

Hora planetaria

Juan Tomé

Amonaria cosmológica / Libros / Los relojes no miden el tiempo: textos complementarios

www.cosmologica.amonaria.com



Este texto se concibió como complemento del libro “Los relojes no miden el tiempo”. Aunque puede leerse como separata, cobra sentido en relación con él.

La primera hora planetaria se estableció en 1884, por acuerdo de la Conferencia Internacional del Meridiano, celebrada en Washington, y era la hora basada en el día solar, que es el ciclo que repite el movimiento aparente diario del Sol, el ciclo que se inicia al pasar el Sol por el meridiano de un lugar y que acaba cuando vuelve a pasar. Como el día solar no dura siempre lo mismo, porque la órbita de la Tierra es ligeramente elíptica y la velocidad de la Tierra al recorrerla variable, esa primera hora planetaria se construía imaginando un sol ficticio que tardara siempre lo mismo en repetir el paso por el meridiano. El día solar correspondiente a ese sol ficticio se llama día solar medio y su duración es constante. El día solar medio servía para definir el segundo como su fracción $1/86400$ del día solar medio. Aquella hora planetaria se contaba de 0 a 24 horas cada día, con origen en el paso del sol por el meridiano de Greenwich. La hora así definida y contada se llamó Tiempo Medio de Greenwich (GMT). El 1928 la Unión Astronómica Universal (IAU) lo redefinió como Tiempo Universal (UT) a la vez que el origen de las 24 horas de cada día pasó del mediodía a la medianoche, es decir, del paso del sol medio ficticio por el meridiano al paso por el contrameridiano. Relojes astronómicos, mecánicos, realizaban esa hora planetaria, ajustada al movimiento aparente del sol medio alrededor de la Tierra.

El carácter aparente del movimiento del sol medio conlleva que el ciclo de paso del sol por el meridiano, que parece ser una vuelta, no corresponda exactamente a los 360° de un giro de la Tierra sobre sí misma, sino a algo más, porque la Tierra se traslada alrededor del Sol mientras rota. Por eso, la verdadera medida de la duración de la rotación terrestre no se hace respecto del Sol, sino de estrellas lejanas, respecto de las cuales cada ciclo corresponde con 360° de rotación terrestre. Tal duración es el día sidéreo. Como el día solar, debido al movimiento de nutación del eje terrestre, el día sidéreo varía, pero puede calcularse una media de esas variaciones. Con esa media, llamada día sidéreo medio, considerada constante, se estableció el Tiempo Sidéreo Medio de Greenwich (GMST) que luego devino en el tiempo universal sidéreo, conocido como UT1. UT1 se determinaba usando una red mundial de telescopios, instrumentos de paso y astrolabios. Actualmente se determina mediante Interferometría de muy larga base (VLBI) con referencias de objetos extragalácticos, cuásars fundamentalmente.

Las horas correspondientes al UT (tiempo astronómico solar) y al UT1 (tiempo astronómico sidéreo) se refieren, de una u otra manera, a la rotación terrestre. Se puede decir que son horas basadas en el “reloj Tierra”, es decir, relojes basados en la repetición incesante del giro de la Tierra sobre sí misma. El problema del “reloj Tierra” es que su

ritmo no es constante (ver el texto complementario “Las variaciones del ritmo de rotación terrestre), cosa difícil de pasar por alto cuando se busca mucha precisión en el uso del reloj.

Cuando se hizo patente que el ritmo de rotación de la Tierra varía, fue necesario abandonar el día solar medio como duración de referencia para la definición de segundo, y en 1960, por resolución de la 11ª Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM), el segundo se definió como fracción $1/31.556.925,9747$ del año trópico 1900¹. Esa fracción hacía que el segundo así definido fuera igual a la fracción $1/86400$ del día solar medio promediado entre 1750 y 1892, período de observaciones recogido en las Tablas del Sol de Newcomb, publicadas en 1895. Promediar el día solar medio en ese período era necesario porque la velocidad de rotación de la Tierra disminuye secularmente, debido sobre todo a las fuerzas de marea de la Luna: en 1750, el día solar medio duraba menos de 86400 segundos y en 1892 duraba más de 86400 segundos. Sólo hacia 1820, año centrado del período, el día duraba 86400 segundos justos.

Para los metrologos, definir el segundo en términos de un patrón pasado (el año trópico de 1900) y no reproducible es un serio inconveniente. Por eso, en cuanto se dispuso de relojes atómicos de ritmo más constante que la rotación de la Tierra, en 1967, por resolución de 13ª CGPM, se sustituyó la definición del segundo como fracción de un año trópico medio por otra basada en propiedades de los átomos en las que se basan los relojes atómicos: el segundo pasó a ser la duración de $9.162.631.770$ períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cs¹³³.² Con esa definición, el segundo atómico era exactamente igual que el segundo $1/31.556.925,9747$ del año trópico 1900 y que el segundo $1/86400$ del día solar medio en 1820.

La definición atómica de segundo supuso un cambio radical de patrón de referencia para el segundo: se abandonan los patrones astronómicos (el día, el año), los que de un modo u otro habían usado hasta entonces todas las sociedades humanas, y se introduce un patrón físico (una transición atómica) ajeno por completo a los ciclos astronómicos.

En 1971 por resolución de la 14ª CGPM se aprobó adoptar una hora planetaria atómica, la establecida por la Oficina Internacional de la Hora (BIH), basada en relojes atómicos que operaban en distintos laboratorios de acuerdo con la definición atómica del segundo. La hora así establecida es la que se llama Tiempo Atómico Internacional (TAI). Desde 1988, la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), basándose en una red de centenares de relojes atómicos repartidos por todo el mundo, es la que calcula la hora planetaria TAI como resultado de la cooperación internacional. Dado que los relojes atómicos de la red

¹ La definición exacta fue: “Un segundo es la fracción $1/31.556.925,9747$ del año trópico para 0 de Enero de 1900 a las 12 h del tiempo de efemérides”. (Resolución 9 de la 11ª CGPM (1960), web del BIPM).

² Esa es la definición exacta que figura en la Resolución 1 de la 13 CGPM (1967), web del BIPM.

TAI se basan en procesos atómicos independientes de cualquier proceso astronómico, la hora TAI corre sin relación alguna con los ciclos astronómicos de nuestro entorno.

La hora TAI es estable y uniforme, y está libre de todas las ligerísimas irregularidades de la rotación de la Tierra. Para físicos, ingenieros y metrologos es una hora perfecta, porque lo que necesitan es un sistema consistente de buenas medidas. Pero para astrónomos, geodestas o navegantes, conocer la hora astronómica (el ángulo rotado por el reloj Tierra en un momento dado) es una necesidad que cubre la hora UT1. Por esa razón la hora TAI y la hora UT1 (además de algunas que la perfeccionan para acomodarla a la Teoría de la Relatividad General) coexisten desde el nacimiento de la hora TAI.

La hora TAI la materializan los relojes atómicos de la red TAI. Su tictac es la transición hiperfina de los átomos de Cs¹³³. La hora UT1 la materializa el reloj Tierra. Su tictac es la rotación sidérea respecto de radiofuentes extragalácticas. Los relojes atómicos son excelentes: su ritmo se desvía del orden de 1 segundo en millones de años. El reloj Tierra no es tan perfecto, pero es muy bueno: solo se desvía de su ritmo 1 segundo en 45000 años. Parece, a primera vista, que si se ponen en hora un reloj atómico y el reloj Tierra, habría que esperar del orden de 45000 años para que las horas que marcaran (la hora TAI y la hora UT1) difirieran en solo 1 segundo. Si así fuera, el acuerdo entre la hora atómica TAI y la hora astronómica UT1 la hora sería prácticamente total, suficiente para todo propósito. Pero esa manera de pensar es incorrecta, porque cuando dos relojes, por perfectos que sean sus ritmos, cuentan segundos que difieran en algo, por pequeña que sea la diferencia entre los segundos contados, la diferencia se acumula segundo tras segundo. Así que, en un día, la diferencia entre lo que marcan los dos relojes será 86400 veces la diferencia entre los segundos que cuentan, y en un año será 86400×365 veces esa diferencia. Y eso aunque el ritmo de los dos relojes fuese perfecto, mantenido con absoluta constancia.

Pues bien, debido a los avatares seguidos en la definición del segundo, la hora atómica diverge con rapidez de la hora astronómica. No tanto porque varíe el ritmo de rotación de la Tierra (aunque también) como porque los segundos que cuenta el reloj Tierra y los que cuentan los relojes atómicos son distintos.

Veamos. El segundo atómico definido en 1960 no es un segundo “nuevo”, distinto al segundo astronómico, el anterior. La definición es nueva, pero el segundo no. Es decir, la duración de un segundo “atómico” es la misma que la del segundo referido al año trópico medio y la misma que la del segundo referido al día solar medio. O con más precisión: 9.162.631.770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cs¹³³ duran lo mismo que $1/31.556.925,9747$ del año trópico medio y lo mismo que $1/86400$ del día solar medio en 1820.

Lo que pasa es que cuando se definió el segundo atómico, en 1960, los días solares medios ya no duraban 86400 segundos atómicos —como en 1820— sino, muy aproximadamente,

86400,0020.³ Pero la hora UT1, según sus reglas de construcción, cuenta 86400 segundos cada día sidéreo. Eso significa que el reloj Tierra, en 1960, contaba segundos más largos que los atómicos. En concreto, en 1960, los segundos que se contaban para construir la UT1 duraban $86400,0020/86400=1,000000023$ segundos atómicos. Cuando el reloj Tierra contaba un segundo (o si se quiere en formato analógico: cuando su segundero avanzaba un segundo) los relojes atómicos ya llevaban contadas 23 milmillonésimas del segundo siguiente.

¡No pasa nada, es una diferencia extremadamente pequeña!, se está tentado de decir. Pero enseguida se cae en la cuenta de que esa diferencia se acumula implacablemente con cada segundo contado. Al día, está claro, la diferencia era de 0,0020 segundos, el resultado de acumular 0,000000023 segundos las 86400 veces que se cuentan segundos cada día.

Al cabo de un año serían:

$$(0,0020 \text{ s/día}) \times (365,25 \text{ días/año}) = 0,73 \text{ segundos/año}$$

una diferencia importante entre dos horas planetarias, la UT1 (astronómica) y la TAI (atómica, física), que funcionan con una precisión mucho, mucho mayor que esa diferencia. Y desde que se adoptó la hora TAI en 1971 hasta ahora, 2019, la diferencia acumulada sería (sin tener en cuenta las variaciones del día solar medio que habrán tenido lugar) de:

$$(0,73 \text{ s/año}) \times (48 \text{ años}) = 35 \text{ segundos}$$

Es importante reconocer que la causa principal de la divergencia no es que el reloj Tierra sea un reloj malo, un reloj que varía tanto su ritmo que atrasa 0,73 segundos cada año. No. La divergencia se produce principalmente porque se hace contar al reloj Tierra segundos más largos que los que cuentan los relojes atómicos. De hecho, si dos relojes atómicos de ritmo perfecto contaran segundos distintos, uno de ellos segundos SI y el otro segundos de 1,000000020 segundos SI, éste atrasaría 0,73 segundos SI al año respecto de aquel. Sus horas divergirían prácticamente lo mismo que divergen las horas TAI y UT1, y eso sin que hubiera variación alguna de sus exactos ritmos.

De otra manera, es importante comprender que decir “el reloj Tierra atrasa 0,73 segundos al año respecto de relojes atómicos” no significa “el ritmo del reloj Tierra, su rotación, varía 0,73 segundos cada año”. O que decir “la hora atómica, TAI, y la astronómica, UT1, se han desfasado 35 segundos desde 1971 hasta 2019” no significa “la duración del día ha aumentado 35 segundos desde 1971 hasta 2019”.

Podría pensarse que debería haberse definido el segundo atómico de forma que la duración del día solar medio en 1960 fuera exactamente 86400 segundos atómicos. Bastaría haber definido el segundo atómico como 9.162.632.035 períodos de la transición hiperfina del

³ “La longitud del día era exactamente 86400 segundos SI hacia 1820. Antes, el día solar medio era menos que 86400 s y después ha sido mayor que 86400 s. A una tasa de aproximadamente 1,4 ms [milisegundos] por siglo en los últimos 180 años, el día se ha alargado unos 2,5 ms desde entonces, de forma que hoy [2001] la longitud del día es de 86.400,0025 segundos SI.” (Nelson y otros, 2001, Metrología, 38, p 518)

Cs¹³³ en vez de los 9.162.631.770 que se eligieron. La solución hubiera sido buena para 1960, pero ahora, 50 años después, la divergencia entre TAI y UT1 ya sería notable, porque el ritmo de rotación terrestre habría disminuido, y aunque lo fuera ligerísimamente, los segundos contados por el reloj Tierra para UT1 serían ligerísimamente distintos de los segundos atómicos contados por los relojes TAI. Y ya se sabe que esas ligerísimas diferencias se acumulan segundo a segundo, día a día, año a año.

Por otra parte, si se hubieran elegido los 9.162.632.035 períodos del Cs¹³³ para la definición de segundo, entonces el segundo atómico no sería igual al segundo astronómico anterior. Pero nunca los cambios de definición de las unidades de medida han supuesto cambios en el “tamaño” de las unidades. Las definiciones nuevas cambian las referencias para la definición de las unidades pero no las unidades mismas. En el caso del segundo, cambiar su “tamaño” supondría dejar obsoletos todos los relojes del planeta de un plumazo, y con ellos, toda una intrincada red de aplicaciones tecnológicas, electrónicas y electromecánicas, que sostienen el funcionamiento de actividades agrícolas, industriales, de transporte, comerciales, legales y de relaciones sociales.

En resumen, la divergencia entre la hora atómica y la hora astronómica es inevitable, porque el patrón atómico es más estable que el patrón astronómico. La diferencia de estabilidad no es muy grande, y se traduce en diferencias pequeñas de los segundos atómicos y los segundos astronómicos reales en toda época distinta a los años próximos a 1820. Pero la acumulación de esas diferencias, segundo a segundo, en el continuo funcionar de los relojes atómicos y los relojes ajustados al reloj Tierra, provoca rápidas divergencias entre la hora atómica y la hora astronómica, divergencias que parece necesario corregir.

Desde 1960, los laboratorios que trabajaban coordinadamente para construir TAI, abordaron también la forma de corregir la divergencia entre la futura hora atómica y la hora astronómica, eligiendo el camino de crear una escala temporal nueva, que se basara en la hora atómica pero estuviera sujeta a las correcciones precisas para que su hora fuera, prácticamente, la astronómica. En 1967 se adoptó el nombre de Tiempo Universal Coordinado (UTC) para esa escala, y en 1973 se fijaron las reglas definitivas con las que se construye:⁴

- a. La hora UTC avanza exactamente al ritmo de la hora TAI. De hecho, son los relojes TAI los que la sostienen.
- b. El BIPM, el organismo que mantiene TAI, es también el que mantiene UTC. El BIPM corrige la hora UTC añadiéndole (atrasándola) o quitándole (adelantándola) un segundo cuando es necesario, de forma que nunca el paso del sol medio por el meridiano de Greenwich (promediando para un año) ocurra con más de 0,9 segundos SI de diferencia respecto a las doce horas UTC. Los segundos así añadidos o quitados se llaman “segundos intercalares” (leap seconds en inglés y segundos bisiestos por algunos).
- c. Como resultado de a) y b) TUC se diferencia de TAI en un número entero de segundos.

⁴ Nelson y otros, 517

El número de segundos de diferencia variará pero serán siempre segundos enteros.

- d. El Servicio Internacional de la Rotación Terrestre (IERS), que controla el ritmo de rotación de la Tierra respecto de radiofuentes de cielo profundo, asiste al BIPM con la información necesaria para decidir cuándo se añaden o se quitan los segundos intercalares.
- e. La hora UTC se recomienda como base del tiempo estándar para todos los países y como la hora civil de uso común, la distribuida mediante radioseñales y redes de información. Como la base de TUC es TAI, el intervalo entre señales de UTC es exactamente igual al segundo atómico SI.

El añadir o quitar segundos intercalares no es automático, como sucede con el “día intercalar” de los años bisiestos, porque las variaciones del ritmo de rotación terrestre son irregulares. La causa principal de variación es el freno que suponen las fuerzas de marea, sobre todo las de la Luna. Si fuera la única, el resultado sería un aumento predecible de la duración del día. Pero hay también causas estacionales (variaciones de la distribución de masas de hielo, de agua y de aire), arrítmicas (la fricción del manto sólido con el núcleo líquido) y puntuales (movimientos internos de masas en erupciones o terremotos), que, en conjunto, hacen impredecible la evolución de la duración del día.⁵ Por eso, la decisión de intercalar segundos en la hora UTC no sigue una pauta fija. Desde 1971, origen de la hora TAI, se han intercalado 28 segundos, todos positivos, es decir, todos han servido para atrasar la hora UTC respecto de la TAI. En 1972 se intercalaron dos, uno el 1 de enero y otro el 1 de julio; en 1984, 1986, 1987, 1989, 1995, 1998, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2018 y 2019 no se intercaló ninguno; y en el resto de años se intercaló un segundo, unas veces el 1 de enero y otras el 1 de julio. El conjunto evidencia la irregularidad en la variación del ritmo de rotación terrestre.⁶

Si se ponen juntos un dial UTC y uno TAI, se verá que sus ritmos son exactamente el mismo, el que marcan los relojes TAI; porque hay diales UTC, pero no hay relojes UTC. Los cambios de los dígitos que indican la hora en ambos diales se producen exactamente a la vez. Lo que se verá es que el dial UTC marca 37 segundos exactos más que el dial TAI: los 27 intercalados desde 1971, nacimiento de TAI, más los 9 de diferencia que había entre UTC y TAI en ese momento.

El dial UTC, no el TAI, es el que se publica universalmente, el que se difunde por señales horarias y por internet desde los centros nacionales de la hora que participan en la red TAI, el Observatorio de San Fernando en España por ejemplo. La hora UTC así difundida es la que marcan todos los dispositivos electrónicos, ordenadores, tablets, teléfonos y relojes conectados a centros que la emiten. UTC es la hora planetaria actual. Es la hora de la red de relojes atómicos TAI pero corregida con un número entero de segundos: 37 actualmente.

⁵ Torroja, “Nuevas definiciones en el problema de la medida del tiempo”, p 2-4

⁶ Fuente: leptab.pdf en www.bipm.org

Introducir segundos intercalares supone corregir las diferencias entre lo que marcan los relojes atómicos de referencia y lo que marcarían relojes que fueran ajustando su ritmo al ritmo variable de la rotación terrestre. O de otra manera, lo que hace el IERS al decidir cuánto y cuándo deben ser adelantados o atrasados los dials UTC es evitar que se desfasen con lo que marcaría el irregular “reloj Tierra”.

Resulta entonces que la hora planetaria marcha al ritmo de un conjunto de relojes atómicos cuyo funcionamiento es ajeno a los ciclos astronómicos del planeta. Sin embargo, la hora planetaria pública actual, la hora UTC, es una hora artificialmente mantenida, “manualmente” corregida, como se hacía con los relojes de cuerda de muñeca o de mesilla. El dial UTC es, literalmente, puesto en hora con lo que marca el irregular “reloj Tierra” cuando es necesario, aunque los relojes atómicos TAI no se tocan. Lo paradójico es que lo que se corrige es lo que marcan los relojes atómicos, los que mejor marchan, para que el dial UTC marque la misma hora que el “reloj Tierra”, el que no marcha tan bien.

El BIPM, en un texto que resume admirablemente la relación entre TAI y UTC, explica también las razones de ese “ajuste manual paradójico”:

“TAI es una escala estable y uniforme que no sigue las ligerísimas irregularidades de la rotación de la Tierra. Para propósitos públicos y prácticos es necesario tener una escala que lo haga a largo plazo. Tal escala es el Coordinated Universal Time (UTC), que es idéntico al TAI excepto que, de vez en cuando, se añade o se quita un segundo intercalar para asegurar que, cuando se promedia sobre un año, el Sol pase por el meridiano de Greenwich a mediodía UTC con un margen de 0'9 segundos. Las fechas de aplicación del segundo intercalar se deciden por el International Earth Rotation Service (IERS).” (International Atomic Time, www.bipm.org).

Claramente: la razón de ser de la UTC es que se considera necesario tener una hora que, a largo plazo, se ajuste a las irregularidades de la rotación de la Tierra, es decir, se considera necesario tener una hora relacionada con los ritmos astronómicos del planeta. En concreto, se construye UTC, manipulando la hora TAI, de forma que el mediodía en Greenwich (paso del sol por su meridiano) tenga lugar a 12 h de la hora planetaria con un margen de menos de un segundo.

Si no se hubiera recurrido a la corrección de los segundos intercalares, lo que sería equivalente a usar la hora atómica, la TAI, como hora oficial planetaria, el sol pasaría ahora por el meridiano de Greenwich no a las doce sino a las 12 y 37 segundos. En plazo muy largo, la hora TAI podría desajustarse, muy notoriamente, con los sucesos astronómicos diarios. Si se dejaran acumular las diferencias entre la hora TAI y la hora del “reloj Tierra”, se estima que el desfase llegaría a una hora en el año 3000. Es decir, dentro de unos mil años, sería mediodía en Greenwich a las 13 horas TAI, porque la Tierra llegaría una hora tarde a su cita con el Sol en el meridiano de Greenwich.⁷

⁷ Arias y Guinot, “Coordinated Universal Time UTC: historical background and perspectives”

Pero sucede que la hora UTC tiene algunos inconvenientes, derivados de su carácter discontinuo, de los saltos que la introducción de segundos intercalares produce en la hora. Los “saltos de hora”, que aunque avisados son irregulares, pueden tener inconvenientes comerciales, legales o funcionales (para redes de comunicación por ejemplo) y suponen una complicación para el software que debe controlar esos saltos, que alteran el paso continuo de los relojes de todos los aparatos conectados en red.

La discusión que se suscita es si los inconvenientes de una hora planetaria discontinua, con saltos debidos a los segundos intercalares, compensan los inconvenientes de una hora planetaria que se desentendiera de los ciclos astronómicos naturales, y si una hora separada de los ciclos astronómicos puede satisfacer todas las necesidades que una hora planetaria debería cubrir.

La hora planetaria debe atender necesidades de organización social, necesidades de investigación física y tecnológica, necesidades de investigación y navegación astronómica y necesidades ambientales ligadas a salud y bienestar. Los dos primeros tipos de necesidades se satisfacen perfectamente con una hora atómica estable y continua. Los dos segundos se satisfacen mejor con una hora ligada a los ritmos astronómicos del planeta.

Probablemente, se vaya a una solución de compromiso, una que minimice el número de saltos en la hora oficial por un lado y permita por otro un desajuste razonable entre la hora planetaria y el mediodía en Greenwich. Probablemente, en el futuro, en lugar de intercalar segundos con una periodicidad cercana al medio año, se intercalen minutos con una periodicidad próxima al siglo, o se intercalen horas con una periodicidad cercana al milenio.

En todo caso no debe perderse de vista el fondo de la discusión. Cuando se discute la conveniencia o inconveniencia de los segundos intercalares, lo que se está discutiendo es si el ritmo perfecto de la “hora atómica” debe desligarse o no del ritmo de rotación de la Tierra, lo que, en el fondo, supone elegir entre dar prioridad al ritmo perfecto que precisan los engranajes de la sociedad tecnológica, o darla al ritmo lentamente cambiante del día natural. De un modo más poético, se trata de elegir entre aceptar acomodarse a los ritmos exactos que la sociedad tecnológica necesita o mantenerse acoplados a los ritmos de la Tierra misma.

Bibliografía

Arias y Guinot, 2004, “Coordinated Universal Time UTC: historical background and perspectives, Proceedings Journées Systèmes de références spatio-temporels, París

Nelson, R.A. y otros, 2001, The leap second: its history and possible future, *Metrología*, 38, p 509-529

Torroja, J.M., 1984, Nuevas definiciones en el problema de la medida del tiempo, Ed Instituto de Astronomía y Geodesia, CSIC-UCM, Madrid.