

Un breve paseo por la medición del tiempo

Achim M. Loske

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, 76100 Querétaro, Qro., México

loske@fata.unam.mx

Este relato podría comenzar en mil lugares y épocas distintas. Iniciallo junto al famoso “Big Ben” (**Figura 1**), en la multifacética capital del Reino Unido resulta especialmente atractivo. No es el reloj más complejo, interesante o preciso, pero sí uno de los más populares. Esta fama se debe a su ubicación, a sus cuatro majestuosas carátulas, a la torre de 98 metros de altura que lo alberga y, por supuesto, a su imponente campana de más de 13 toneladas, cuyo primer toque resonó en 1858. Situado a la orilla del río Támesis, en el Palacio de Westminster es, sin lugar a duda, uno de los relojes más fotografiados del mundo. Inicialmente, el nombre “Big Ben” se refería únicamente a la gran campana, en honor al corpulento comisario de obras de Londres, Benjamin Hall. Con el paso del tiempo, toda la torre con el reloj adoptó este nombre. Las pesas que requiere la maquinaria para su funcionamiento son gigantescas. Antiguamente, dos hombres trabajaban durante horas para levantarlas y, con ello, darle cuerda al reloj. Hoy en día, esta tarea la realiza un motor eléctrico. Su diseñador, el brillante abogado y relojero Edmund Beckett Denison (1816-1905), con apoyo del astrónomo George Airy y del relojero Edward John Dent, dotó al Big Ben de un sistema de escape, es decir, de regulación, novedoso. La melodía de su sonería, conocida como “Westminster”, ha sido reproducida en innumerables relojes. Se volvió famosa en todo el mundo a partir de 1924, cuando comenzó a transmitirse por la BBC (“British Broadcasting Corporation”) desde Londres. El error de este reloj no excede medio segundo en ningún instante, lo cual es formidable para un mecanismo de su época, sin embargo, debe reconocerse que, para lograrlo, el Big Ben recibe ayuda. Es precisamente esta ayuda la que nos lleva a nuestro siguiente destino: Greenwich.

Pero antes de viajar a Greenwich, permanezcamos un momento más junto al Big Ben, reflexionando sobre la medición del tiempo. Los primeros relojes mecánicos fueron contruidos a finales del siglo XIII, principalmente para iglesias y monasterios. Eran enormes, pesados y se adelantaban o atrasaban más de 15 minutos diarios. Curiosamente, aquellos primeros *guarda-tiempos* no tenían manecillas. Anunciaban el paso de las horas con el sonido de una campana. Posteriormente, surgieron relojes con una sola manecilla para indicar las horas. Pasaron varios siglos antes de que se introdujera el minuterio, pues los mecanismos antiguos carecían de un sistema de regulación confiable. La solución llegó con el uso del péndulo. El primer reloj de péndulo, diseñado por el físico holandés Christiaan Huygens en 1656, superó ampliamente la precisión de los mejores relojes de su época. Su mecanismo revolucionario marcó un antes y un después en la historia de la medición del tiempo.



Figura 1. Vista del Big Ben, con sus manecillas de 2.7 y 4.3 metros de largo, en el lado noroeste del Palacio de Westminster, la sede del Parlamento del Reino Unido.

Además de contar con un mecanismo de regulación, los relojes necesitan una fuente de energía. En un principio, esta provenía de la caída muy lenta de pesas que, al descender,

impulsaban el mecanismo. La desventaja del péndulo y de las pesas era que el reloj no podía ser portátil. Esta limitación se resolvió a finales del siglo XV con la introducción de resortes en espiral como fuente de energía. Inicialmente, aún tenían variaciones de varios minutos por día, pero su portabilidad marcó un avance importante.

No obstante, surge una pregunta: ¿cómo se ponían *a tiempo* los relojes? Sin ajustarlos periódicamente, después de unos meses hubieran diferido entre sí varias horas. Una solución fue recurrir a los relojes solares. Por eso, todavía hoy podemos admirar relojes solares junto a numerosos relojes de torre en iglesias y edificios públicos, especialmente en Europa (**Figura 2**).



Figura 2. Reloj mecánico y reloj solar en la Catedral de Bressanona (Brixen), en el Tirol del Sur, Italia.

La ventaja de los relojes solares es que *determinan* la hora, es decir, no sólo son *guarda-tiempos* (Landes 2007). Estos relojes, frecuentemente diseñados por astrónomos, nos permiten conocer la hora a partir de la proyección de la sombra de un indicador (o gnomon) sobre una carátula, es decir, según la posición relativa entre el Sol y la Tierra.



Figura 3. Reloj-lámpara del año 1700. El contenedor de vidrio se llenaba con aceite. La mecha sobresalía en la parte frontal. A medida que el aceite se consumía durante la noche, su nivel bajaba, permitiendo estimarse el paso de las horas en la escala vertical.

En días nublados o durante la noche, se recurría a relojes de aceite, agua, arena o fuego, que marcaban intervalos de tiempo mediante el consumo gradual de alguna sustancia (**Figura 3**). Independientemente de su mecanismo, muchos de estos relojes eran auténticas obras de arte.

Desde Londres, un corto viaje en tren nos lleva a un sitio formidable, donde se funden naturaleza, ciencia e historia. Cuando se habla de la determinación del tiempo, el famoso Observatorio de Greenwich es lo primero que viene a la mente.

Entre las piezas más fascinantes del museo del Observatorio de Greenwich se encuentran cuatro relojes diseñados y contruidos por un genio llamado John Harrison. Al estar frente a ellos, lo menos que podemos hacer es una gran reverencia y recordar que, con uno de estos relojes, Harrison ganó el millonario *Premio de la Determinación de la Longitud*, ofrecido por el Gobierno Británico a quien lograra encontrar un método para determinar la longitud geográfica de un barco en alta mar, con un error menor a medio grado (Sobel 2023).

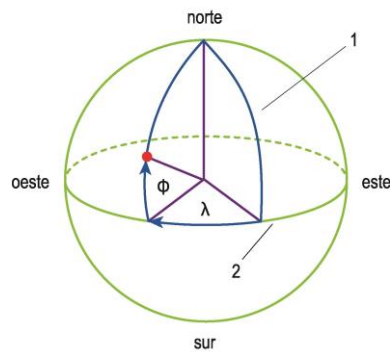


Figura 4. Convención para determinar la longitud geográfica (λ) con respecto al Meridiano de Greenwich (1) y la latitud geográfica (ϕ) con respecto al ecuador (2).

Pero ¿qué tiene que ver esto con los relojes? Recordemos que la latitud indica cuántos grados al norte o al sur del ecuador se encuentra un sitio (**Figura 4**). Por definición, la latitud de los polos es de 90 grados y la del ecuador cero grados. Sin embargo, para saber qué tanto hacia el este u oeste se ubica un lugar, se requiere otro ángulo: la longitud. Por razones históricas, desde 1884 la longitud se mide a partir del meridiano que pasa por el Observatorio de Greenwich, denominado Meridiano de Greenwich o Meridiano Cero. La Tierra se dividió en 24 husos (gajos) horarios imaginarios de 15 grados. Cada huso equivale a una hora.

Para que el capitán de un barco pudiera conocer su ubicación, era indispensable determinar la latitud y la longitud. De lo contrario, estaba perdido. Para calcular cuánto se había desplazado hacia el este u oeste, tenía que saber la hora en el lugar de partida y la hora en el sitio donde se encontraba. Determinar la hora en el lugar en el que se encontraba era posible observando la posición del Sol. En cambio, para conocer la hora del puerto de partida, se requería disponer de un buen reloj mecánico, pues no existían telecomunicaciones para preguntar qué hora era. Si el viaje era largo y el reloj se adelantaba o atrasaba, el error en la determinación de la longitud aumentaba, lo que causó numerosas catástrofes. Para evitarlas, el reloj debía funcionar correctamente en alta mar, por lo que no podía tener péndulo, y no debía desviarse más de unos cuantos segundos al día. ¡Un gran reto para aquella época!

John Harrison construyó un mecanismo asombroso, conocido como el *H1* (**Figura 5**). El reloj fue puesto a prueba en 1736, sin embargo, no cumplió con los requisitos. Debido al diseño revolucionario de su reloj, Harrison recibió apoyo económico para desarrollar un modelo mejorado, el *H2*. Lamentablemente, este reloj tampoco cumplió las normas impuestas por el Gobierno Británico para ganar el premio. Durante los siguientes 19 años, Harrison trabajó en el *H3*, pero antes de concluirlo comprendió que no lograría el objetivo. Finalmente diseñó el *H4*, un reloj compacto y muy distinto de los anteriores. Fue probado en 1761 y, aunque Harrison insistía que cumplía con las condiciones establecidas, el “Board of Longitude” se negó a otorgarle el premio, exigiendo más pruebas. El reconocimiento finalmente le fue adjudicado en 1773, a la edad de 80 años. Con una réplica de este extraordinario reloj, el capitán James Cook logró elaborar mapas precisos de Australia y Nueva Zelanda. El *H4* es considerado por muchos expertos como el reloj más importante de todos los tiempos, precursor de los cronógrafos marinos que hicieron la navegación mucho más segura.

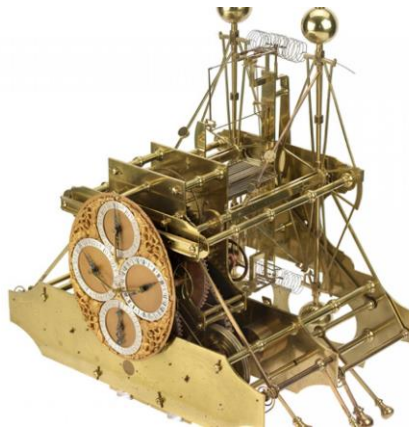


Figura 5. El *H1*, de 1.5 m de altura y 32 kg de peso, se encuentra funcionando en el “National Maritime Museum” de Greenwich. La carátula superior indica los segundos, la izquierda los minutos, la derecha las horas y la inferior los días.

La contribución de John Harrison al desarrollo de relojes cada vez más precisos fue invaluable. Con réplicas del *H4* se logró reducir el error diario a menos de tres segundos;

sin embargo, *conservar* la hora es sólo uno de los problemas a resolver, ya que de poco servía un excelente reloj si no se sabía cómo ajustarlo. La hora debía *determinarse*, y para ello se observaba el movimiento aparente de las estrellas.

Supongamos que observamos una estrella extremadamente lejana en el centro del campo de visión de nuestro telescopio. Si no movemos el telescopio, dicha estrella volverá a aparecer en el mismo lugar del ocular después de que la Tierra haya girado 360 grados (**Figura 6**). A este intervalo se le llama día sideral. Si hacemos un ejercicio similar con el Sol, podemos definir el tiempo que tarda en aparecer dos veces consecutivas en la misma posición del cielo. Ese intervalo se conoce como día solar. El día solar es aproximadamente 4 minutos más largo que el día sideral. Esto se debe a que mientras la Tierra rota, también se traslada alrededor del Sol y debe girar un poco más para que este vuelva a ocupar la misma posición aparente.

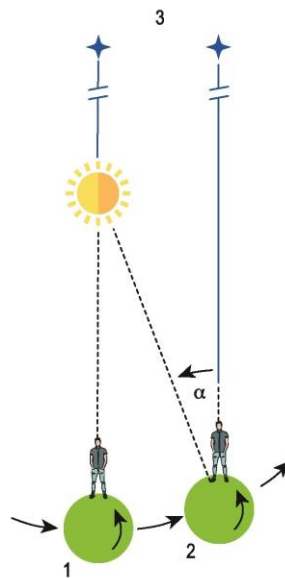


Figura 6. Debido a que la Tierra gira alrededor del Sol, el día solar es más largo que el día sideral. Después de rotar 360° sobre su eje y desplazarse de la posición 1 a la 2, aún tiene que girar un ángulo adicional (α) para que el Sol se encuentre nuevamente en el cenit. Una estrella muy lejana (3) se utiliza como referencia.

Como la velocidad de traslación de la Tierra alrededor del Sol es variable, la duración del día solar también cambia a lo largo del año. Sin embargo, para la vida cotidiana no es

práctico que los días y las horas tengan duraciones diferentes. Por ello se definió el día solar *medio*, obtenido mediante ciertos ajustes. Uno de ellos consiste en suponer que la Tierra se mueve con velocidad constante en una órbita circular, con el Sol en el centro. De esta manera se obtienen días, horas, minutos y segundos de duración uniforme. En general, existe una diferencia entre la hora solar *verdadera* y la hora solar media. Únicamente cuatro días al año el día solar y el día solar medio tienen la misma duración.

Por otro lado, la hora depende del sitio en el que se encuentra una persona. Desde el siglo XIX resultó poco práctico que dos ciudades separadas por unos cientos de kilómetros mantuvieran horas distintas. El problema se resolvió en 1883, con un acuerdo internacional. Como se mencionó anteriormente, el mundo se dividió en 24 zonas horarias, delimitadas por meridianos situados cada 15° , hasta llegar a los 180° al este y al oeste del Observatorio de Greenwich. Entre una zona y la inmediata existe una diferencia de una hora. Por convención, un reloj debe marcar la hora correspondiente al meridiano que rige la hora en la zona en la que se encuentra, sin necesidad de ajustes adicionales dentro de la misma zona.

Para la navegación, las agencias de noticias y otras áreas resultaba práctico utilizar una hora universal. El Meridiano de Greenwich no siempre fue la referencia mundial. Antes de finales del siglo XIX, los franceses medían la longitud geográfica a partir del Meridiano de París y los suecos desde uno que atravesaba Estocolmo. Finalmente, en la “International Meridian Conference” celebrada en 1884, se decretó que el Meridiano Cero para todo el mundo sería el que pasaba por el centro del ocular del telescopio del Observatorio de Greenwich (**Figura 7**). La hora media de Greenwich (“Greenwich Mean Time” o GMT) se definió entonces como la hora solar media en ese lugar.



Figura 7. El antiguo Observatorio Real de Greenwich, con la marca del Meridiano Cero (flecha) en el piso. Mediciones más precisas, realizadas muchos años después de su construcción, revelaron que la posición exacta del meridiano en realidad se encuentra a 102 metros de este sitio.

Con la aparición de los relojes de cuarzo y de los relojes atómicos, fue posible medir las variaciones de la velocidad de la rotación terrestre. Aunque estas fluctuaciones son sumamente pequeñas, actualmente es importante considerarlas para el correcto funcionamiento de sistemas como el GPS. Para compensar las diferencias que surgen debido a que la velocidad de rotación de la Tierra no es constante, se introduce ocasionalmente un segundo al tiempo que resulta de sincronizar más de 450 relojes atómicos instalados en centros de metrología de todo el mundo. Así se obtiene el llamado Tiempo Universal Coordinado (UTC), reconocido internacionalmente como referencia para definir la hora en cualquier lugar del planeta.

En México, la referencia oficial del tiempo está a cargo del Centro Nacional de Metrología (CENAM), en Querétaro. Los ajustes se realizan de modo que la diferencia entre el Tiempo Universal Coordinado (UTC) y el tiempo astronómico basado en la rotación de la Tierra (UT1) nunca exceda 0.9 segundos. La variación de su unidad básica,

el segundo, es extremadamente pequeña: del orden de 0.03 millonésimas de segundo por año.

El papel que juegan los relojes atómicos en nuestra vida cotidiana es fundamental (Rooney 2022), motivo por el cual este relato concluye imaginando que nos encontramos frente a uno de estos maravillosos instrumentos en algún centro de metrología del mundo (**Figura 8**). Ciertamente no tienen el aspecto de un reloj. Su belleza reside en la tecnología y en los principios físicos que los hacen posibles.

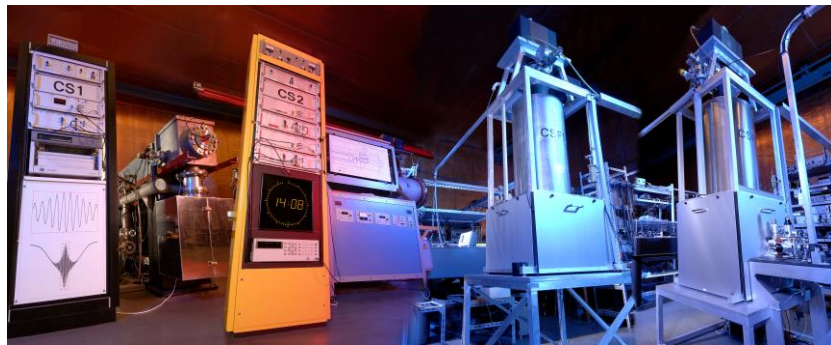


Figura 8. Imagen que muestra cuatro relojes atómicos en el Instituto Nacional de Metrología de Alemania (“Physikalisch-Technische Bundesanstalt”, PTB).

Referencias

Landes D.S. *Revolución en el Tiempo: El reloj y la formación del mundo moderno*. Barcelona, España, Editorial Crítica S.L., 2007. ISBN: 978-84-8432-745-5

Rooney D. *A tiempo: Una historia de la civilización en doce relojes*. Madrid, España, Editorial Alianza, 2022. ISBN: 978-84-1362-836-3

Sobel D. *Longitud: La verdadera historia de un genio solitario que resolvió el mayor problema científico de su tiempo*. Barcelona, España, Editorial Anagrama, 2023. ISBN: 978-84-339-7269-9