. La historia de la relojería constituye una epopeya científico-técnica vertebrada en torno a la idea obsesiva de medir el tiempo con más y más precisión. Los grandes maestros relojeros hicieron uso de los descubrimientos de los físicos para mejorar sus diseños y a su vez, las mejoras en la precisión cronométrica sirvieron para hacer avanzar la ciencia. En este artículo, los autores enfatizan en el *feed-back* que durante siglos ha habido entre la ciencia y la relojería así como en los principios físicos que rigen el funcionamiento de los relojes.

## Evolución histórica del reloj

Desde que el ser humano abandonó su condición de cazador recolector para asentarse en un emplazamiento fijo, sus cosechas y ganados pasaron a ser su principal preocupación. Con ello sintió la necesidad de medir el tiempo con la finalidad de coordinar actividades comunales, regular siembras y cosechas y prever el almacenaje y conservación de alimentos. En un principio fueron el Sol, la Luna, las migraciones de las aves y en general los acontecimientos naturales cíclicos los elementos de los que se sirvió para cuantificar el paso del tiempo. Desde estos hechos, hasta las medidas extremadamente precisas de los intervalos de tiempo que con fines científicos se hacen en los laboratorios de investigación, se ha recorrido un largo y apasionante camino que se inició en el antiguo Egipto, Grecia y Roma con relojes de sol, clepsidras, relojes de aceite y de arena.

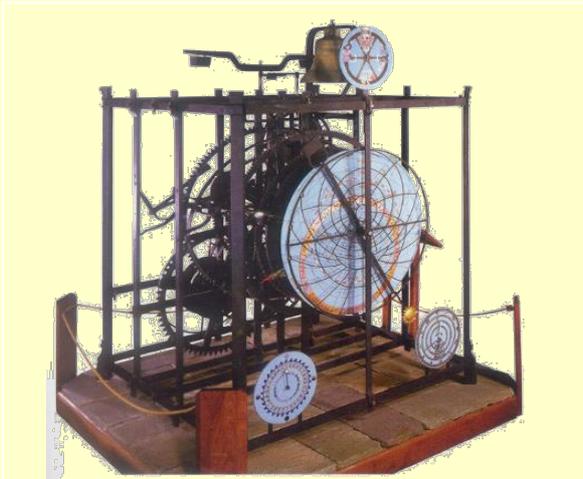
El proceso continuó en la baja Edad Media con los primeros relojes mecánicos accionados por pesas. Hubo que esperar a la primera mitad del S. XV para introducir en los relojes el resorte elástico como elemento impulsor, lo que permitió que estos pudieran transportarse con facilidad. La relojería mecánica experimenta extraordinarios avances en el S. XVII con la incorporación del péndulo de Galileo, el

volante con espiral de Huygens y el escape de áncora de G. Graham.



**Fig.1** Relojes de la antigüedad. A-Reloj de sol egipcio (1300 a.C.) B-Reloj de sol romano de Pompeya (50 d.C.) C-Clepsidra medieval D-Reloj de aceite (S. X).

Ya en el S. XVIII aparecen sofisticadas maquinarias, como el cronómetro de marina de John Harrison que permitió resolver definitivamente el problema de la situación de un barco en alta mar. El prototipo regulaba la marcha con un sistema de doble péndulo que era insensible al balanceo del barco. No menos desdeñables son las soluciones técnicas aportadas por Abraham Louis Breguet ya en pleno S. XIX así como las de Georges Frédéric Roskopf (conocido como "el relojero de los pobres") quien popularizó relojes de bolsillo baratos y precisos para el pueblo llano. En la segunda mitad de este siglo aparecen los relojes eléctricos en los que la nueva forma de energía sustituye a las pesas y los resortes.



**Fig.2** Reloj mecánico del monasterio de St. Albans en Hertfordshire, Inglaterra (hacia 1330).

<http://www.youtube.com/watch?v=7wE8pr9aFzM>  
<http://www.youtube.com/watch?v=EV6H251zzlY>

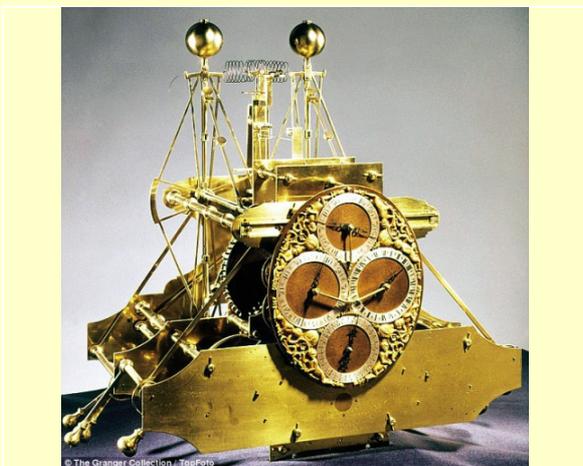
La idea obsesiva que ha presidido el desarrollo de la relojería a lo largo de los siglos ha sido el conseguir cada vez mayor precisión en las mediciones del tiempo. El acto de medir no es otro que comparar la magnitud objeto de medida con una cantidad de esa misma magnitud, previamente establecida, que llamamos unidad. En el caso del tiempo, lo tradicional desde la Edad Media hasta el S. XX ha sido comparar el intervalo de tiempo que se desea medir con el número de divisiones (horas, minutos, segundos) que ha avanzado la manecilla (horario, minuteru, segundero) en la esfera del reloj. El método en sí mismo, válido para la vida ordinaria, es altamente inexacto para fines técnicos o científicos, sobre todo si los intervalos de tiempo medidos son pequeños.

Ya en el S. XX aparecen los relojes electrónicos, en un principio se utiliza un diapasón que, accionado por un circuito oscilante, mueve los engranajes. Posteriormente aparece el reloj de cuarzo digital ideado por Joseph Horton y Warren Morrison, mucho más barato y fiable, que se ha popularizado hasta el extremo en la actualidad.

Desde mediados del S. XX se viene utilizando para obtener una alta precisión los relojes “atómicos” cuyo patrón de tiempo es la frecuencia natural de vibración de ciertas moléculas, como la del amoníaco o la frecuencia de transición entre dos estados energéticos de ciertos átomos como el Cesio-133 o el Hidrógeno.

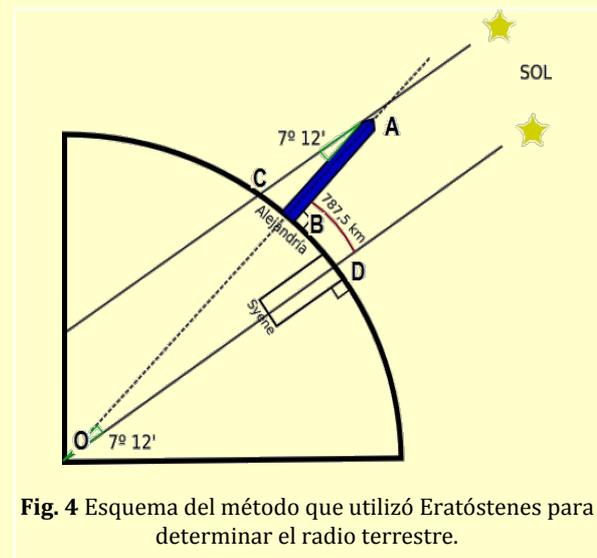
### Relojes de sol y ciencia: El cálculo de Eratóstenes

El uso de los relojes de sol estaba muy extendido en el antiguo Egipto, de hecho, los obeliscos eran no solo monumentos sino también relojes de sol públicos. Corría el año 255 a.C. cuando el bibliotecario mayor de Alejandría, Eratóstenes de Cyrene (276-194 a.C.), comprobó algo que era ya bien sabido entonces: Al llegar las 12 h del día del solsticio de verano (21 de Junio), la luz del sol iluminaba por completo el fondo de un estrecho y profundo pozo que se hallaba en la ciudad de Siena (hoy sabemos que la antigua Siena estaba situada en el trópico de Cáncer, paralelo terrestre en el cual el sol del mediodía, el 21 de Junio, se halla a una declinación de  $90^\circ$ ). Eratóstenes paseaba con frecuencia por la plaza de la biblioteca, en su punto medio había un obelisco y había comprobado durante años que dicho obelisco proyectaba una sombra apreciable en ese mismo momento.



**Fig. 3** Cronómetro de marina construido por John Harrison en 1736 (Royal Greenwich Observatory).

<http://www.youtube.com/watch?v=TCaZXTM8EOw>



**Fig. 4** Esquema del método que utilizó Eratóstenes para determinar el radio terrestre.

Ello le indujo a pensar que la Tierra no es plana sino esférica. Su mente analítica imaginó dos triángulos semejantes (fig. 4), el ABC formado por el obelisco y su sombra y el OBD formado por el radio terrestre y la distancia recta entre Siena y Alejandría. Por otro lado, la distancia en línea recta entre ambas ciudades se estimaba entonces en 5000 estadios (unos 900 km) lo que le permitió establecer una longitud de 6200 km para el radio terrestre; hoy sabemos que el radio terrestre mide 6.367 km lo que supone que Eratóstenes cometió un error del 15 %.

### La propulsión en los relojes mecánicos

Los engranajes mecánicos de los relojes necesitan una cierta energía para moverse. En un principio era la energía potencial de las pesas la que aseguraba la movilidad de aquellas viejas maquinarias de los siglos XIV, XV y XVI. Este método proporciona una fuerza motriz constante, pero obliga a que el reloj deba estar en un emplazamiento fijo. Por ello, las pesas se han utilizado como elemento motriz fiable y económico en relojes de torre y de pared.

Ya en la primera mitad del S. XV se introdujo el empleo de resortes de acero arrollados en espiral. Esta invención supuso la construcción de relojes más fácilmente transportables que los de pesas. Ahora bien, la energía elástica que proporciona un resorte tensado es proporcional a la deformación del mismo, conforme establece la Ley de Hooke. Por consiguiente, la fuerza con que el resorte empuja la maquinaria es máxima en un principio y se va decrementando a medida que el resorte se destensa. Para superar esta circunstancia adversa, los antiguos relojes de resorte incorporaban un "caracol" (ver la fig. 5) que se interponía entre el barrilete que aloja el resorte y la rueda primera de la maquinaria.



**Fig. 5** Maquinaria de un reloj inglés del S. XVII mostrando el complejo motriz barrilete-caracol. De la existencia de estos dispositivos deriva la frase popular "dar cuerda" a un reloj.

En el caracol se arrollaba una cuerda que también se arrollaba en el barrilete. El conjunto funcionaba de forma que cuando el muelle estaba totalmente tensado la cuerda estaba totalmente arrollada en el caracol y viceversa. De esta forma el par motriz del conjunto era prácticamente constante desde el inicio hasta el final. Con la mejora de las propiedades elásticas de los aceros actuales, el caracol cayó en desuso, estando ausente en los relojes del S. XX.

Pocos años después de que John Frederic Daniell inventara su pila eléctrica, varios inventores concibieron la posibilidad de que la corriente eléctrica moviera las maquinarias de los relojes. A mediados del S. XIX Alexander Bain y Matthaus Hipp elaboran sus respectivos prototipos que anticipan los usos que desde entonces se dará a la electricidad en relojería:

- el uso de electroimanes para almacenar energía en una pesa o un resorte
- el uso de electroimanes para propulsar los relojes secundarios
- el péndulo para operar los contactos para dar cuerda otros relojes
- el uso de un reloj principal para regular los péndulos de otros relojes
- el uso de un reloj principal para sincronizar otros relojes.

### Regulación de la marcha del reloj

#### Foliot

Es el regulador de marcha de los primeros relojes mecánicos. Su denominación procede del francés *faire le fou* (hacer el loco). Consiste en un escape de paletas que engrana con una rueda catalina (se denomina así a una rueda cuyo dentado es paralelo al eje. Debe su nombre al martirio que, según la tradición, sufrió Santa Catalina de Alejandría. La santa fue sujeta junto a una rueda en cuyos bordes se había instalado cuchillas. Al girar esta, las cuchillas laceraban el cuerpo de la mártir) accionada por la pesa. El eje de paletas mueve un travesaño en forma de vaivén y se puede regular su frecuencia situando convenientemente los dos contrapesos que se hallan en sus extremos. Al no disponer de regulador, la precisión de este tipo de reloj no era muy buena, llegando a variar más o menos media hora al día en el mejor de los casos.

#### Péndulo

La aplicación del péndulo de Galileo en la regulación de la marcha de los relojes se debe a Christian Huygens (1656). Inicialmente se completaba con un escape de paletas y a partir de 1670 se incorpora el escape de áncora. Siendo en principio un método mucho más exacto que el *foliot*, el péndulo sufre

modificaciones de longitud por causa de las variaciones de temperatura, lo que motiva que los relojes adelanten si la temperatura es baja y viceversa. Uno de los procedimientos para lograr esta compensación es sustituir el vástago del péndulo por dos o más varillas de hierro y de bronce (ver fig. 8). El coeficiente de dilatación del hierro es  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$  y el del bronce es  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$ . Combinando adecuadamente ambos materiales se consigue que el centro de gravedad del conjunto pendular se mantenga casi fijo. Otro procedimiento inventado por George Graham (1673-1751) es el uso del mercurio como masa pendular. Puesto que su densidad es casi tres veces mayor que la del latón, las variaciones del nivel del líquido motivadas por la temperatura compensan las variaciones de longitud del péndulo.

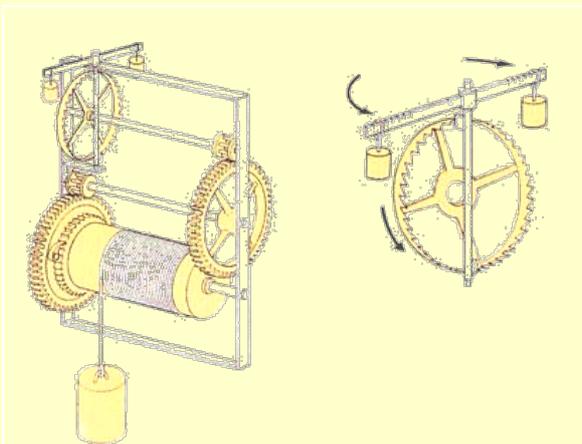


Fig. 6 Antiguo mecanismo de relojería con escape de paletas que acciona un foliot.  
<http://www.youtube.com/watch?v=90B6RI1hR9Q>

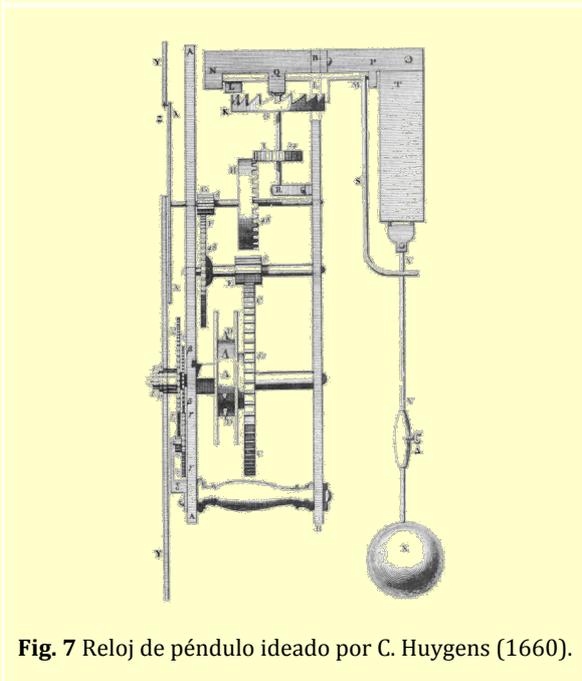


Fig. 7 Reloj de péndulo ideado por C. Huygens (1660).

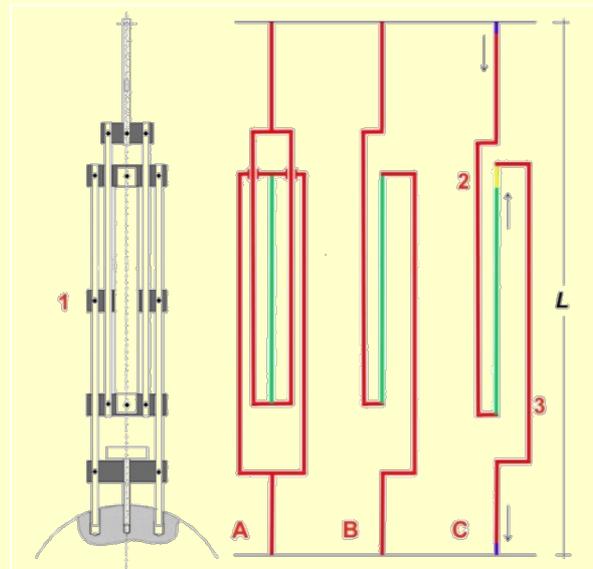


Fig. 8 Péndulo compensado térmicamente. 1 Varillaje múltiple en el que alternan el hierro y el bronce. A y B dos disposiciones del hierro (rojo) y el bronce (verde). C Ante una elevación de la temperatura, la suma de los incrementos de longitud del hierro (azul) es igual que el incremento de longitud del bronce (amarillo). Ello mantiene la longitud efectiva del péndulo.



Copyright © 2008 Theodore W. Gray  
 Fig. 9 Péndulo de mercurio de G. Graham. Al elevarse la temperatura el péndulo se alarga al tiempo que el nivel del mercurio sube. Lo uno y lo otro determina que el centro de gravedad del péndulo se mantenga inmóvil.

### Relojes de péndulo y ciencia: Determinación de la velocidad de la luz

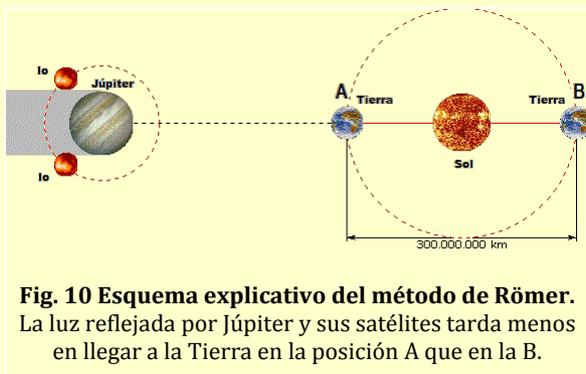
La incorporación del péndulo de Galileo como elemento regulador de la marcha de los relojes supuso un enorme salto en la conquista de la exactitud en las medidas de tiempo. Así, veinte años después de que Huygens materializara su invento de relojería, el astrónomo danés Òle Christensen Römer (1644-1710) estudiaba con su telescopio el

movimiento de la luna más cercana a Júpiter, Ío. Utilizando un reloj de péndulo había logrado determinar con la máxima precisión que le fue posible el período del satélite: 42,5 horas.

Tras meses de estudio llegó a apreciar que el paso de Ío por detrás de Júpiter se produce cada 42,5 horas (Para realizar dicha determinación, Römer hizo uso de un reloj de péndulo similar al representado en la Fig. 7), lo que supone que dicho satélite efectuaría 103 revoluciones en seis meses. Así pues Römer, tras registrar la hora exacta en que Ío aparecía por detrás de Júpiter en la fecha en que la Tierra está más próxima a él, determinó la hora en que Ío aparecería de nuevo tras pasar seis meses. En el anochecer del día 182 tras la primera determinación, Römer enfocó su telescopio hacia el punto en que se hallaba Júpiter y pudo comprobar que la aparición de Ío se producía 21,5 minutos más tarde de lo calculado. Por entonces se conocía la distancia Tierra-Sol, establecida en 150 millones de kilómetros, así que no le resultó difícil calcular la velocidad con que la luz debería recorrer el diámetro de la eclíptica terrestre:

$$V = 3.10^8 \text{ km} / 21,5.60 \text{ s} = 232.558 \text{ km.s}^{-1}$$

Si bien Römer cometió un error del 22% en su medida, ello no le resta el mérito de ser el primero en estimar una de las constantes físicas más importantes para la ciencia moderna.



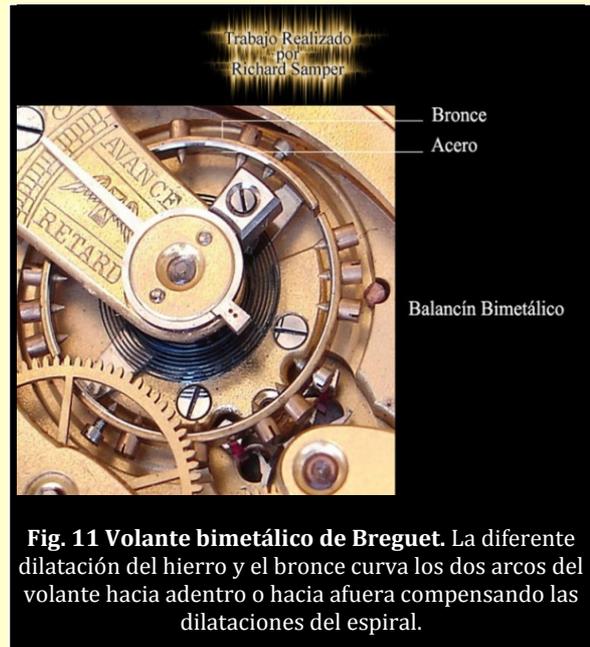
**Fig. 10 Esquema explicativo del método de Römer.** La luz reflejada por Júpiter y sus satélites tarda menos en llegar a la Tierra en la posición A que en la B.

### Volante de inercia

La invención del volante con resorte de espiral como regulador de la marcha de los relojes se debe a Christian Huygens. La incorporación del volante de inercia como elemento regulador de la marcha del reloj permitió que este pudiera ser transportable y pequeño. Así, los primeros relojes de bolsillo hicieron su aparición a finales del S. XVII. Sus elementos esenciales eran: Resorte elástico arrollado en espiral como elemento motriz (Ver fig. 11), volante con espiral de recuperación para la regulación de la marcha y escape de áncora o de cilindro.

También el complejo regulador volante-espiral es sensible a la temperatura, de forma que un

incremento de esta provoca un aumento de la longitud del espiral ocasionando un retraso del reloj. Abraham-Louis Breguet ideó un sistema compensador consistente en un volante cuyo aro estaría formado por hierro y bronce. A su vez estaría seccionado en la forma que muestra la fig. 11. Un aumento de la temperatura alargaría el espiral y motivaría el retraso del reloj, pero la diferente dilatabilidad del hierro y el bronce haría que los dos arcos se curvaran hacia adentro. Ello disminuiría el momento de inercia del volante y compensaría el efecto térmico adverso.



**Fig. 11 Volante bimetálico de Breguet.** La diferente dilatación del hierro y el bronce curva los dos arcos del volante hacia adentro o hacia afuera compensando las dilataciones del espiral.

### Relojes de volante y ciencia: La determinación de la longitud geográfica

La determinación de las coordenadas geográficas longitud y latitud ha sido una cuestión de gran importancia, cuando no de vida o muerte. Si la determinación de la situación en tierra firme presenta ciertos problemas, en alta mar lejos de cualquier referencia terrestre, resulta ciertamente complicada, especialmente la longitud. La determinación de la latitud en el mar puede hacerse con cierta facilidad si se dispone de una buena carta náutica en la que figuren las declinaciones exactas de ciertos astros de referencia para cada fecha del año. El problema de la determinación de la longitud es bien distinto. Es sabido desde la antigüedad que, tanto la salida como la puesta del sol, se retrasa regularmente a medida que el observador se desplaza hacia el oeste (e igual sucede con los restantes cuerpos celestes), debido a la rotación de la Tierra de oeste a este. Hasta finales del S. XVII la navegación era o bien de cabotaje, sin perder de vista la costa o, en los viajes oceánicos inaugurados por Cristóbal Colón, Fernando de Magallanes y Juan

Sebastián Elcano, se hacía a la estima. Para ello se hacía una medida lo más exacta posible de la velocidad de la nave respecto del agua. Para evitar problemas por no saber con exactitud la posición, los navegantes se basaron, siempre que era posible, en el aprovechamiento del conocimiento de la latitud. Navegaban hacia la latitud del punto de llegada en dirección este-oeste, es decir, siguiendo el correspondiente paralelo, entonces viraban hacia su destino en dirección norte-sur siguiendo una línea de latitud constante (procedimiento conocido como *corriente por un Westing*). Esto impedía que un barco siguiera la ruta más directa (un círculo máximo) o una ruta con los vientos y corrientes más favorables, alargando el viaje días o incluso semanas.

Antiguamente, un tripulante disponía de una cuerda o línea con nudos a intervalos regulares (generalmente una braza) atada a una pieza de madera denominada "barquilla". Su forma era lo más antihidrodinámica posible, ya que su función era permanecer inmóvil en el agua. <http://es.wikipedia.org/wiki/Corredera>. Otro tripulante disponía de un reloj de arena de alrededor de medio minuto. El primero arrojaba la barquilla por la popa y dejaba correr la línea que, en su primer tramo, no tenía nudos a fin de dar tiempo a que el elemento quedara flotando estacionario en el agua. Cuando llegaba al primer nudo daba la orden al otro tripulante para que diera vuelta el reloj y comenzara a contar el tiempo preestablecido. Cuando caía el último grano de arena, el tripulante a cargo del reloj daba la orden de hacer firme la línea. Habitualmente, el tripulante que sostenía la línea iba contando los nudos de ésta en la medida que iba dejando correr la línea, por lo cual bastaba estimar la fracción de cuerda entre el último nudo y su mano para informar la velocidad. Este procedimiento era muy inexacto y le sirvió a Colón para engañar a su tripulación haciéndola creer que se habían internado en el océano menos de lo real. Gracias a ello logró apaciguar el motín que se produjo tras dos meses sin ver tierra, el cual pudo dar al traste con la empresa. Todo esto dio origen a la unidad *nudo* usada en navegación (1 nudo=1 milla náutica por hora) tanto marítima como aérea.

Como vemos, la clave de la cuestión era disponer de un reloj lo suficientemente exacto como para medir con precisión el momento en que el astro de referencia se oculta en el horizonte, para así poder determinar la longitud geográfica a satisfacción.

Los relojes accionados por pesas y regulados a foliot no daban la precisión requerida y los de péndulo, existentes ya en la segunda mitad del S. XVII, se detenían por causa del bamboleo del barco. Conscientes de ello, los monarcas de la época estaban muy interesados en la posesión de un

ingenio relojero que no se detuviera por causa de los movimientos del navío y que fuera lo suficientemente preciso como para medir el tiempo de una navegación de dos o más meses. Así, Felipe II ofreció un premio en 1567 a quien resolviera el problema de la determinación de la longitud en el mar. Posteriormente, Felipe III hizo lo propio en 1598. Años después Holanda se unió a este esfuerzo, ya en 1636.



**Fig. 12** Prototipos creados por John Harrison para resolver el problema de la longitud geográfica en el mar. De izquierda a derecha: H1 (1736) y H2 (1741) regulados por péndulos de gravedad insensibles al balanceo de los barcos. H3 (1750) regulado por volante de inercia y espiral elástico recuperador. H4 (1760) morfológicamente parecido al anterior y miniaturizado, considerado como el primer cronómetro de marina de la historia. <http://www.youtube.com/watch?v=bcABUUIE-Zo>

Pero fue el relojero John Harrison (1696-1773) quien resolvió el problema, diseñando maquinarias impulsadas por resortes arrollados en espiral y reguladas por sistemas insensibles al balanceo de los barcos. El genial relojero diseñó cuatro prototipos entre los años 1735 y 1760. Las pruebas que se hicieron con los prototipos de Harrison fueron exitosas. El H4 se retrasó tan solo 5 segundos tras ochenta días de navegación y en 1773 el rey Jorge III concedió a Harrison el premio de 20.000 libras que tenía establecido para quien lograra un método exacto y fiable para determinar la posición de los barcos en alta mar.

Sin duda, los avances en relojería de Harrison y otros relojeros, influyeron decisivamente en la hegemonía marítima de ciertos países y determinaron el curso de la historia en los siglos XVII y XVIII.

### Oscilador electromecánico

Tanto los circuitos oscilantes como los osciladores electromecánicos son dispositivos que permiten regular con eficiencia y economía las maquinarias de los relojes. Su aparición data de los primeros años del S.XX y durante décadas han sido una alternativa importante en la relojería tradicional. El más renombrado ha sido el Bulova, comercializado en los años sesenta. Su funcionamiento puede verse siguiendo el vínculo de la Fig. 13; Su empleo ha caído

en desuso por la fuerte competencia de las maquinarias de cuarzo, mucho más baratas y exactas.



Fig. 13 Reloj de pulsera Bulova Accutron.

<http://www.electric-clocks.nl/clocks/animations/AnimationT-Bulova.htm>

## Escape

Es la parte más importante y delicada del reloj mecánico, donde el movimiento de rotación se convierte en oscilatorio, pudiendo considerarse como el corazón del reloj. Esta parte de la maquinaria es la que más innovaciones y sofisticaciones ha experimentado, siempre en pos de lograr una mayor exactitud. Los autores hemos optado por confiar a la imagen la exposición de este apartado.

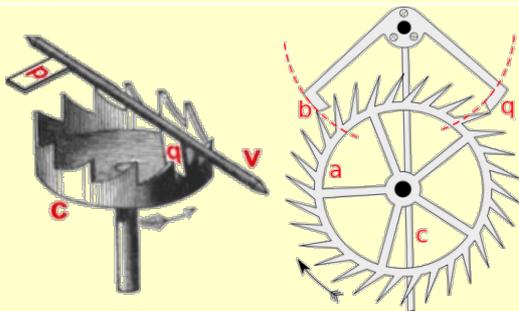


Fig. 14 (Izda): Escape de paletas. El giro de la rueda de escape empuja alternativamente las paletas **p** y **q**.

<http://medireltiempo.blogspot.com.es/2013/01/escape-de-paletas.html>

<http://www.youtube.com/watch?v=H40-epwBjho>

Fig. 15 (Dcha): Escape de áncora. Cuando el péndulo **c** está desplazado a la derecha **b** detiene a la rueda de escape. Al oscilar el péndulo hacia la izquierda **b** libera la rueda y esta empuja al áncora en el punto **q** para luego repetir el ciclo.

[http://www.youtube.com/watch?v=z\\_7rE8afffo](http://www.youtube.com/watch?v=z_7rE8afffo)

<http://www.youtube.com/watch?v=heAS0L1jANS>

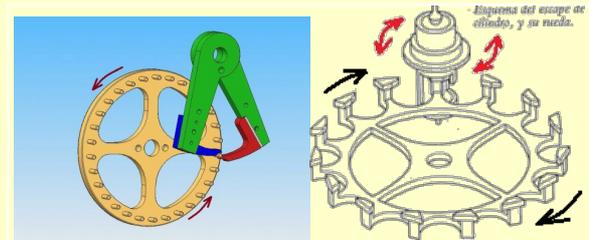


Fig. 16 (Izda) Escape de clavijas. Al girar la rueda de escape, las clavijas empujan alternativamente los extremos biselados (azul y ocre) de la tijereta.

<http://www.youtube.com/watch?v=LesVa6mApWo>

Fig. 17 (Dcha) Escape de cilindro. En cada oscilación del volante la oquedad del eje recibe un diente de la rueda de escape. En el siguiente semiperíodo libera dicho diente reteniendo al volver a la posición inicial recibe al siguiente diente, repitiendo el ciclo.

<http://www.youtube.com/watch?v=n2ZdzcMr3E>

## Engranajes

Por regla general, los relojes mecánicos tienen una rueda motriz en forma de barrilete en el que se arrolla la cuerda de la que pende la pesa o bien contiene en su interior el muelle elástico arrollado en espiral. Los relojes medievales tenían dos ruedas multiplicadoras además de la motriz y la de escape. Ello limitaba la autonomía a poco más de 24 horas y debían ser cargados a diario, como ventaja, se minimizaban las inevitables resistencias propias de los materiales de que estaban contruidos. A finales del S. XVIII aparecen relojes cuya autonomía alcanza las dos semanas; ello se consigue incorporando una tercera rueda al tren multiplicador (fig. 18).

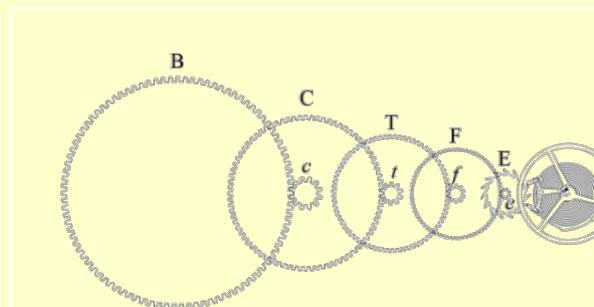


Fig. 18 Tren de engranajes típico de un reloj mecánico.

**B** Barrilete o rueda motriz. **C** Rueda primera. **T** Rueda segunda. **F** Rueda tercera. **E** Rueda de escape. **c, t, f** y **e** son los piñones de las respectivas ruedas.

<http://www.youtube.com/watch?v=uGcoIue1Bs8>

El tren de engranajes es distinto en los relojes de cuerda 1 día que en los de cuerda 7 o 15 días. En los primeros, la rueda primera **C** es la minuterá, esto es, da una vuelta completa por cada hora mientras que en los segundos la rueda minuterá es la segunda (Este es el caso de las maquinarias francesas de los S.

XVIII y XIX, denominadas “París” por los relojeros). En ambos casos, la rueda minuterera ocupa el centro de la platina (y por tanto de la esfera), razón por la que también se denomina *central*. La construcción de los engranajes se basa en dos realidades: A) El piñón y la corona de una rueda tienen igual velocidad angular. B) Los bordes engranados de dos ruedas contiguas tienen igual velocidad tangencial.

Fijémonos en la Fig. 18 y sean **B**, **C**, **T**, **F** y **E** el número de dientes de las coronas de las ruedas y **c**, **t**, **f** y **e** el número de dientes de los respectivos piñones. Los cocientes  $B/c$ ;  $C/t$ ;  $T/f$  y  $F/e$  serán los factores de multiplicación de cada engrane, o lo que es lo mismo, el número de vueltas que da el piñón impulsado por cada vuelta dada por la corona impulsora. En consecuencia, el factor multiplicativo total sería **BCTF/ctfe**.

Supongamos ahora una maquinaria cuyos valores son:

$$B=72; C=80; T=75; F=80; E=15 \quad y \quad c=12; t=10; f=10; e=8$$

El factor multiplicativo total sería:

$$72 \cdot 80 \cdot 75 \cdot 80 / 12 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 8 = 3600$$

Es decir, la rueda de escape da 3600 vueltas por cada vuelta de la rueda motriz.

El diseño de los engranajes se hace tomando como referencia la rueda minuterera, cuya velocidad angular deberá ser  $2\pi/3600 \text{ s}^{-1}$ . En la mayoría de los relojes mecánicos modernos (Fig. 12), la rueda segunda **C** es la minuterera y la cuarta **F** es la segundera, esto significa que el factor multiplicativo del conjunto es:

$$CT/tf = 80 \cdot 75 / 10 \cdot 10 = 60$$

Es decir, la rueda cuarta da 60 vueltas mientras la segunda da una sola. La rueda tercera actúa como multiplicadora y como inversora, haciendo que la minuterera y la segundera giren en igual sentido. Puesto que la rueda minuterera efectúa 60 vueltas a la hora, el número de oscilaciones que efectuará el volante en una hora será:

$$CTFE/tfe = 80 \cdot 75 \cdot 80 \cdot 15 / 10 \cdot 10 \cdot 8 = 9000$$

Finalmente, se puede calcular la autonomía del reloj sin más que contar el número de vueltas que es preciso dar a la llave de carga hasta que esta sea completa. Por regla general suele ser 5,5. Si multiplicamos esta cifra por el cociente  $B/c$  tendremos el número de vueltas que da la rueda minuterera hasta agotar la carga, es decir, el número de horas de autonomía del reloj. En el ejemplo propuesto:

$$\text{Autonomía} = 5,5 \cdot 72 / 12 = 33 \text{ horas}$$

## El reloj de la Universidad de Valladolid

### Reseña histórica

El reloj histórico de la Universidad de Valladolid es el tercero de los que han contado las horas de esta

institución académica. El primero de ellos fue construido en Valladolid en el año 1579 por Juan del Pedregal, un herrero afamado como hombre culto y entendido en las técnicas metalúrgicas así como en el conocimiento de los números. Se le impuso la condición de que fuera de mayor porte que el de los jesuitas y más ostentoso que el que ya poseía la Universidad de Salamanca. Se mantuvo en funcionamiento algo más de 250 años hasta que por su desgaste, fue sustituido por otro nuevo. Hubo un segundo reloj, construido por el relojero de la villa D. Miguel Sanz en el año 1788 que rigió las entradas y salidas de clase durante 81 años.

Los avances técnicos y el progreso de la ciudad durante el siglo XIX propiciaron que el claustro se planteara dotar a la Universidad de un reloj más preciso y de mejor funcionamiento, que emulara al reloj inglés ya instalado en la vecina Catedral (Este último fue restaurado por el prof. Ramiro Merino en 1995). Esto hizo que se encargara al relojero D. Ignacio Neugart la adquisición de uno nuevo, para que fuera instalado en la nueva torre del reloj, construida al efecto, en la esquina de la plaza de la Universidad con la calle Librería (aún hoy puede contemplarse el campanario de hierro de forja que sostiene la que fuera campana de las horas). Esto sucedió en los primeros meses del año 1859, desconociéndose el año exacto de su fabricación en la ciudad francesa de Morez. Expertos consultados datan su fabricación hacia el año 1855.



**Fig.19** El reloj histórico de la Universidad de Valladolid hacia 1940 (apréciese la “salvaje” restauración que sufrió la fachada de la c. Librería en los años 50).  
<http://www.youtube.com/watch?v=SpcxAO80nuc>

Es este último reloj el que ha sido objeto de restauración por parte del Prof. D. Ramiro Merino de la Fuente, gracias al apoyo técnico, logístico y económico de la Fundación Cartif, presidida por el Prof. Emérito D. José Ramón Perán González. (Hoy puede contemplarse en el patio del Colegio de Santa Cruz)

### Proceso de restauración

El paso de los años no perdonó a este reloj, y ya hacia el año 1960 el deterioro de sus engranajes era importante. Esto, unido a la reforma de la fachada de la Universidad del año 1970, hizo que fuera retirado de su ubicación, permaneciendo oculto en el bajo cubierta del edificio que da fachada a la calle Librería. Allí permaneció cubierto de polvo y herrumbre hasta 1996, año en el que fue trasladado a la exposición conmemorativa del 4º centenario de la concesión del título de ciudad, otorgado por Felipe III a Valladolid. Finalizada la misma, fue depositado en las dependencias de la Unidad Técnica junto al río Esgueva hasta mediados del año 2010, en el que se trasladó a las instalaciones de la Fundación Cartif en el P.T. de Boecillo, para proceder a su restauración.

Dado el lamentable estado en que se encontraba, fue preciso reconstruir piezas desaparecidas o muy deterioradas, pulir ejes, ajustar cojinetes y reconstruir la esfera así como el banco de sustentación de la maquinaria.

En la restauración de un reloj antiguo se presenta siempre el compromiso entre fidelidad y modernidad. Si lo que se desea es que el reloj se mantenga tal y como fue construido, nos encontraremos con el problema de su insuficiente precisión en el tiempo actual y de la excesiva dependencia impuesta por su mantenimiento: Baste decir que, al no poder ser instalado en su ubicación anterior por causa de la reforma de la fachada del edificio histórico de la UVA y estar colocado a nivel del suelo en el patio del Palacio de Santa Cruz, se requeriría subir las pesas 4 veces al día como mínimo. Por otro lado, si se instalara un sistema convencional de subida motorizada nos encontraríamos con la necesidad de modificar la maquinaria para incorporar un sistema de cadeneta continua con ruedas locas. Esto haría al reloj irreconocible y perdería su valor histórico.

Por añadidura, el péndulo es de vara metálica simple y debido a ello, sensible a las elongaciones térmicas. Por lo tanto, la marcha del reloj sería bastante irregular, llegando a parecer impreciso dentro de los cánones actuales. Cambiar dicho vástago por otro más moderno falsearía uno de sus elementos más importantes y con ello, el reloj en sí mismo.

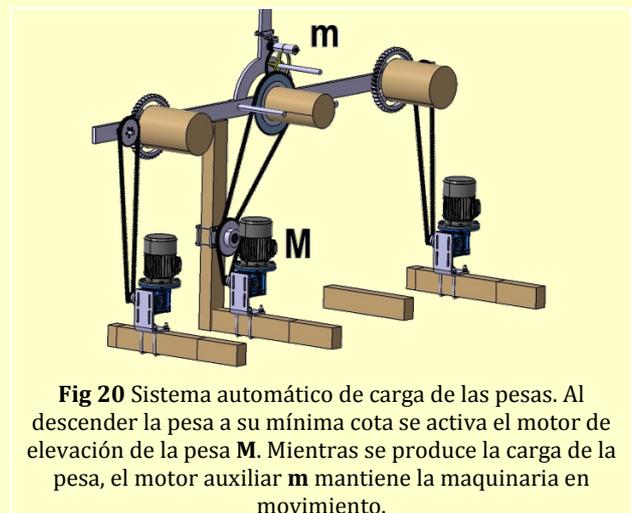
Se optó en consecuencia por diseñar un dispositivo automático anejo cuyo fin fuera conseguir recuperar en su plenitud un reloj del siglo XIX sin ocultar que se ha restaurado en el siglo XXI, y dotado de la precisión de un reloj actual. Para ello los retos determinantes han fueron:

- a) Emular el remontado a mano de las pesas de movimiento y sonerías.

- b) Sustener la marcha durante el remontado.
- c) Sustener la invariancia del periodo de oscilación del péndulo independientemente de la temperatura y otras variables interferentes y modificantes del mismo.

### Emulación del remontado manual

Esto se ha conseguido mediante la utilización de un motoreductor eléctrico dotado de un electroembrague, y gobernado por un variador de posición gestionado por un autómatas programable encargado de suministrarle las consignas de posición en función del estado actual. Como sensores externos se ha utilizado un sensor continuo de posición por cada pesa correspondiente, uno para el movimiento y dos para las sonerías.



Existen dos problemas graves en la motorización de un reloj de este tipo: uno es el freno mecánico que supone el reductor del motor cuando el reloj está en funcionamiento, debido a que este queda unido al tambor en el que se arroya el cable del que pende la pesa, y el otro es que al detenerse el motor cuando la pesa alcanza su nivel superior, el peso de la misma le hace retroceder, produciéndose un choque de los trinquetes del tambor contra los dientes de sierra del mismo, hecho este muy destructivo que termina originando daños graves a la maquinaria.

Al mandar la subida con un control de posición, se varía la consigna de forma programada, se realiza la detención al final de la carrera y luego, a marcha muy lenta, se invierte el movimiento hasta que los trinquetes se apoyan suavemente sobre los dientes de retención del tambor correspondiente.

Al ser un autómatas el que establece la consigna al variador, se tiene en cuenta si hay orden de subir otra pesa, si se están tocando campanadas en ese momento, y si excepcionalmente se hubiera sobrepasado la altura máxima permitida,

posibilitando diferir retardar, o detener el proceso como la haría un relojero que manualmente realizase esta operación en ese momento.

El electroembrague permite desacoplar todo el sistema motorizado del reloj y por ello no se perturba en modo alguno la maquinaria. Además, el movimiento puede ser transmitido por una cadencia auxiliar sobre un piñón postizo que pasa desapercibido en el contexto de la estructura.

### Sostenimiento de marcha durante el remontado

Subir una pesa de movimiento tiene como consecuencia que el par motor aplicado al reloj desaparece y el reloj se para. Para evitarlo se idearon los tambores dobles unidos por un resorte. Se actúa sobre uno, pero el otro sigue sosteniendo el movimiento hasta la descarga del resorte. Antes de que ello suceda, se ha subido la pesa y el comportamiento vuelve a ser el normal. Para emular este funcionamiento en la restauración de este reloj, se ha dispuesto un micromotorreductor eléctrico de C.C. engranado permanentemente mediante un piñón libre a la rueda tercera del movimiento. Cuando la pesa sube, el motor trabaja y arrastra al escape del reloj y cuando la pesa se abandona a su caída, esta arrastra a la rueda libre sin que ningún par se superponga ni afecte a la marcha de la maquinaria.

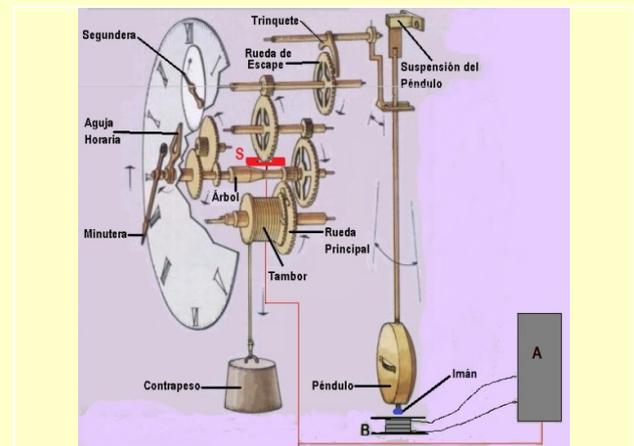
### Regulación de la invariancia del periodo de oscilación

En la ecuación del periodo de oscilación del péndulo simple, vemos que este depende de su longitud y de la aceleración de la gravedad. Si en relojería solo se podía actuar sobre la longitud de formas ingeniosas y sofisticadas, en nuestro caso optamos por actuar sobre el vector fuerza gravitatoria, bien sobre su componente vertical como sobre la horizontal. Por razones de tipo práctico hemos optado por la actuación vertical.

La implementación de este procedimiento consiste en incorporar un imán polarizado axialmente en el extremo inferior del eje del péndulo complementado con una bobina situada debajo del mismo. Si el reloj atrasa, se hace circular corriente continua por la bobina, que atrae al péndulo con una fuerza que se suma a la fuerza gravitatoria y logra la disminución del periodo de oscilación del péndulo. Si el reloj adelanta, se invierte la corriente y el efecto es el contrario.

Para saber si el reloj adelanta o retrasa se dispone un sensor de proximidad sobre la dentadura de la rueda tercera del reloj. Se determinó previamente el número de dientes exactos que deben pasar por

delante del sensor en cada hora, por lo que solo con un contador implementado en el autómata de control podemos saber la hora exacta que tiene el reloj, y de su comparación con el reloj interno del autómata, podemos conocer el adelanto o retraso correspondiente y así alimentar con la corriente polarizada adecuada, la bobina de control de marcha.



**Fig. 20** Sistema de regulación de la marcha. **S** Sensor de control de la velocidad angular de la rueda tercera. **A** Autómata. **B** Bobina.



**Fig. 21** El reloj de la U.Va. en su emplazamiento actual.

Vídeo sobre la restauración del reloj histórico de la Universidad de Valladolid

<http://www.youtube.com/watch?v=6N0Lp12ROf0>

### Agradecimientos

Debemos reconocer que la complejidad de la restauración del reloj histórico de la Universidad de Valladolid no podría haber sido superada sin la colaboración de muchas personas y de varias instituciones a las que manifestamos desde estas líneas nuestro agradecimiento y en especial a:

- Vicerrectorado de Patrimonio de la UVA
- Fundación Cartif
- Taller de Arte Tradicional Serem

#### PARA SABER MÁS

---

**Valdés, M.A. y Goddío, A.S.** (1999) "Relojes de sol en el Antiguo Egipto" *Rev. Analema* n<sup>o</sup> 25 <http://www.relojesdesol.info/node/945>

**Asociación de Amigos de los Relojes de Sol** <http://www.relojesdesol.info/>  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm#Procedimiento de Roemer](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm#Procedimiento%20de%20Roemer)  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm#Incremento del periodo observado de lo](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm#Incremento%20del%20periodo%20observado%20de%20lo)

**Inforeloj** (2005) "Glosario de relojería" <http://www.inforeloj.com/spa/item/ent.html>

**Bosschieter, J.E.** (2000) "La historia del desarrollo de los relojes eléctricos" *Federatie van Klokkenvrienden* <http://www.electric-clocks.nl/clocks/es/index.htm>

**Samper, R.** (2011) "El balancín" *Foro de Relojes* <http://www.foroderelojes.es/showthread.php/35560-El-balanc%C3%ADn>

**Cómo funciona el reloj mecánico?**  
**Wikipedia** "El reloj de pulsera" [http://es.wikipedia.org/wiki/Reloj de pulsera](http://es.wikipedia.org/wiki/Reloj_de_pulsera)  
<http://relojes.paramañana.es/index.html>