

EL SEGUNDO INTERCALAR: UNA CONSECUENCIA DE LA COMPLEJIDAD DEL TIEMPO

Francisco Javier GALINDO MENDOZA

Teodoro LÓPEZ MORATALLA



¿Qué es, pues, el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé; si quiero explicárselo al que me pregunta, no lo sé.

San Agustín, *Confesiones*. XI, 14

Uno de julio de 2015: un día excepcionalmente largo



N la página *web* del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), dentro del portal de la Armada, www.armada.mde.es, encontramos el siguiente aviso:

«Nuevo segundo intercalar»

El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) ha anunciado en su Boletín C, número 49, de 5 de enero de 2015, la introducción de un segundo intercalar positivo en la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC) a finales de junio de 2015.

La escala UTC será atrasada en un segundo, de tal manera que la secuencia de datado de las marcas de segundo de dicha escala será:

- 30 junio 2015: 23 h 59 m 59 segundos.
- 30 junio 2015: 23h 59 m 60 segundos.
- 01 julio 2015: 0 h 0 m 0 segundos.

La diferencia entre las escalas UTC y Tiempo Atómico Internacional (TAI) es:

- Desde el 1 julio 2012 0 h UTC hasta el 1 julio 2015 0 h UTC: TAI - UTC = +35 segundos.
- Desde el 1 de julio 2015 0 h UTC hasta nuevo aviso: TAI - UTC = +36 segundos.

La información de los valores actuales y las predicciones de la diferencia UT1 - UTC se encuentran en el Boletín A del IERS.

Lo que en román paladino quiere decir que a las doce de la noche del 30 de junio hay que atrasar los relojes un segundo; a esa hora, pero de tiempo UTC. Como en junio nuestra hora es UTC + 2 (UTC + 1 en Canarias), el cambio lo efectuaremos el 1 de julio, que será un día excepcionalmente largo con una duración de 86.401 segundos.

La responsabilidad nacional de introducir el segundo intercalar (1) recae en la Sección de Hora del ROA. De acuerdo con la legislación vigente (2), su laboratorio es responsable de mantener el *patrón nacional de la unidad básica de tiempo* —el segundo— y la escala de tiempo UTC (ROA) es oficialmente la *base de la hora legal española*. El laboratorio del ROA es un laboratorio asociado al Centro Español de Metrología (CEM) en el campo metrológico del tiempo y de la frecuencia. El patrón nacional de la unidad básica de tiempo y de la intensidad luminosa, responsabilidad del Instituto de Física Aplicada, son la únicas unidades básicas que no se mantienen directamente del CEM.

En este punto es muy probable que más de un lector (si los hay) ande un poco despistado con los términos y siglas empleados, y se pregunte que, si el tiempo es el que es, ¿por qué tenemos que atrasar los relojes un segundo?; o se cuestione la razón de que en España sea la Armada la responsable de todo esto. Intentaremos explicarlo procurando huir de tecnicismos, aunque manteniendo el rigor que el tema requiere.

Tiempo medio. UT

El tiempo es un concepto complejo y la forma de entenderlo y medirlo ha evolucionado a lo largo de la historia. Hasta hace unas pocas décadas, para medirlo se utilizaba el movimiento aparente de los astros, consecuencia de la

(1) En ocasiones se emplea incorrectamente la denominación «segundo bisiesto»; se trata de una mala traducción del término inglés *leap second* y no debe utilizarse.

(2) Real Decreto 1308/1992, de 23 de octubre, y Ley 32/2014, de 22 de diciembre, de Metrología.

rotación de la Tierra. Las dos referencias utilizadas habitualmente en cronometría son las estrellas y el Sol (3).

Solo consideraremos el Sol, cuyo movimiento aparente en el firmamento define el *tiempo solar verdadero* o *tiempo solar aparente*. La unidad de medida que surge de forma natural es el *día solar verdadero* o *aparente*, definido como el intervalo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano del lugar (4). Un día se divide en 24 horas, que a su vez se dividen en 60 minutos, cada uno de los cuales tiene 60 segundos. Esta división no se justifica astronómicamente, sino que se debe a razones históricas.

La hora de tiempo solar verdadero en un instante será el tiempo transcurrido desde el paso del Sol por el meridiano. Esta hora es la que proporciona un reloj de sol y tiene una relación directa con el horario del Sol, coordenada que los marinos utilizamos regularmente en navegación astronómica. La relación es una simple regla de tres, ya que en 24 horas de tiempo solar verdadero el horario del Sol se incrementa en 360° , de donde se obtiene la conocida equivalencia de que en una hora el horario aumenta 15° .

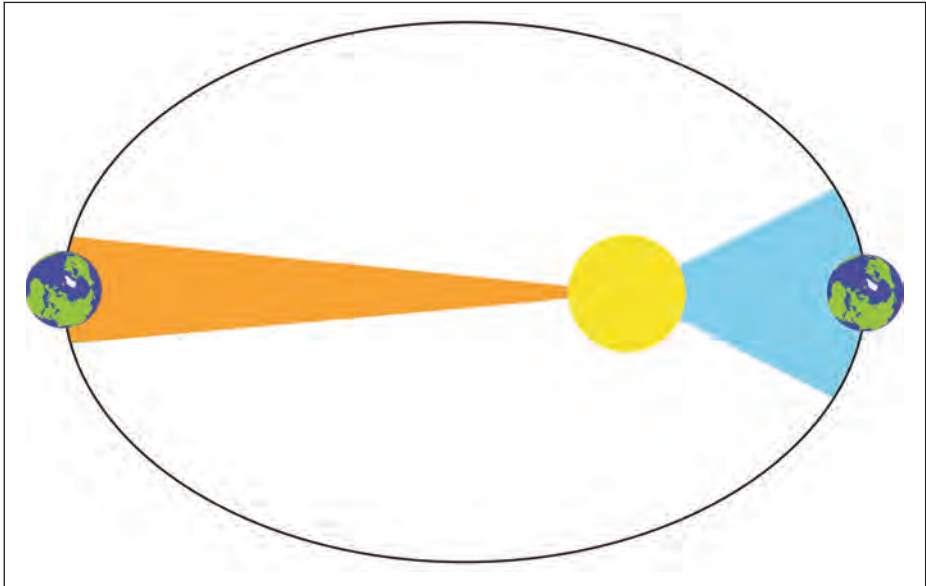
Lamentablemente, los días (y los segundos) solares verdaderos no duran lo mismo a lo largo del año. El movimiento aparente del Sol es el resultado de la combinación del movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol y del movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su eje. Suponiendo que este último es uniforme, que como se verá es mucho suponer, el movimiento resultante no lo es por dos motivos: la excentricidad de la órbita terrestre y la inclinación de dicha órbita respecto al ecuador.

De acuerdo con la primera Ley de Kepler, la órbita de la Tierra es una elipse con el Sol en uno de sus focos (5). Según lo establecido por la segunda Ley de Kepler, el radio vector que une el Sol con la Tierra barre áreas iguales en tiempos iguales, lo que supone que cuando la Tierra está más cerca del Sol (perihelio) su movimiento de traslación es más rápido que cuando está más lejos (afelio). Y esto se mantiene en el resto de la órbita, variando la velocidad orbital en función de la distancia. Este efecto se ilustra de forma esquemática en la figura siguiente, en la que las áreas azul y naranja representan el movimiento de la Tierra en un mismo intervalo de tiempo cerca del perihelio y del afelio, respectivamente.

(3) El movimiento aparente de la Luna también se utiliza como referencia para medir el tiempo, pero en el campo de la cronología. La Luna da origen a los meses del año y es la base de algunos calendarios, como el católico, en lo referente a la celebración de la Pascua o el islámico.

(4) Tradicionalmente, el día solar verdadero comienza con el paso del Sol por el meridiano superior del lugar, de manera que las cero horas de tiempo solar verdadero coincide con el mediodía local.

(5) Sería más preciso decir que es el sistema Tierra-Luna el que orbita alrededor del bari-centro del sistema solar, pero en este contexto es suficiente con hablar solo de la Tierra y el Sol.

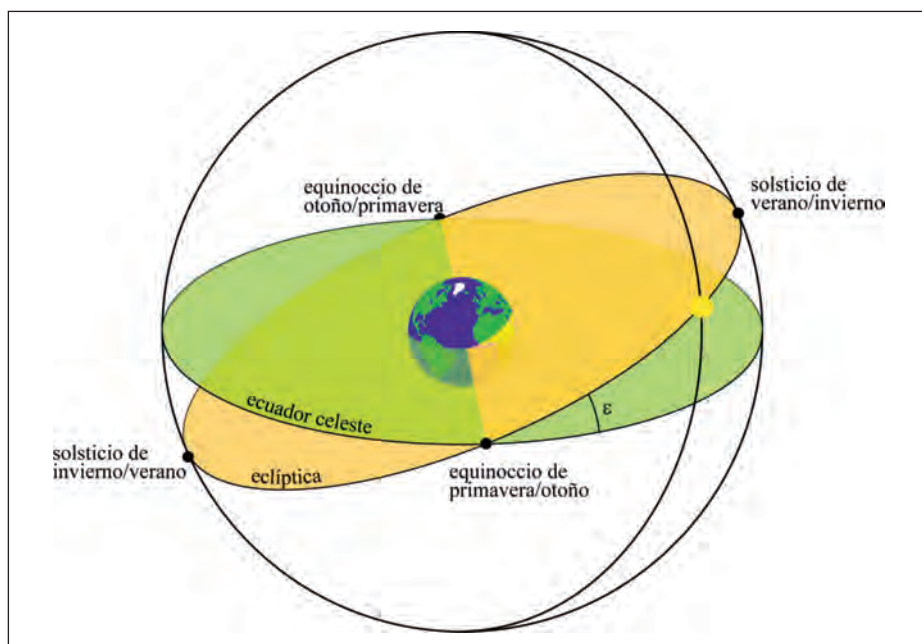


La excentricidad de la órbita terrestre es pequeña, por lo que la velocidad no varía mucho durante el año, aunque sí lo suficiente para que su efecto sea apreciable. Por ejemplo, como el perihelio se produce a primeros de enero y el afelio a primeros de julio, el otoño y el invierno duran unos 7,5 días menos que la primavera y el verano en el hemisferio boreal (norte).

Para evitar esta irregularidad, se «inventa» un *sol ficticio*, que recorre la eclíptica —intersección del plano de la órbita terrestre con la esfera celeste— con velocidad angular constante y que coincide con el Sol en el perihelio y en el afelio. Sin embargo, esto no es suficiente para evitar la falta de uniformidad de los días a lo largo del año. La eclíptica está inclinada unos $23,5^\circ$ respecto al ecuador (la oblicuidad ε , inclinación que es la causa de las estaciones del año, como se ilustra en la figura de la página siguiente).

Debido a la oblicuidad de la eclíptica, la proyección del sol ficticio sobre el ecuador no varía de forma constante, aunque su movimiento en la eclíptica sí sea uniforme; es decir, el horario del sol ficticio no varía de forma regular, por lo que la duración de los días (y de los segundos) sigue siendo variable.

Es necesario recurrir a un nuevo sol que denominamos *sol medio*, sol ideal que recorre el ecuador con movimiento horario constante y que coincide con el sol ficticio en los equinoccios. El sol medio es la referencia de la escala *tiempo solar medio*, o simplemente *tiempo medio*, que también se denomina *tiempo civil*. Durante muchos años fue la escala utilizada para medir el tiempo y para definir el segundo como «la ochenta y seis mil cuatrocientasava parte



Esfera celeste geocéntrica. La oblicuidad de la eclíptica es la causa de las estaciones.

del día solar medio». El día medio (o civil) comienza con el paso del sol medio por el meridiano inferior del lugar, de forma que las cero horas coinciden con la medianoche. Por tanto, la hora de tiempo medio es el horario del sol medio convertido en horas (dividido por 15), más 12 horas. Así definido, el tiempo medio o tiempo civil depende del meridiano desde el que se cuenta el horario del sol medio, el meridiano del lugar. Es por tanto un tiempo local, de forma que dos lugares con longitudes diferentes tendrán, en el mismo instante, tiempos medios distintos.

El que cada ciudad utilizase una hora distinta se convirtió en un problema serio en la primera mitad del siglo XIX con la aparición de nuevas tecnologías, en particular el ferrocarril y el telégrafo. Para remediarlo, en 1884 se celebró en Washington la «Conferencia internacional para la adopción de un meridiano origen de longitudes y una hora cosmopolita», conocida como la Conferencia Internacional del Meridiano (6). Entre otras resoluciones, en ella se acordó

(6) En esta conferencia participaron 26 naciones. España votó a favor del meridiano de Greenwich, invocando el compromiso previo adquirido por el Reino Unido de adoptar el sistema métrico decimal.



Delegados de los países participantes en la Conferencia Internacional del Meridiano. Destacado con un círculo rojo, el ministro plenipotenciario español, el escritor y diplomático Juan Valera. La legación española la completaban el capitán de fragata Emilio Ruiz del Árbol, agregado naval, y el teniente de navío Juan Pastorín, no identificados. (Fotografía: Biblioteca Digitale dell' Archiginnasio).

adoptar el meridiano de Greenwich como meridiano cero (7), y el tiempo medio en dicho meridiano como la hora de referencia mundial (8).

Al tiempo medio de Greenwich se le denominó Tiempo Universal, UT (9), iniciales de *Universal Time*. Aunque con frecuencia se utiliza GMT (*Greenwich Mean Time*) para referirse al UT, esta denominación está desaconsejada por la Unión Astronómica Internacional desde la Asamblea General de 1948.

(7) En España, el meridiano de Greenwich sustituyó al de San Fernando como origen de longitudes en la cartografía náutica, por Real Decreto de 3 de abril de 1907, publicado en la *Gazeta de Madrid* de 6 de abril. El Almanaque Náutico para 1910 fue el primero referido al nuevo meridiano.

(8) El tiempo medio del meridiano de Greenwich se adoptó en España para usos civiles a partir del 1 de enero de 1901, por Real Decreto de 26 de julio de 1900, publicado en la *Gazeta de Madrid* de 28 de julio. Esta disposición también establece que las cero horas corresponden al instante de la media noche, en lugar del mediodía como hasta entonces.

(9) Al hablar de UT, en realidad nos referimos a UT1, que es la escala resultante de corregir UT0 — tiempo medio obtenido directamente de la observación— por el desplazamiento del polo sobre la superficie terrestre. La escala UT2, regularización de UT1 por correcciones periódicas, está en desuso.

Tiempo atómico. TAI y UTC

A pesar de todos los esfuerzos, el UT no es una escala de tiempo uniforme ya que, aunque está libre de las irregularidades debidas al movimiento de traslación de la Tierra, sigue ligada a su rotación, que no es uniforme. La Tierra no gira a una velocidad constante alrededor de su eje, ni este eje es siempre el mismo. Las causas son varias y no es posible saber de antemano cuál es la velocidad real de rotación, sino que se conoce *a posteriori* tras las correspondientes observaciones. Actualmente la Tierra tiene tendencia a frenarse, debido fundamentalmente a las mareas.

Por tanto, el segundo definido como un día solar medio/86.400 no representa siempre el mismo período de tiempo y no sirve como unidad de medida. La única forma de evitar esta falta de uniformidad es prescindir de la Tierra como reloj y buscar una forma de medir el tiempo que no esté sometida a variaciones.

La solución la dieron los relojes atómicos, que permiten reproducir en laboratorio un intervalo de tiempo constante. En base a ellos, en 1967 se definió el segundo del Sistema Internacional como la «duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio-133». El número anterior no es caprichoso, sino que se escogió de forma que hubiese continuidad con las anteriores definiciones del segundo (10).

Se define entonces una nueva escala, el Tiempo Atómico Internacional, TAI (11), cuya unidad fundamental es el segundo definido anteriormente. El TAI sí es una escala de tiempo uniforme, que se realiza con los datos de relojes atómicos de laboratorios de tiempo de todo el mundo. Dicho de otra forma, un segundo TAI siempre dura lo mismo, mientras que un segundo UT unas veces es más largo que otras.

Pero nuestra vida diaria sigue regulada por el Sol y, para poder situarse por medios astronómicos, el navegante necesita saber cómo está orientada la Tierra en cada momento (cuánto le falta al Sol para pasar por el meridiano de Greenwich), y esta orientación la da el UT. Para no prescindir del UT se creó el Tiempo Universal Coordinado, UTC (12), al que se obliga a no diferir del

(10) La falta de uniformidad del UT era conocida antes de la invención del reloj atómico en 1955. Para remediarla se recurrió a partir de 1952 al Tiempo de Efemérides, escala ideal desligada de la rotación terrestre, cuya unidad de tiempo, el segundo, se definió en 1956 estableciendo que el año trópico de 1900 duró 31.556.925,9747 segundos, que era lo que esa época duraba el segundo de tiempo medio.

(11) Las siglas TAI vienen de las iniciales del nombre francés: *Temps Atomique International*.

(12) Aquí las siglas usadas internacionalmente no corresponden ni al nombre inglés de la escala, *Coordinated Universal Time*, ni al francés, *Temps Universel Coordinné*, sino que se prefirió añadir la C a UT para mantener claramente la relación con el Tiempo Universal.



Patrón atómico de haz de cesio. El ROA cuenta en la actualidad con cinco de estos patrones y un máser de hidrógeno activo.

UT en más de 0,9 segundos de la forma que se describe más adelante. La escala UTC tiene la misma unidad que el TAI (el segundo del SI), por lo que un reloj de UTC ni atrasa ni adelanta con respecto a uno de TAI.

UTC es el tiempo de referencia mundial, de forma que la hora de nuestros relojes es UTC más o menos un número entero de horas, salvo algunos países que no siguen esta norma. En España llevamos

UTC + 1 (UTC en Canarias) en horario de invierno y UTC + 2 (UTC + 1 en Canarias) en horario de verano.

Para mantener la diferencia entre UT y UTC inferior a 0,9 segundos, cuando es necesario se introduce un segundo intercalar en el UTC (adelantando o atrasando la escala), como sucederá el próximo 30 de junio. Por tanto, podría decirse que la finalidad de los segundos intercalares es poner en hora nuestros relojes con el Sol. Lo único que se hace es cambiar el origen a partir del cual contamos el UTC; la escala sigue siendo tan uniforme como el TAI, aunque difieren en un número entero de segundos. Los segundos intercalares se iniciaron en 1972 y se introducen preferentemente los días 30 de junio o 31 de diciembre. Como segunda opción, se utilizan el 31 de marzo o el 30 de septiembre. Y si fuese necesario se recurriría al último día de los meses restantes.

UT, UTC y el navegante

Hoy en día, el que más se beneficia de la escala UTC es el navegante, que necesita saber el UT, argumento de entrada en el Almanaque Náutico, para poder situarse en la mar por medio de los astros.

Con el actual sistema de segundos intercalares, el error que se comete al entrar en el Almanaque con el UTC, en lugar de con el UT, es muy pequeño. Un error de un segundo en el tiempo de las observaciones se traduce en un error de quince segundos en la longitud calculada, un cuarto de minuto de arco. Como no se permite que el UTC se separe más de 0,9 segundos del UT, el error cometido en la longitud será 0,2 minutos en el peor de los casos, diferencia totalmente asumible, máxime si tenemos en cuenta que la hora de la observación la mediremos al segundo. Antes del segundo intercalar del 30 de junio, la diferencia UT - UTC llegará a ser -0,659 segundos, pasando a +0,341

segundos una vez introducido (13). De lo anterior se desprende que, a efectos de navegación astronómica, se puede tomar UTC como UT mientras se mantenga el sistema actual de segundos intercalares.

¿Hasta cuándo los segundos intercalares?

La introducción de segundos intercalares en la escala UTC se viene cuestionando desde principios de siglo y recientemente han aparecido en los medios de comunicación noticias alarmistas sobre las consecuencias negativas que el próximo segundo intercalar puede tener, como el colapso de los sistemas operativos Unix, retrasos en los vuelos por fallos de sistemas informáticos o problemas con algunos navegadores.

En realidad son muchos los partidarios de dejar que el UT se separe libremente del UTC y suprimir los segundos intercalares, debido a los problemas que plantea su introducción, el coste en recursos, sobre todo humanos, y la posibilidad de cometer errores.

Probablemente, la única objeción sería a la supresión es conceptual, ya que con ella se perdería la relación entre el tiempo civil y la rotación de la Tierra, en la cual tiene su origen. Pero los efectos negativos reales sobre nuestra vida serían prácticamente nulos; se estima que en los primeros cincuenta años desde la eliminación se acumulará una diferencia de un minuto, que es irrelevante desde el punto de vista práctico. Los únicos realmente afectados serían los marinos que todavía usen la navegación astronómica, aunque pueden articularse soluciones para que su efecto sea el menor posible.

El principal defensor de los segundos intercalares es el Reino Unido. Alegando diversos argumentos, la razón de fondo puede ser que su referencia horaria legal es GMT (no UT), en lugar del UTC utilizado por la mayoría de las naciones. Mientras la diferencia entre UT y UTC se mantenga inferior al segundo, no hay mayor problema en mantener el primero como base de la hora oficial; pero en el momento en que esta diferencia aumente, se debe prescindir del GMT (y perder «Greenwich») para que la hora no difiera en un número creciente de segundos de la del resto del mundo, lo que sin duda acarrearía numerosos problemas.

El mantenimiento o la supresión de los segundos intercalares no depende de físicos o astrónomos, sino que es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (organismo de la ONU) la que tiene competencias en este tema. La decisión debió tomarse en la Asamblea de Radiocomunicaciones de 2012,

(13) Las diferencias UT - UTC pueden obtenerse de los *Bulletin A del International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)*, <http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/Bulletins/bulletins.html>

pero los países participantes decidieron posponerla para asegurar que se tuviesen en cuenta todas las opciones técnicas; la realidad fue que la mayoría de ellos no habían preparado el tema en profundidad y no tenían una opinión fundamentada.

Hay muchas probabilidades de que en la asamblea que se celebrará en Ginebra a finales de octubre de este año se decida la supresión definitiva del actual sistema de segundos intercalares.

A modo de conclusión

El tiempo y su medida son temas complejos. Nos hemos limitado a exponer los conceptos que hemos considerado necesarios para explicar y justificar por qué atrasaremos nuestros relojes el 1 de julio. Pero hay muchas cuestiones que forzosamente hemos excluido, como la ecuación de tiempo, el sistema de husos horarios, la sincronización horaria, otras escalas de tiempo utilizadas en astronomía y mecánica celeste o los beneficios directos que, sin saberlo, estamos obteniendo cada día al medir el tiempo con la enorme precisión que proporcionan los patrones atómicos.

En el último tercio del siglo xx, el Real Instituto y Observatorio de la Armada fue capaz de dar el salto y pasar del tiempo astronómico al atómico, para lo que contó con el incondicional apoyo de la Armada, tanto material como humano. Gracias a ello, en el siglo xxi la hora española la sigue haciendo la Armada.

Es muy posible que el próximo segundo intercalar sea el último, o uno de los últimos, que tengamos que introducir en la escala UTC.

