



Cronómetro de tiempo sidéreo. Peyer Favarguer Cie (Suisse), hacia 1900. Reloj ajustado a la escala de tiempo sidéreo, de platinas circulares con sistema fusé de fuerza constante y mantenimiento de potencia; duración de la cuerda de 56 horas, con indicación de su estado en la esfera; escape de cronómetro a detente tipo Earnshaw, batiendo medios segundos, con contactos eléctricos en el volante y rueda de escape para el envío de señales eléctricas a cronógrafos registradores; maquinaria suspendida en un sistema cardan con posibilidad de bloqueo. Observatorio Astronómico Nacional (Madrid).

LA MEDIDA DEL TIEMPO

Pablo de Vicente Abad

*Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Abstract

The measure of time is a quest that has accompanied mankind since its origin thousands of years ago. Although the nature of time is still unknown, humans have made huge progress in the techniques to measure it. Such is the precision reached in the measurement of time that some of our basic measurement units, like the meter, depend currently on measurements of time. This article makes a historical trip from ancient calendars to clocks, making some stops on scientific and technical details that have played an important role on the development of the current time system.

Introducción

Escribir sobre el tiempo resulta mucho más difícil que hacerlo sobre la medida del tiempo. El tiempo es omnipresente y no ocupa espacio, se puede medir pero es inasible para los sentidos, todo el mundo comprende lo que es pero nadie sabe definirlo y parece que sólo crece en una dirección. El ahora es tan efímero que deja de serlo inmediatamente. Algunos filósofos y científicos, como Newton o Einstein, han dedicado muchos años a la búsqueda de una definición apropiada, de modo que parece bastante claro que escribir sobre el tiempo es más complicado que hacerlo sobre su medida.

El tiempo es una de las magnitudes fundamentales en Física y su unidad en el Sistema Internacional es el segundo. A primera vista resulta evidente que es diferente del resto de las magnitudes fundamentales, como

la masa o la longitud. Tradicionalmente la Oficina Internacional de Pesos y Medidas ha conservado patrones de las magnitudes fundamentales, como por ejemplo el patrón de longitud, una barra de platino e iridio, y el de masa, un cilindro del mismo material. En la actualidad la definición de la primera depende del tiempo y no está asociada a un elemento físico.

El tiempo se mide empleando eventos periódicos y midiendo cuantos de estos eventos periódicos transcurren mientras se desarrolla lo que se quiere medir. Parece claro que se deben elegir cuidadosamente los eventos periódicos en función de lo que se quiere medir.

Tradicionalmente los eventos periódicos más sencillos de usar han sido los asociados a los fenómenos astronómicos porque están siempre presentes en la vida de los humanos. El evento periódico por excelencia es la duración del día. Otro evento periódico de mayor duración son las fases de la Luna y uno mayor, la duración del año medida observando los ciclos de la naturaleza, es decir las estaciones, o la posición del Sol en el cielo en el mismo momento del día.

Por tanto podemos dividir los eventos periódicos en fenómenos de larga duración, que se emplean en la elaboración de los calendarios, y en eventos de corta duración basados en relojes que se emplean para la determinación de la hora. En este artículo se hablará por tanto sobre calendarios y relojes.

Definiciones básicas: el día, el mes y el año

El día es un fenómeno astronómico producido por la rotación terrestre y se corresponde aproximadamente con el tiempo que tarda la Tierra en completar dicha vuelta. Para medir el tiempo transcurrido es necesario utilizar un cuerpo celeste visible desde la Tierra. El más sencillo es el Sol.

En principio uno podría intentar definir el día solar como *el tiempo transcurrido entre dos posiciones «iguales» del Sol en el cielo*. Sin embargo si uno registra las trayectorias del Sol en una lámina a lo largo de un mismo año, a una cierta latitud, observará que el Sol describe trayectorias diferentes cada día. La técnica de registro de estas trayectorias se denomina solarigrafía y se pueden encontrar algunas de ellas en Internet. Las «fotografías» que se obtienen, producen líneas curvas que se corresponden con el camino seguido por el sol en el cielo a lo largo de los días. Cada día el Sol aparece por el horizonte, si nos encontramos fuera de los círculos polares, alcanza su máxima altura al Sur (si nos encontramos en el hemisferio norte) o al Norte (si nos encontramos en el hemisferio sur) y se oculta por el horizonte. A medida que nos desplazamos del invierno al verano la trayectoria registrada en el cielo se abomba hacia arriba y se estira por los lados, y en el intervalo de tiempo del solsticio de verano al de invierno la trayectoria se encoge hacia abajo y la trayectoria se hace más corta. En el hemisferio Sur el comportamiento es idéntico pero las

estaciones están cambiadas. Por tanto no existe una posición «idéntica» del Sol de un día para otro que nos permita decir que ha transcurrido un día.

Sin embargo es posible definir el día solar como algo más preciso advirtiendo que el Sol siempre culmina al Sur o al Norte, es decir alcanza su mayor altura a su paso por el meridiano local. Por tanto un día solar medio se puede definir como *el tiempo transcurrido entre dos tránsitos del Sol por el meridiano*. Los humanos han empleado diferentes momentos para marcar el comienzo del día: el paso por el meridiano (occidente en la antigüedad), la salida del sol (egipcios), la puesta del sol (sumerios y babilonios) o el paso por el meridiano opuesto o medianoche (en la actualidad).

Al igual que el Sol, el resto de los astros también dibujan una trayectoria en el cielo y alcanzan su máxima altura al pasar por el meridiano local. Se puede definir un día sidéreo medio como *el tiempo transcurrido entre dos tránsitos de una estrella por el meridiano*. Un día sidéreo dura menos que un día solar, porque la Tierra está girando en torno al Sol y tras realizar una rotación completa en torno a su eje (día sidéreo) debe recorrer un pequeño arco más ($\simeq 1/365^\circ$) para que el Sol vuelva a estar en el meridiano del lugar. Es decir, el día solar es $1/365 \simeq 0,027$ veces más largo que el día sidéreo. La figura de la página siguiente muestra un esquema de la posición del Sol, la Tierra y una estrella para explicar la diferencia entre día sidéreo medio y día solar medio.

Un mes lunar sinódico se puede definir como el intervalo transcurrido entre dos fases idénticas de la Luna, o dos lunaciones. Dado que las fases lunares dependen de la orientación entre la Tierra, la Luna y el Sol, el mes lunar se repite cada vez que, por ejemplo, se produce una luna nueva, es decir, cada vez que la Luna se sitúa entre la Tierra y el Sol. También existe un mes sidéreo, que es más corto que el mes sinódico ya que se corresponde con una rotación de la Luna en torno a sí misma, utilizando como referencia el fondo de estrellas. El mes sinódico dura 29,53 días y el mes sidéreo 27,32 días.

Finalmente el otro gran evento periódico es el año. El año tropical es el tiempo transcurrido entre dos equinoccios iguales (los de otoño o los de primavera) y por tanto está asociado al ciclo de las estaciones. Otro modo de expresar el año tropical es el tiempo transcurrido para que la Tierra se mueva entre dos pasos sucesivos por el primer punto de Aries. El primer punto de Aries es el lugar donde se corta la eclíptica con el ecuador terrestre en la dirección de la constelación de Aries. La eclíptica es el plano en el que orbita la Tierra en torno al Sol y forma aproximadamente 23 grados con el ecuador terrestre. Ambos planos se cortan produciendo una línea recta llamada línea de los equinoccios. Esta línea a su vez corta la órbita terrestre en dos puntos. El punto que se encuentra en la dirección de la constelación de Aries vista desde la Tierra se llama primer punto de Aries. Este punto no permanece fijo en el tiempo porque la Tierra tiene un movimiento de precesión y de nutación que hace que el punto de Aries se desplace a través

de la trayectoria de la órbita, realizando una vuelta completa al cabo de 26 000 años.

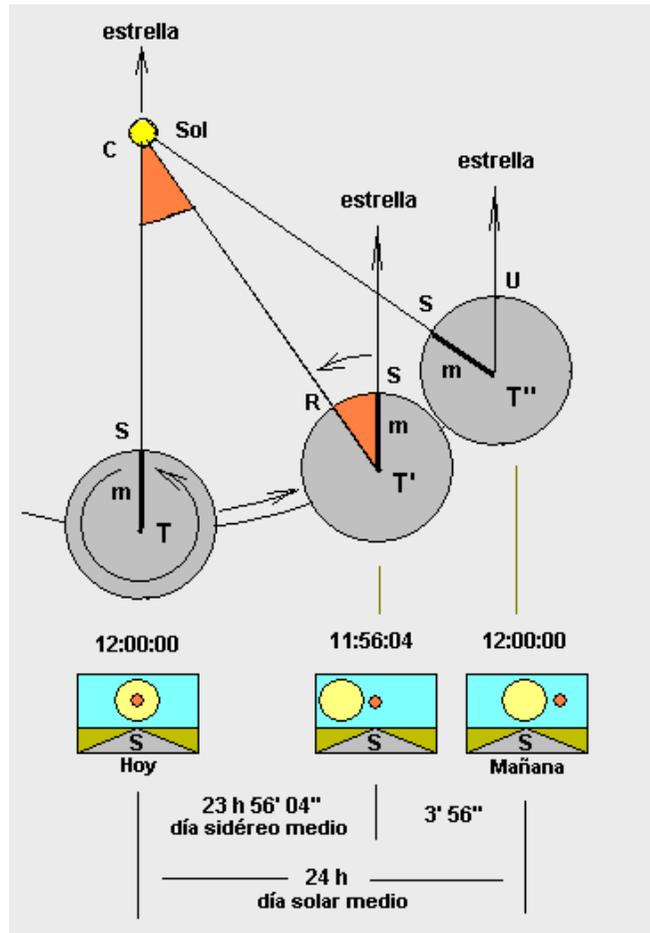


Figura 1: Día solar medio y día sidéreo medio. Se muestran la posición relativa del Sol, la Tierra y una estrella en tres momentos diferentes y desde dos perspectivas distintas: desde fuera de la Tierra y por encima del plano de la eclíptica, y el aspecto del Sol y de la estrella de referencia en el cielo desde la superficie de la Tierra. La escala no es correcta y está exagerada para poder apreciar la geometría fácilmente. La imagen es cortesía de Francisco Javier Blanco González (Wikimedia Commons).

El año sidéreo es el tiempo transcurrido para que la Tierra complete una vuelta al Sol tomando como referencia el fondo de estrellas y su duración es de 365,256363 días solares medios, diferente de la del año tropical. El año sidéreo está directamente relacionado con los signos del zodiaco. El signo del zodiaco indica la constelación que se ve tras el Sol durante una cierta época del año. Estas constelaciones se pueden distinguir al amanecer y al atardecer, cuando el brillo del Sol molesta menos a los observadores. Las constelaciones del zodiaco están situadas aproximadamente en el plano de la eclíptica y en diferentes direcciones. Debido a la precesión de los equinoccios el punto de corte entre la eclíptica y el ecuador varía lentamente respecto de esas constelaciones a lo largo de miles de años y por tanto el comienzo de cada estación sucede en posiciones diferentes de esas constelaciones. Sin embargo estos cambios son muy lentos y sólo se perciben a simple vista al cabo de miles de años. En la actualidad, el 21 de marzo el Sol aparece en la constelación de Piscis, y hace 4 000 años estaba en la constelación de Aries.

El problema de los calendarios

El objetivo de los calendarios es dividir el tiempo en unidades y subunidades que resulten prácticas para la sociedad. Idealmente las unidades son múltiplos de las subunidades pero esto no es posible si empleamos el año tropical como unidad y los meses lunares y los días solares medios como subunidades. El principal problema es que un año no dura un número entero de meses lunares y por tanto no se puede asociar un cierto mes lunar a una determinada época del año, algo que resulta muy útil para la organización de las fechas. Un año lunar, compuesto de 12 meses lunares, dura 354 días.

Las antiguas civilizaciones resolvieron este problema insertando meses o días de modo arbitrario o siguiendo una regla. Cada mes lunar recibía un nombre y estaba normalmente asociado a la constelación del zodiaco en la que estaba el Sol. Sin embargo como el año no está compuesto de un número entero de meses lunares era necesario duplicar algún mes cada cierto tiempo o añadir días extras.

A continuación se describen aquellos calendarios que han tenido importancia en el mundo occidental para comprender su evolución hacia el calendario civil que se utiliza en la actualidad.

Breve historia del calendario occidental

Existen tres tipos básicos de calendarios: los calendarios lunares, los lunisolares y los solares. Los primeros se rigen por las lunaciones y los meses se van desplazando a lo largo del año. Los calendarios lunisolares

intentan integrar las fases lunares con la duración del año, para conseguir que los meses lunares se produzcan siempre en la misma época del año. Los calendarios solares subdividen el año en partes iguales y están totalmente desconectados de las fases de la Luna.

Los calendarios lunares se han utilizado desde el paleolítico, porque son los más sencillos. Existen hallazgos arqueológicos, como los del hueso de Blanchard encontrado en una región de Francia, que demuestran que se utilizaban desde hace 27 000 años aproximadamente. El hueso de Blanchard muestra sobre su superficie las fases de la Luna durante tres meses. Este tipo de calendario resultaba adecuado para las sociedades cazadoras-recolectoras previas a la aparición de la agricultura.

Con la aparición de la agricultura, las estaciones del año se convierten en eventos muy importantes para las sociedades agrícolas, ya que son fundamentales los momentos de siembra y recolección. De hecho se comienzan a asociar las festividades religiosas con los actividades agrícolas más importantes. En el neolítico la sociedad se vuelve más compleja y aparece una diversificación de oficios y de estratos. La mayor parte de la población depende de la agricultura y de la ganadería. Aparece una clase dirigente y un ejército que mantiene el poder de la primera y que justifica su existencia en la protección que ofrece al resto de la sociedad, fundamentalmente campesinos, de los enemigos externos. Surgen los impuestos con la finalidad de sufragar al ejército, a la clase religiosa y a la clase dirigente. El calendario de los impuestos tiene que asociarse con la cosecha que es cuando los campesinos disponen de mayor riqueza. Por otra parte la cosecha se hace en el momento más propicio para la recolección, y cuando lo indica la clase religiosa. Este conocimiento reside en los sacerdotes que observan el cielo y determinan el momento del año, es decir de los solsticios y equinoccios, a partir de la posición del Sol respecto de las constelaciones del zodiaco.

En este tipo de sociedad surge la necesidad de establecer la subdivisión del año en partes aproximadamente iguales, asociadas a las estaciones del año y por tanto a los ciclos de la naturaleza, pero ligadas a las fases lunares que permitan una contabilidad más sencilla. Sin embargo los meses lunares no se pueden ajustar fácilmente con la duración del año, por lo que se buscan soluciones en las que se añade 1 mes lunar cada cierto tiempo.

La agricultura surgió en el creciente fértil y con ella florecieron civilizaciones como Sumeria y Babilonia. Los sumerios y los babilonios utilizaban un calendario lunisolar. El año comenzaba después de la cosecha y estaba dividido en meses de 29 o 30 días. Cada 3 o 4 años el rey, aconsejado por los sacerdotes que a su vez se regían por las observaciones, añadía un mes. Cada mes comenzaba después de una luna nueva, y cada día se dividía en 6 partes diurnas y 6 nocturnas, cuya duración era variable dependiendo de la época del año. Cada mes lunar recibía un nombre. Habitualmente el mes que se insertaba era Adaru, que se duplicaba y estaba asociado a

la constelación de Piscis (febrero-marzo en el calendario gregoriano) y en algunas ocasiones se duplicaba Ululu. Los nombres de los meses de este calendario se emplearon después en el calendario hebreo y algunos de ellos en el asirio.

En el año 499 a. de C., a partir de Dario I, los meses se comenzaron a regular de acuerdo con un ciclo de 19 años compuesto por 235 meses lunares. Este ciclo debe su nombre al griego Metón, que lo aprendió de los babilonios y lo progagó por Occidente. Los meses se insertaban de acuerdo con la siguiente regla: en los años 3, 6, 8, 11, 14 y 19 de un ciclo se añadía un segundo mes de Adaru; en el año 17 se añadía un segundo mes de Ululu. El ciclo de Metón indica el número de años en los que un mes lunar comienza el mismo día del año. Es decir, cada 19 años se produce luna nueva el mismo día del año, por ejemplo el 26 de junio. El ciclo de Metón se obtiene de calcular el mínimo común múltiplo de 365 y 29,5 días, las duraciones aproximadas de un año tropical y un mes lunar.

El primer calendario solar de la historia que se conoce se utilizó en Egipto. Egipto vivía gracias al Nilo y los desbordamientos anuales del río marcaban el ritmo de la sociedad egipcia, que vivía de la agricultura en sus orillas. Los años duraban 365 días y se dividían en 12 meses de 30 días más 5 días adicionales conocidos, en griego, como epágómenos. El año comenzaba con el orto helíaco de Sirio, que se asociaba con la crecida del Nilo en Memphis, capital del antiguo reino, y con el solsticio de verano. Ese día, Sirio emergía por el horizonte unos instantes antes y por el mismo lugar que el Sol. A esta coincidencia se le atribuyó un origen divino. Esta relación se desfasaba debido a la errónea duración del año que empleaban pero sabían que se repetía cada 1460 años, en lo que se conocía como ciclo sótico (de Sótis). Es decir, se producía una diferencia de 365 días en 1460 años que es equivalente a añadir 1 día cada 4 años. Este hecho se tuvo en cuenta mucho tiempo después para reformar el calendario egipcio.

En el año 238 a. de C. los sacerdotes y miembros de la clase religiosa se reunieron en Cánope y establecieron que el año tropical duraba 365 días y 6 horas. Resolvieron añadir un día a los epágómenos cada 4 años. La resolución tomada se encuentra escrita en tres lenguas en la Piedra de Cánope, en lo que se conoce como el decreto de Canopus. La reforma del calendario Ptolomeico no se llevó a cabo, posiblemente por diferencias entre los miembros de la clase religiosa, pero fue retomada doscientos años después por los romanos.

En el año 46 a. de C., Julio Cesar encargó a Sosígenes, un astrónomo alejandrino, que le asesorara para crear un nuevo calendario. Antes de la reforma el calendario romano era lunisolar. La inserción de meses y el cómputo de años era función de los sacerdotes que mantenían esta actividad en secreto y en ocasiones la ejecutaban de manera arbitraria según sus propios intereses.

Sosígenes conocía la fallida reforma de Cánope y propuso a Julio Cesar abandonar el calendario lunisolar y adoptar un calendario solar. La implantación del nuevo calendario se hizo en el año 45 a. de C.. Entonces se estableció que el año duraba 365 días y que cada 4 años se añadiría un día extra. Con el tiempo, estos años recibirían el nombre de bisiestos. Se dispuso que hubiera 12 meses de duraciones de 29, 30 y 31 días y se desplazó el comienzo del año de marzo a enero. Este año fue conocido como el año de la confusión porque se añadieron 85 días para poder corregir el desfase del calendario anterior, y por tanto el año tuvo 445 días. Hasta el año 8 DC el calendario Juliano sufrió algunas pequeñas modificaciones por errores que se habían producido en el cómputo de los días.

El desplazamiento del comienzo del año de marzo a enero, se puede observar en el nombre de los meses: septiembre se refiere al mes siete, cuando en realidad es el nueve, y lo mismo ocurre con octubre, mes ocho, noviembre, mes nueve y diciembre, mes diez. El mes de Julio recibió su nombre para honrar a Julio Cesar y el de Agosto para hacer lo mismo con Augusto, que no quería ser menos que su tío abuelo Julio Cesar. De hecho para que Julio y Agosto tuvieran la misma duración de 31 días hubo que quitar un día a febrero que quedó con 28 días. Otros emperadores posteriores pretendieron cambiar los nombres de los meses, pero estas modificaciones no perduraron.

La semana de 7 días fue instaurada en el calendario Juliano por Constantino el Grande, copiandola del calendario lunisolar judío. Decretó que el domingo fuese el día del descanso para adorar a Dios, ya que Jesucristo resucitó en domingo. Los nombres de la semana están asociados a los planetas, nombre en griego que significa errantes. Los errantes eran los astros más luminosos que se movían respecto del fondo de estrellas y se corresponden con los 5 planetas del Sistema Solar más próximos a la Tierra más el Sol y la Luna. En castellano, el domingo es el día del Sol, «sunday» en inglés y el sábado, nombre heredado de los judíos, es el día de Saturno, en inglés «saturday». La asociación del resto de los días de la semana con los planetas no requiere explicación porque es muy sencilla y se deja como ejercicio para el lector.

El calendario juliano comete un error de un día cada 125 años porque la duración del año tropical no es 365,25 sino 365,242189 días. En el año 1582, el papa Gregorio XIII promovió la reforma del calendario Juliano porque la fiesta de Pascua se iba adelantando a lo largo del año. En el año 325, el concilio de Nicea estableció que el domingo de Pascua se debía celebrar el domingo siguiente a la primera luna llena después del equinocio de primavera. Todas las demás fiestas religiosas cristianas estarían referidas a esta y debido a la diferencia de duración del año entre el calendario juliano y el año tropical esta fiesta se adelantó 10 días desde aquel concilio. Para resolver el problema se estableció una nueva regla para los bisiestos: Un año es bisiesto si es divisible por 4 excepto si es divisible por 100 y

no lo es por 400. Con este ajuste la duración del año queda en 365,2425 días. Además ese año se eliminaron los 10 días del calendario que se había desplazado la fiesta de Pascua desde el concilio de Nicea; al día 4 de octubre de 1582 del calendario siguió el día 15 de octubre de 1582.

Esta reforma fue adoptada inmediatamente por los países de religión católica romana. Otros países de religión protestante, anglicana y ortodoxa lo fueron adoptando años e incluso siglos después. Algunos países ortodoxos, como por ejemplo Rusia, Bulgaria o Grecia lo implementaron en el siglo XX. Algunas iglesias ortodoxas todavía siguen utilizando el calendario juliano para la determinación de la fiesta de pascua y por eso la navidad se celebra en dichas iglesias en los primeros días de enero.

Día Juliano y día juliano modificado

En 1583 J. Scaliger, un religioso holandés, propuso la contabilización del paso del tiempo empleando una cuenta continua de días y fracciones. A la unidad empleada le llamó día Juliano y propuso como comienzo del día 0 el mediodía en Alejandría del 1 de enero del año 4713 a. de C.. Esta elección la hizo empleando algunos argumentos un tanto abstrusos para los contemporáneos. A finales del siglo XIX los astrónomos adoptaron la fecha juliana, o contabilización del paso del tiempo en días julianos, utilizando el meridiano de Greenwich en lugar del meridiano en Alejandría. Los días julianos comienzan a mediodía siguiendo el criterio de Ptolomeo, que contabilizaba los periodos astronómicos contando los días desde el mediodía. La elección se hizo porque el paso del Sol por el meridiano local ocurre siempre a la misma hora aparente, independientemente de la época del año, al contrario de lo que sucede con el amanecer o el atardecer, momentos, que como hemos dicho antes, empleaban algunas civilizaciones para determinar el comienzo del día.

La fecha juliana se utiliza en la actualidad para el cálculo de las efemérides astronómicas. Existen algoritmos sencillos que permiten pasar de una fecha de calendario gregoriano a día Juliano y viceversa. El 1 de enero de 2000 a mediodía corresponde al día Juliano 2 451 545,0. La fecha juliana es muy útil para calcular intervalos temporales porque estos se obtienen por simple substracción.

El día Juliano modificado fue introducido por el Smithsonian Astrophysical Observatory en el año 1957 y se define como el día juliano menos 2 400 000,5. Por tanto los días julianos modificados comienzan a medianoche, como en el calendario civil. Este número también se emplea con frecuencia en astronomía para datar eventos.

La división del día

Para poder medir eventos cuya duración es menor que la de un día solar medio es necesario dividir este en fracciones. En la antigüedad los sumerios y babilonios dividían el día en doce partes: seis durante las horas de luz y seis durante la noche. Los egipcios dividían el día en doce partes diurnas y doce nocturnas. La subdivisión del día egipcio es por tanto el origen de las actuales horas. La división del día en doce o veinticuatro horas está relacionado con la utilización del sistema sexagesimal en el medio oriente. Se cree que procede de la costumbre de contar empleando el pulgar sobre las 12 falanges del resto de los dedos de esa mano. Además, el 60 es divisible por 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 y 30 lo que resultaba muy útil y facilitaba el cálculo de fracciones. Este es el origen de la subdivisión de las horas, y los grados, en 60 minutos y estos en 60 segundos.

La duración de las horas diurnas y nocturnas para los antiguos era diferente y además dependía de la época del año. En invierno las horas nocturnas eran más largas que las diurnas y en verano ocurría lo contrario. De hecho la duración del día, entendido en este caso como la fracción diurna del día solar medio, y de la noche dependen de la latitud del lugar y de la época del año. Esta variabilidad en la duración de la parte diurna y nocturna del día se debe a la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto de la eclíptica. La inclinación, de 23 grados, también es el origen de las estaciones.

Este tipo de horas, llamadas temporarias o desiguales, se utilizaron hasta el siglo XIV, a pesar de que en el año 130 a. de C. Hiparco propuso el uso de horas de igual duración. La desigual duración de las horas no tenía mayor importancia para las sociedades agrícolas porque el ciclo de vida de sus habitantes estaba regido por el amanecer y el atardecer.

Relojes antiguos

Los primeros relojes de los que se tiene noticia son los relojes de agua, también conocidas como clepsidras, y los relojes de sol.

Es posible que los relojes de agua fueran empleados por primera vez en China hace 4000 años. El primer reloj de agua del que se tiene constancia física es una vasija egipcia datada entre los años 1415 a 1380 a. de C. perteneciente al reinado de Ahmenotep III encontrada en uno de los templos de Karnak. Los relojes de agua eran vasijas cerámicas, habitualmente con forma de cono truncado, con un orificio en el fondo y marcas en su interior. La vasija se llenaba una vez y el agua, al ir descendiendo, descubría las marcas que indicaban el paso de las horas. No es correcto suponer que el flujo del agua fuera uniforme porque el peso de la columna de agua varía a medida que la vasija se vacía. Más adelante los griegos inventaron mecanismos para corregir este efecto.

Los relojes de agua se utilizaban de noche en Egipto, pero en la sociedad griega y romana se empleaban para fijar el tiempo de los oradores en los juicios y en las guardias nocturnas del ejército romano. Se siguió utilizando durante centenares de años después como un método eficiente para medir el tiempo. Ctesibius, un inventor y matemático griego, concibió un reloj de agua que marcaba las horas empleando un puntero y un dial. El reloj también empleaba un mecanismo que garantizaba un flujo de agua uniforme. La figura 2 muestra un grabado del siglo XIX.

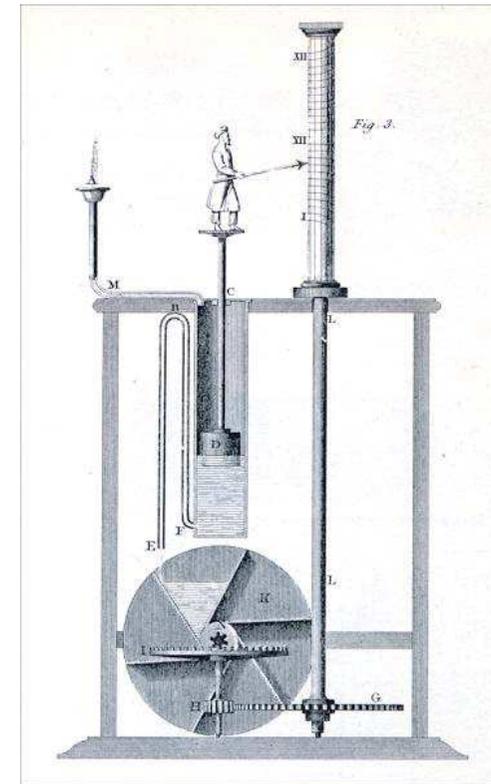


Figura 2: Diagrama de una clepsidra de Ctesibius según un grabado del siglo XIX. El indicador de las horas asciende a medida que lo hace el agua en el tubo. Cuando esta llega a su punto más alto, el tubo se vacía llenando el cangilón de abajo y se hace rotar una rueda dentada que, a su vez, mueve la lámina sobre la que apunta el puntero. La lámina contiene líneas que tienen en cuenta la desigual duración de las horas.

Los primeros relojes de sol de los que se tiene constancia física son los obeliscos, algunos de los cuales datan del año 3500 a. de C.. Los relojes de sol están hechos de un estilete llamado gnomón que proyecta su sombra sobre una superficie plana habitualmente colocada verticalmente u horizontalmente. A medida que el sol se desplaza por el cielo la sombra del gnomón recorre la superficie, que está grabada con marcas, que se corresponden con las horas del día. Si el reloj de sol es vertical el gnomón debe estar en el meridiano local y formar un ángulo con la superficie igual a la latitud del lugar. El mayor reloj de sol de la antigüedad fue el reloj de Augusto y fue descrito por Plinio el Viejo. La figura 3 muestra una reconstrucción hipotética del siglo XIX. El gnomón era un obelisco que en la actualidad está en la plaza de Montecitorio en Roma.

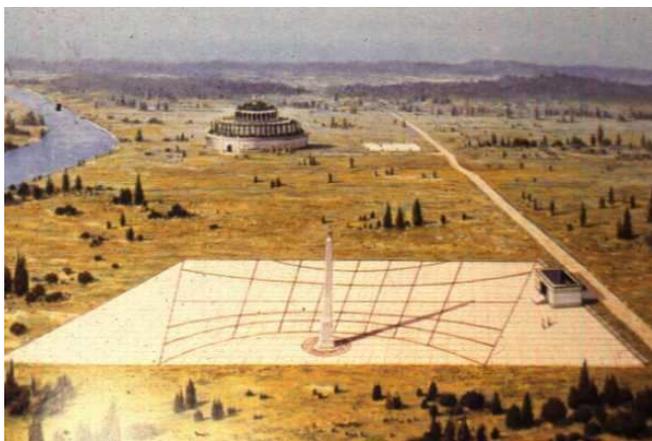


Figura 3: Reconstrucción del reloj de sol de Augusto según un grabado del siglo XIX. Estaba integrada con el Ara Pacis a lo largo de la Vía Flaminia.

Los relojes de sol marcan el tiempo solar aparente. El tiempo solar medio se obtiene a partir del día solar medio que es un promedio de los días solares aparentes a lo largo de un año tropical. La diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente se conoce como ecuación del tiempo. El tiempo solar aparente, es decir el movimiento diario aparente del sol, no es uniforme debido a dos causas: la oblicuidad de la eclíptica que forma 23 grados aproximadamente con el ecuador terrestre como ya se mencionó anteriormente, y la excentricidad de la órbita elíptica de la Tierra en torno al Sol. La última causa es fácil de entender. La Tierra se mueve en torno al Sol siguiendo una órbita elíptica. De acuerdo con las ecuaciones de Kepler el movimiento de la Tierra en torno al Sol es más rápido en sus

proximidades de acuerdo con la ley de áreas iguales barridas en tiempos iguales. Cuando la Tierra está próxima al Sol los días son más largos que cuando está más alejada.

Un reloj de sol puede adelantarse hasta 16 minutos y retrasarse 14 minutos a lo largo del año. La figura 4 muestra la ecuación del tiempo en función del día del año. En el capítulo «Tiempos» de este anuario se incluye la ecuación del tiempo que permite corregir la medida de un reloj de sol y obtener el tiempo solar medio.



Figura 4: Representación gráfica de la ecuación del tiempo a lo largo del año. Los relojes de sol se adelantan hasta 16 minutos en Noviembre y se retrasan 14 minutos en febrero. Fuente: Wikimedia.

Relojes mecánicos

En la Edad Media comenzaron a aparecer relojes en Europa que usaban pesos y muelles. Los relojes medievales utilizaban un mecanismo de escape de paleta y balancín, también conocido como Verge y Foliot. Un peso unido a una cuerda enrollada en un cilindro movía una rueda de corona. La rueda giraba por el peso pero era detenida por unas paletas solidarias con un eje vertical que en su parte superior disponía de un balancín con dos pesos. El balancín oscilaba en un sentido y en otro y el eje solidario con el, permitía el paso de un diente de la rueda de corona. Este mecanismo se llama «de escape», ya que cada oscilación detiene la rueda y luego la libera brevemente, permitiéndola girar un poco. La frecuencia del reloj se ajustaba separando o acercando los pesos. La oscilación del balancín

producía un sonido rítmico característico de los relojes. La figura 5 muestra un diagrama del mecanismo de escape.

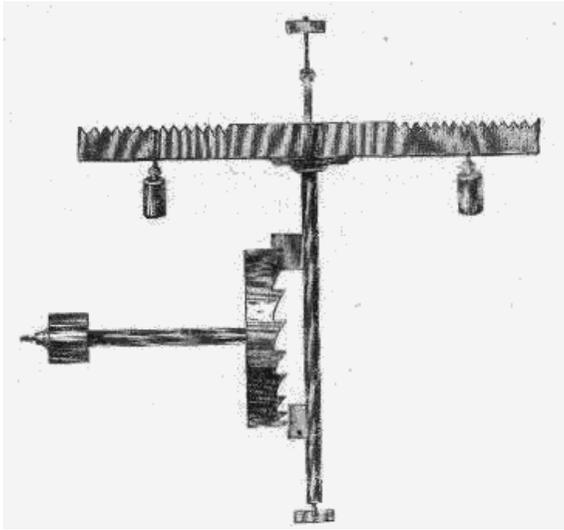


Figura 5: Mecanismo de paleta y balancín de Henri de Vick de 1379 (Paris). La imagen procede del tratado de 1849, «Historia de la Relojería» de Pierre Dubois. Fuente: Wikimedia.

A comienzos del siglo XIV el herrero alemán Peter Henlein inventó un reloj mecánico de muelle que utilizaba un mecanismo similar de rueda de escape. Estos relojes son los precursores de los relojes cronómetros que mencionaremos más adelante. Los relojes medievales mantenían el tiempo con un error de 15 minutos por día y por tanto no disponían de minuterero.

A comienzos del siglo XVII Galileo descubrió el isocronismo de los péndulos y propuso su uso para la medida del tiempo. Galileo advirtió que el período de oscilación de un péndulo no depende de la amplitud de la oscilación ni de la masa suspendida en su extremo, tan sólo de su longitud y de la gravedad. Los péndulos largos oscilan más lentamente que los cortos. Este periodo de oscilación «natural» es una propiedad que permitía la fabricación sencilla y repetitiva de relojes con un funcionamiento similar y por tanto poco error. Más tarde se conoció que el periodo de oscilación depende ligeramente de la amplitud de esta, pero cuanto menor es la amplitud menor es el error cometido.

En 1656 Cristian Huygens, astrónomo, físico y matemático holandés, fabricó el primer reloj de péndulo empleando un mecanismo de escape de Verge (rueda de corona) similar a los de los relojes medievales. Este reloj

mantenía el tiempo con un error de 10 segundos por día lo que supuso un avance considerable respecto de aquellos. Este momento supone un cambio drástico en la medida del tiempo. La figura 6 muestra un dibujo del propio Huygens que corresponde al segundo reloj de péndulo que fabricó en 1673.

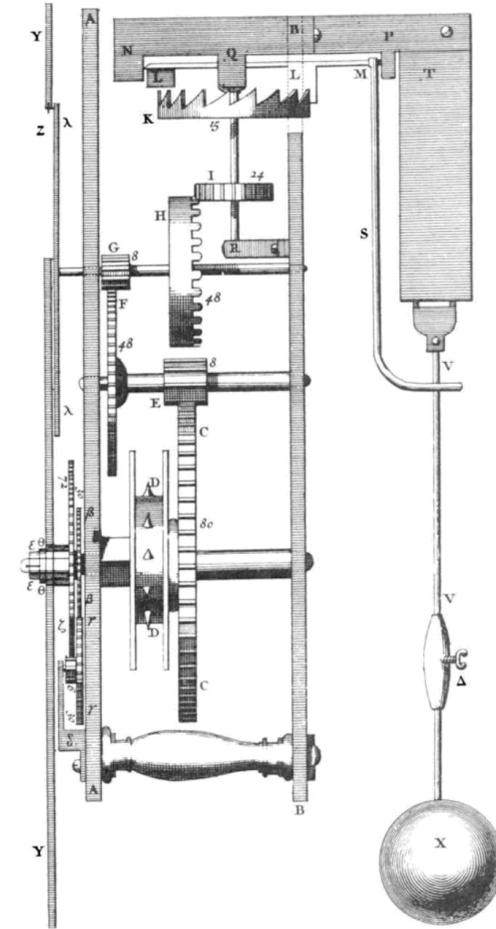


Figura 6: Diagrama de C. Huygens correspondiente al segundo reloj de péndulo que fabricó en 1673. El mecanismo de escape con la rueda de corona y las paletas están marcadas con las letras K y L en la parte superior del dibujo. Fuente: Wikimedia.

Los relojes de péndulo se emplearon hasta 1927. A lo largo de los siglos fueron mejorando constantemente. Se trabajó fundamentalmente en reducir la fricción, en minimizar las variaciones de longitud producidas por cambios de temperatura y en aportar energía de modo óptimo para mantener su oscilación. El péndulo más preciso que se fabricó fue el péndulo de Shortt que mantenía el tiempo en 2 ms por día. Se trataba de una combinación de dos péndulos: uno esclavo que suministraba energía y otro libre que oscilaba en el vacío y que actuaba de maestro.

El problema de la longitud

Desde el siglo XVI y sobre todo en el siglo XVII, Europa comenzó una expansión más allá del continente que dio lugar a un comercio marítimo muy importante. La navegación se convirtió en uno de los principales asuntos de estado. La dificultad de determinar la posición de los barcos en el mar era un problema muy grave que en ocasiones originaba el naufragio de navíos y grandes retrasos tras sufrir tormentas que modificaban la ruta de navegación de modo imprevisible. Todo ello generaba un considerable quebranto para los propietarios de los navíos, para la actividad comercial y para las naciones cuyos navíos de guerra sufrían los mismos problemas.

La posición sobre la superficie de la Tierra se determina estableciendo la latitud y la longitud del lugar. La latitud se obtiene, durante el día, a partir de la altura del sol sobre el horizonte a mediodía y por la noche, midiendo la altura de la estrella polar sobre el horizonte (en el hemisferio norte). La longitud se obtiene calculando la diferencia horaria entre la hora local y la de un lugar de referencia, por ejemplo la del Observatorio de Greenwich en Inglaterra. La hora local se puede determinar observando el sol y su paso por el meridiano. Sin embargo para conocer la hora de Greenwich es necesario disponer de un reloj que no se retrase ni adelante en exceso y que se pone en hora cuando el barco abandona el puerto. El péndulo no funcionaba bien en los barcos debido al balanceo de estos.

Hasta tal punto la determinación de la latitud era crucial que la corona inglesa estableció en 1713 un premio de 20 000 libras para quien construyese un reloj fiable que funcionara en el mar. John Harrison, un relojero inglés, empleó 40 años en la fabricación de cinco relojes, llamados cronómetros marinos. Tras una historia muy azarosa, descrita magníficamente por Dava Sobel en su novela «Longitud», pudo cobrar el premio completo. El H4, penúltimo reloj de la serie que fabricó, mantuvo el tiempo con un error de 54 segundos en una travesía de 5 meses de duración. El reloj era extraordinariamente complejo y empleaba un muelle como fuente de energía y un mecanismo de escape. Estaba preparado para minimizar la dilatación y contracción de sus piezas por los cambios de temperatura. Harrison empleó rubíes y diamantes para minimizar el rozamiento. El H4 se conserva actualmente en el Museo Marítimo Nacional de Greenwich.

Los cronómetros marinos de Harrison son los precursores de los actuales relojes de pulsera de cuerda.

La calidad de un reloj

Un reloj es un dispositivo que produce un fenómeno periódico, contabiliza el número de ciclos transcurridos y los muestra en un visor. El dispositivo que produce un fenómeno periódico se llama resonador. Un resonador perfecto funcionaría eternamente, sin embargo, en la práctica la fricción hace que se detenga al cabo de un tiempo. Un resonador al que se aplica energía para que mantenga su oscilación se llama oscilador. Algunos resonadores son mejores que otros. El modo de medirlo es calcular el número de oscilaciones que realiza hasta que su energía disminuye una cierta cantidad respecto de la energía inicial que se le suministró. Este número se llama factor de calidad o «Q». Un resonador de Q alta tiende sólo a oscilar si lo hace en torno a su frecuencia natural.

La calidad de un reloj se mide fundamentalmente con dos parámetros: la precisión o estabilidad y la exactitud. Se denomina precisión a la capacidad de un oscilador para producir ciclos de duración similar. Se llama exactitud a la capacidad de un oscilador para producir ciclos de la duración deseada. Para comprender la diferencia podemos pensar en un reloj preciso, es decir cuyos ciclos son todos de duración similar, pero inexacto porque duran, por ejemplo, menos de lo esperado y por tanto se adelanta. Un reloj exacto pero impreciso sería aquel cuyos ciclos en promedio son de la duración correcta pero unas veces son más largos que otras y por tanto no tiene un comportamiento estable.

El factor de calidad de un reloj está muy ligado a la precisión y exactitud de un reloj. Un reloj que sólo oscila en su frecuencia natural y que por tanto mantiene su oscilación durante mucho tiempo es exacto y estable. Por tanto una Q alta implica mayor exactitud y precisión.

El valor de la Q oscila desde 1 000 para los relojes de pulsera económicos hasta 10^{10} para los fuentes de Cesio.

Relojes de cuarzo

En 1880 Jaques y Pierre Curie descubrieron la pizeoelectricidad. Los materiales piezoeléctricos se deforman al aplicar sobre ellos una diferencia de potencial eléctrico. Del mismo modo, un material piezoeléctrico con electrodos en dos caras opuestas, al sufrir una deformación vertical a la superficie de sus caras, genera una corriente eléctrica. Esta propiedad que más tarde, se emplearía en el desarrollo del sónar, es la base de la fabricación de los relojes de cuarzo. Entre los años 1918 y 1927, Nicholson, Cady, Harrison y Die, estadounidenses los tres primeros y británico el

último, jugaron un papel fundamental en el desarrollo de los relojes de cristal de cuarzo.

El reloj de cuarzo está formado por un cristal cortado de un modo especial que vibra al serle aplicado un voltaje de corriente alterna. La fricción interna del cuarzo es muy pequeña y la Q vale desde 10^5 hasta $2 \cdot 10^6$. La frecuencia de oscilación del cuarzo depende del modo en que está cortado, de su tamaño y de la frecuencia resonante con la que se excite. Las oscilaciones del cristal pueden ser desde varios miles de ciclos hasta varios millones de ciclos por segundo. El resonador de cuarzo se conecta a un sistema de realimentación de modo que la frecuencia de oscilación se mantiene muy cercana a la frecuencia natural de resonancia. Los mejores cristales de cuarzo mantienen el tiempo con un error máximo de 0,1 ms por día. Algunos de ellos funcionan en pequeños hornos (de tamaño ligeramente superior al del cristal) para mantener su temperatura estable e impedir la contaminación por el entorno exterior.

Los relojes de cuarzo se comenzaron a utilizar en La Bell Telephone en 1932 y ese mismo año la Oficina de Patrones de EEUU (NIST) comenzó a utilizar un reloj de cuarzo como patrón para mantener la hora. La precisión de estos relojes permitió medir por primera vez variaciones estacionales en la rotación terrestre.

Estados Unidos, Suiza y Japón trabajaron en la utilización práctica de los cristales de cuarzo y contribuyeron a la aparición de los primeros prototipos de relojes de pulsera en la década de 1960, momento en el que comienza su popularización en la sociedad. Suiza llegó a emplear hasta 90 000 personas en la década de 1970 en la fabricación de los relojes de cuarzo. En la actualidad los relojes de cuarzo son omnipresentes, ya que no sólo están en las muñecas de muchas personas; también se utilizan en una gran cantidad de aparatos electrónicos como ordenadores, cámaras fotográficas y teléfonos móviles.

Relojes de atómicos

Los relojes atómicos son la última etapa en el desarrollo de la medida del tiempo. Se han otorgado 13 premios Nobel entre los años 1943 y 1997 por trabajos relacionados con los relojes atómicos, lo que nos da una idea de la magnitud del estudio y trabajo de científicos e ingenieros en este área de la Física.

Un reloj atómico está basado en la frecuencia natural de las partículas atómicas. Los átomos están compuestos de un núcleo y una nube de electrones a su alrededor que ocupan diferentes orbitales. El estado de energía de un átomo depende del estado de los protones, neutrones y electrones que lo componen. Por ejemplo, en un estado excitado un electrón puede estar en un orbital de mayor energía, habitualmente más lejano

del núcleo. Como dicho estado no es estable, el electrón pasa a otro orbital de menor energía, emitiendo, en dicho paso, un fotón de frecuencia equivalente a la diferencia de energía entre ambos estados. La emisión de ese fotón se podría considerar una «oscilación» natural del átomo. Un de los ejemplos más sencillos y comunes es la transición hiperfina del átomo de hidrógeno que sirve para ilustrar el funcionamiento de casi todos los relojes atómicos actuales.

El átomo de hidrógeno está compuesto por un protón y un electrón que orbita en torno a él. El protón y el electrón tienen una propiedad física denominada espín, asociada con su momento angular intrínseco, que puede tomar dos valores: $1/2$ o $-1/2$ en el caso del electrón y 1 , 0 o -1 en el caso del protón. El espín se descubrió porque al hacer pasar partículas atómicas por un campo magnético se advertía que las partículas se desviaban en varios haces. Cuando las partículas eran electrones estos se dividían en dos haces, dependiendo del valor del espín. Cuando en un átomo de hidrógeno bajo un campo magnético externo, el espín del protón y del electrón son paralelos (ambos tiene el mismo signo) el átomo está en un estado de energía ligeramente superior a cuando son opuestos. El átomo de hidrógeno tiende a pasar espontáneamente del estado de mayor energía al de menor, es decir el electrón cambia su espín, y en esa transición emite un fotón de longitud radio de aproximadamente 1420 MHz de frecuencia. Los relojes atómicos hacen uso de esta propiedad y utilizan la radiación emitida para para controlar la señal de un reloj de cuarzo.

El reloj atómico más paradigmático es el de Cesio. También se basa en una transición hiperfina causada por un cambio de espín en el electrón más exterior. El mecanismo utilizado para generar una señal útil es como sigue. Se hace pasar un flujo de átomos de Cesio a través de un imán que divide los átomos en dos grupos. Aquellos en los que el electrón de la capa exterior tiene un espín paralelo al núcleo y aquellos cuyo espín es opuesto. Uno de los haces se inyecta dentro de un tubo, que en realidad es una cavidad resonante, sobre la que se aplica una radiación electromagnética de frecuencia similar a la del fotón que se emite con el paso de un espín del electrón al otro. La mayor parte de los átomos que atraviesan la cavidad, al recibir la radiación, cambian de estado. A este proceso se le llama absorción estimulada. A su salida del tubo otro imán los vuelve a separar en dos haces. Aquellos cuyo estado final era el que se deseaba conseguir se dirigen a un detector y los demás se descartan. El detector controla un cristal de cuarzo que a su vez controla la radiación electromagnética en el tubo de tal modo que cuando la señal en el detector es máxima, la señal del cristal de cuarzo no cambia y si desciende se modifica hasta conseguir aumentar el número de detecciones. Se trata pues de un mecanismo de realimentación para conseguir la señal que maximiza el cambio de estado en el Cesio y que se corresponde con una frecuencia determinada de gran pureza.

El primer reloj atómico que se construyó fue en realidad un reloj mo-

lecular de amoniaco en 1949 en Estados Unidos. Este reloj, que utilizaba una transición molecular, presentó una Q menor de lo esperado y su desarrollo se abandonó. Los esfuerzos se dirigieron a la fabricación de un reloj atómico de Cesio. El primer prototipo fue ideado por Polykarp Kusch (premio Nobel en 1955) y contruido por Harold Lyons en 1952 en Washington DC. Sin embargo presentó algunos problemas de funcionamiento y no sería hasta tres años después, en 1955, cuando Louis Essen y Jack Parry, a partir de un método nuevo de Norman Ramsey (también premio Nobel en 1989), finalizaron el primer reloj atómico operativo en Gran Bretaña. Durante un año fue el único reloj atómico funcional en todo el mundo.

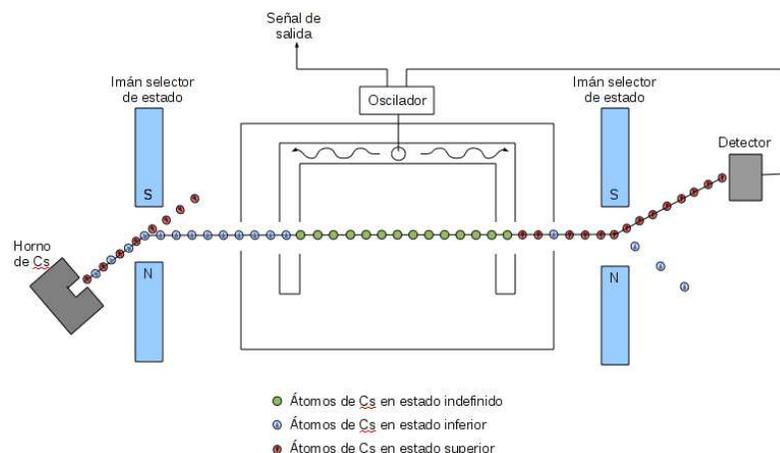


Figura 7: Esquema de un reloj de Cesio. Un horno produce átomos de Cesio en los dos estados descritos en el texto. Un imán selecciona los átomos dejando pasar hacia la cavidad resonante sólo aquellos que están en el estado inferior. La radiación estimula el paso del estado inferior al superior. Este proceso es tanto más eficiente cuanto más próxima es la frecuencia de la radiación a la de la transición hiperfina. A la salida se vuelven a separar los átomos entre aquellos que están en el estado inferior, y que no han cambiado a su paso por la cavidad, y los que estén en el estado superior. Estos últimos llegan a un detector que controla la frecuencia del oscilador que genera la radiación electromagnética en la cavidad. El sistema es realimentado de modo que la frecuencia del oscilador se modifica para maximizar el recuento del número de átomos en el estado superior. La frecuencia del oscilador es la que se emplea para generar una señal exterior.

En la actualidad los relojes atómicos comerciales tienen una calidad superior a la del Cesio de Essen y Parry. Más tarde se han fabricado

relojes de Cesio bombeados ópticamente, o fuentes de Cesio que emplean mecanismos para reducir el ensanchamiento de la línea. El error que cometen es de aproximadamente 1 nanosegundo (10^{-9} segundos) por día. La incertidumbre en frecuencia más pequeña conseguida hasta la fecha es de 10^{-17} con fuentes de Cesio. Otros relojes atómicos en uso son los de Rubidio y los máseres de hidrógeno. Estos últimos se emplean habitualmente en observatorios astronómicos, como el Centro Astronómico de Yebes en España, que realizan observaciones de VLBI.

Los últimos desarrollos científicos y técnicos están dirigidos a conseguir relojes compuestos por un sólo átomo o ión de modo que la línea producida por la transición atómica sea extraordinariamente estrecha y produzca una línea muy pura, es decir muy precisa y exacta. También se están realizando trabajos para conseguir relojes atómicos de bolsillo.

Cuadro resumen con las fechas y la mejor precisión y factor de calidad de algunos relojes a lo largo de la historia

| Reloj | Fecha | Precisión | Q |
|------------------------|-------------|------------|-----------|
| Paleta y Balancín | 1200 – 1650 | 1000 s/día | |
| Péndulo | 1650 – 1927 | 2 ms/día | 10^5 |
| Cronómetro | 1761 – | 0,2 s/día | 10^3 |
| Cuarzo | 1927 – | 0,1 ms/día | 10^6 |
| Reloj atómico de Cesio | 1955 – | 10 ns/día | 10^8 |
| Máser de hidrógeno | 1960 – | 400 ps/día | 10^9 |
| Fuente de Cesio | 1999 – | 100 ps/día | 10^{10} |

El cuadro anterior contiene un breve resumen sobre las fechas aproximadas de uso de diferentes tipos de relojes y su mejor grado de precisión o estabilidad y factor de calidad. Los péndulos en el aire tiene un factor de calidad, Q , de 10 000, mientras que en el vacío es de aproximadamente 100 000. En el cuadro figura el mejor valor (el más alto).

¿Cuánto dura un segundo?

En los siglos XVIII y XIX se habían ido acumulando evidencias, basadas sobre todo en la posición de la Luna, de que la rotación de la Tierra no es uniforme. El uso de los relojes de cuarzo en la década de 1920 permitió confirmar esa hipótesis ya que se observaron variaciones estacionales. Con el advenimiento de los relojes atómicos fue posible medir con mucho más detalle las irregularidades de la rotación de la Tierra.

En este momento se sabe que existen tres tipos de irregularidades:

- La velocidad de rotación de la Tierra se hace cada vez menor debido a los efectos de marea producidos fundamentalmente por la Luna.

Se cree que un día terrestre duraba 21 horas hace 600 millones de años. Como consecuencia la Luna se aleja de la Tierra.

- Los polos (asociados a la rotación terrestre) realizan un movimiento aproximadamente circular de varios metros de amplitud en un año respecto del polo asociado a la figura geométrica de la Tierra. Su movimiento se representa como un trazo sobre la superficie de la Tierra en el polo. Estos movimientos están probablemente causados por efectos estacionales y reorganización de las capas internas de la Tierra.
- Las fluctuaciones regulares están asociadas con las variaciones estacionales sobre la superficie de la Tierra. Estas variaciones tienen que ver con la conservación del momento angular y los cambios producidos por la evaporación del agua en los mares y su acumulación en hielos y nieve en las montañas y en su proceso inverso.

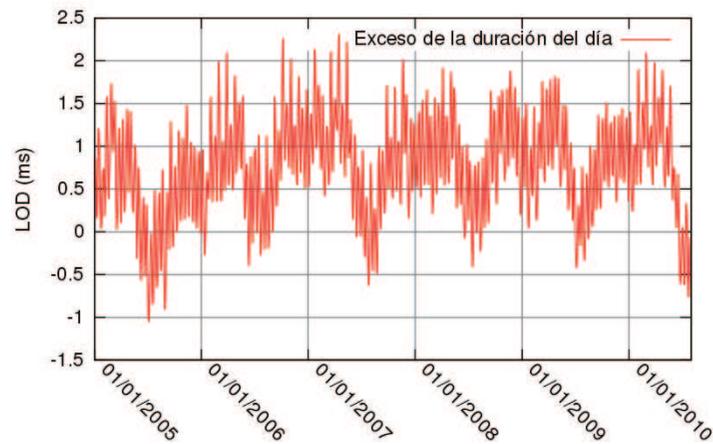


Figura 8: Variaciones en la longitud del día en los últimos 5 años. Las variaciones rápidas son debidas a efectos de marea. Las oscilaciones anuales que se observan corresponden a variaciones estacionales. Imagen generada a partir de los datos del IERS.

Todos estos efectos ocasionan que la escala de tiempo basada en la rotación terrestre, y a la que se llama Tiempo Universal o UT («Universal Time» en inglés), no sea adecuada por su falta de uniformidad y han originado los cambios de definición del segundo como unidad de tiempo. La escala UT es importante a efectos prácticos, porque la humanidad y todas sus actividades están ligada a la Tierra y su rotación.

Existen tres tipos de escalas de UT: UT0, que es la escala asociada a la rotación terrestre con todas sus irregularidades. UT1 que es la escala anterior corregida por el movimiento del polo. Esta escala es la que se emplea para realizar observaciones astronómicas y para el cálculo de las efemérides tanto de satélites artificiales como astros naturales. Finalmente la escala UT2 es un intento de hacer la escala más uniforme y de eliminar las fluctuaciones estacionales de la escala UT1. Apenas se utiliza.

Antes de 1960 el segundo, o segundo solar, se definía como la 86 400 parte de un día solar medio. Esto implicaba que se estaba utilizando una escala variable (UT) que requería un ajuste de vez en cuando. Entre 1960 y 1967 la unidad de tiempo era el segundo de efemérides que se definió como la 31 556 925,9747 parte del año tropical de 1900, y la escala de tiempo se denominó Tiempo de Efemérides (ET). Al contrario que en el caso anterior esta escala es uniforme pero requería muchas observaciones a lo largo de los años para compararla con la rotación terrestre, y poder determinar cuánto se alejaba de la escala UT.

En 1960 un conjunto de observatorios y laboratorios decidió establecer la escala UTC (Tiempo Universal Coordinado en inglés) como escala de uso civil. El objetivo era la utilización de una escala uniforme similar a la del tiempo atómico pero que se mantuviera sincronizada aproximadamente con la rotación terrestre. Se decidió que los años tuvieran el mismo número de segundos, pero dada la deceleración de la rotación terrestre esto significaba que cada año los segundos tenían una duración diferente. El ajuste se hacía cada vez que los segundos UT diferían más de una décima de los segundos ET. La escala UTC utilizaba por tanto una unidad de medida variable que se ajustaba a posteriori a partir de las observaciones. Esta estrategia resultó ser muy engorrosa y fuente continua de problemas y se abolió en 1971.

A partir de 1967 la IAU estableció como unidad de tiempo el segundo de Tiempo Atómico Internacional (TAI) que se define como la duración de 9 192 631,770 oscilaciones de la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del Cesio 133 a 0 K de temperatura. La escala de tiempos TAI está totalmente desacoplada de la rotación terrestre y de cualquier fenómeno astronómico, aunque el segundo se eligió para que coincidiese con el segundo de la escala ET, tras un programa de observación de tres años de duración que finalizó en 1958. La primera escala de tiempo atómico comenzó en Junio de 1955.

Para resolver la falta de sincronismo entre el TAI y el UT, en 1971 se acordó que el Tiempo Universal Coordinado (UTC), como escala de uso civil, tuviese la misma unidad que el Tiempo Atómico Internacional y que se mantuviese en sincronismo con la rotación terrestre, intercalando o sustrayendo un segundo a final de año según fuera necesario. La regla actual dice que el UTC debe permanecer siempre a una distancia máxima de 0,9 segundos respecto de la escala UT1. En enero de 1972 la diferencia

entre el TAI y el UTC se estableció en 10 segundos y desde entonces ha ido creciendo hasta 34 segundos.

Uno de los problemas que el TAI heredó de la escala ET es que esta última se eligió de modo que un segundo sea igual a un segundo solar medio en 1900. La elección de esta fecha, aparentemente arbitraria, se debe a que fueron necesarias numerosas observaciones astronómicas hechas en los siglos XVIII y XIX para determinar su duración. Desde entonces hasta que se estableció la escala de Tiempo Atómico Internacional la deceleración de la rotación terrestre continuó y esto implica que la escala ET ya no reflejaba en la década de 1950, y aún menos en la actual, la duración del segundo UT2. Por tanto el segundo TAI, y el ET, son más cortos que el UT2 y esta es la principal razón por la que es necesario el uso del segundo intercalar.

La diseminación del tiempo

Actualmente la escala de tiempos TAI se realiza a partir de un grupo de 260 relojes atómicos situados en todo el mundo, calibrados por unos pocos patrones primarios de frecuencia. Los patrones primarios son el núcleo del sistema mundial de tiempos. Lo forman unos 10 relojes de Cesio, fuentes de Cesio, y Cesios bombeados ópticamente en Alemania, Estados Unidos, Francia y Japón. Los relojes comerciales sirven para generar el UTC local en cada país. La realización del TAI es función de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM) que emplea observaciones con satélites GPS para comparar los diferentes relojes.

El servicio Internacional de La Rotación Terrestre (IERS) realiza medidas de la rotación terrestre y produce el tiempo universal UT1. Este tiempo se pasa a la BIPM que decide si añade o sustrae un segundo intercalar al TAI. El UTC se distribuye en una circular en la que se indica a 69 instituciones diferentes, las correcciones que deben hacer a las escalas de tiempos UTC locales. Estas instituciones retransmiten el UTC local corregido a la sociedad mediante diversas técnicas. En España el encargado del mantenimiento y diseminación del UTC local es el Real Observatorio de la Armada en San Fernando.

Existen tres esquemas básicos para la diseminación del tiempo desde un reloj maestro y la sincronización de otros relojes con él. La diseminación en una sola dirección es el método más usado. Desde el reloj maestro se emite una señal con el tiempo y el receptor sincroniza su reloj cuando la señal llega hasta él. El principal problema es el retraso desconocido introducido por la transmisión de la señal. La diseminación del tiempo en dos direcciones pretende resolver este problema. El emisor envía una señal de prueba con la hora del reloj maestro y el receptor envía de vuelta el eco. Entonces el emisor modifica el momento de su emisión para compensar por el retraso introducido en la propagación de la señal. El tercer

esquema utiliza el método de visión común. Un tercer reloj, que no debe ser necesariamente exacto, envía señales que el emisor y el receptor reciben. Entonces el emisor envía la señal del reloj maestro junto con una marca temporal correspondiente al momento de la emisión, según el reloj común. El receptor recibe la señal y la marca también con la hora del reloj común, realiza la diferencia entre ambas marcas, que indica el retraso producido por la transferencia, y corrige su reloj. Es importante que el receptor y el emisor conozcan su distancia al reloj común para que la corrección sea buena. Puede haber variaciones sobre estos tres esquemas básicos.

El método de una sola dirección se emplea para difundir el tiempo a la sociedad a través de campanadas, señales acústicas de TV y radio y ondas de radio especialmente dedicadas para ello. En el capítulo de Tiempos de este anuario hay un cuadro resumen con las emisoras de señales horarias de emisión continua. Se dividen en dos, de onda corta (5 a 15 MHz) y onda larga (60 a 78 KHz).

La sincronización a través de Internet se realiza a través de NTP. NTP (Network Time Protocol) es el protocolo de sincronización de Tiempo de Red, y puede emplear tres sistemas de diseminación que se corresponden básicamente con los esquemas descritos anteriormente. En uno de ellos el emisor de señales, y el receptor, habitualmente ambos son dispositivos con microprocesadores, intercambian paquetes marcados temporalmente con sus respectivos relojes para medir el retraso de la señal a través de Internet o de una red local. El cliente en el receptor corrige la señal recibida y pone el reloj del ordenador cliente en hora. NTP utiliza un sistema de estratificación en el que se clasifican los servidores de acuerdo con la calidad de sus señales. Los servidores «stratum 0» son relojes atómicos, receptores GPS o radios. Los servidores estrato 1, obtienen su hora de los estrato 0, y transmiten su hora a los de estrato 2.

Otro de los métodos de recepción de la hora son los receptores GPS. El GPS es un sistema de navegación global por satélites. El segmento espacial está formado por una constelación de 24 satélites distribuidos en 6 órbitas en torno a la Tierra, equipados con relojes atómicos. El segmento de tierra sirve para la operación y gestión de los satélites y para sincronizar los relojes en órbita. Los receptores GPS comerciales reciben la señal de al menos 4 satélites diferentes, permitiéndoles determinar la posición del receptor, y el tiempo UTC. El receptor procesa las señales de los diferentes satélites y, utilizando un algoritmo, corrige el tiempo de transmisión de la señal. La hora se puede conocer con una precisión de 1 nanosegundo.

Otra constelación de satélites actualmente en uso es el sistema ruso GLONASS. En el futuro cercano, estará operativo el sistema europeo Galileo.

El tiempo relativista

La precisión alcanzada en la medida del tiempo, hace necesario tener en cuenta los efectos relativistas sobre los relojes. Este hecho es especialmente relevante en los sistemas de navegación global con satélites como el GPS, GLONASS y Galileo, donde los relojes están en órbita. Finalizaremos este artículo del anuario con un breve repaso sobre la influencia de la relatividad especial y general sobre la determinación del tiempo.

La relatividad especial fue formulada por Albert Einstein en 1905. De acuerdo con ella no existe un marco de referencia absoluto, las leyes de la física son iguales en dos sistemas que se mueven con una velocidad de traslación uniforme entre ellos y la velocidad de la luz se emite a la misma velocidad independientemente de la velocidad del emisor de la luz. Este último principio es extraordinariamente importante para la sincronización de dos relojes en movimiento entre sí. De acuerdo con la relatividad especial un reloj que sufre una aceleración respecto de un reloj en reposo, marcha más lentamente que el que está en reposo. Este principio, conocido popularmente por la paradoja de los gemelos, se ha observado en relojes que se han trasladado en avión desde su emplazamiento original a otro y luego han regresado a su lugar de origen.

En 1915 Albert Einstein publicó la teoría de la relatividad general. Según ella la gravedad es una propiedad geométrica del espacio tiempo y la luz se desplaza siguiendo sus curvas geodésicas. Esto significa que en la práctica la radiación electromagnética, la luz, es atraída por un campo gravitatorio. Este efecto se ha visto confirmado por observaciones astronómicas. Muy relacionado con la propiedad anterior está el del entrecimiento del tiempo en las proximidades de un cuerpo masivo. Este efecto también se ha confirmado midiendo la frecuencia de la señal de los relojes situados en valles y montañas. Un reloj situado primero en una montaña, donde la gravedad es menor, marcha más rápido que cuando se le sitúa después en un valle.

Las consecuencias de la relatividad especial y general sobre los relojes son especialmente importantes cuando están montados sobre satélites en órbita. Estos efectos se tienen en cuenta en su operación y sincronización con los relojes maestros en tierra. De hecho resulta curioso advertir que los relojes en órbita marchan más rápido que los terrestres por estar en un entorno de gravedad menor pero también marchan más lentos por encontrarse en rotación en torno a la Tierra. Se estima que un satélite GPS se atrasa 7 microsegundos por día por su movimiento relativo respecto de un observador en tierra, y se adelanta 45 microsegundos por día por la curvatura del espaciotiempo debida la masa de la Tierra. El efecto neto es un adelanto de 38 microsegundos por día que es necesario corregir. Otros efectos de orden menor también se tienen en cuenta.

Conclusión

El tiempo es probablemente la cantidad que los humanos han conseguido medir con mayor precisión, y como resultado, otras unidades básicas se pueden obtener a partir de él. Este es el caso del metro, que actualmente se define a partir del segundo, asumiendo que la velocidad de la luz es constante e igual para todos los observadores independientemente de su velocidad relativa. De hecho en astronomía las distancias se miden en tiempo. Por ejemplo, el Sol se encuentra a 8 minutos luz, y las estrellas más cercanas en Alfa Centauri están a 4,4 años luz de la Tierra. Existen intentos para definir la carga eléctrica a partir del tiempo empleando el efecto Josephson.

Todavía seguimos sin poder definir el tiempo pero la búsqueda de métodos de medida cada vez más precisos ha ensanchado nuestro conocimiento sobre él e impulsado el desarrollo científico y técnico de la humanidad.

Referencias

J. Jespersen, J. Fitz-Randolph, *From Sundials to Atomic Clocks*. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office 1999.

T. Jones, *Splitting the Second. The Story of Atomic Time*. IOP Publishing 2000.

Marrison, *The Evolution of the Quartz Crystal Clock*. The Bell System Technical Journal, Vol. XXVII, pp. 510-588, 1948.

A. Pannekoek, *A History of Astronomy*. Dover Publications 1989.

Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia.
<http://www.iers.org>.

Oficina Internacional de Pesos y Medidas.
<http://www.bipm.org>.