

CAPÍTULO 9

Escalas de tiempo

María Silvina De Biasi

Según el Diccionario de la Real Academia Española, tiempo es la magnitud física que permite ordenar la secuencia de los sucesos, estableciendo un pasado, un presente y un futuro, y cuya unidad en el sistema internacional es el segundo. En varios capítulos de este libro el tiempo está presente en las variaciones de las coordenadas de los objetos celestes debido a varios efectos, por ejemplo la rotación y traslación de la Tierra, el movimiento de los planos fundamentales de referencia, el movimiento de las estrellas relativo al Sol. Podemos decir que el tiempo es la variable que describe los cambios en el mundo físico, intrínsecamente ligado con la medida del movimiento.

El problema de la Astronomía es la medida del tiempo, su definición es de naturaleza filosófica. Se denomina escala de tiempo a cualquier sistema de medición del tiempo fundado en un fenómeno físico observable, que puede tratarse del conteo de sucesos periódicos –las oscilaciones de un péndulo, de un diapasón, de un átomo excitado- o de un fenómeno continuo y medible –la rotación de la Tierra, su traslación -, como lo señala Vives (Vives 1971, p188-189). Para la medida práctica del tiempo es indispensable disponer de un mecanismo que reproduzca lo más exactamente la escala, el reloj o guarda-tiempo, permitiendo su conservación y ofreciendo continuamente una indicación directa del tiempo (Vives 1971, p.205).

Las escalas de tiempo utilizadas en Astronomía están agrupadas según el fenómeno que las define:

Tabla 9.1.

Escalas de tiempo utilizadas en Astronomía

Grupo	Fenómeno	Escala de tiempo
Tiempos rotacionales	Rotación de la Tierra	Tiempo Sidéreo, Tiempo Solar
Tiempos dinámicos	Traslación de los cuerpos del Sistema Solar	Tiempo de Efemérides Tiempo Dinámico Baricéntrico, Tiempo Terrestre

Tiempos físicos	Transiciones atómicas	Tiempo Atómico Internacional Tiempo Universal Coordinado
-----------------	-----------------------	---

Tiempos rotacionales

La unidad de esta escala de tiempo es el período de una revolución completa de la Tierra alrededor de su eje, como lo indica su nombre. La rotación terrestre puede medirse a través del movimiento angular del meridiano local de un observador relativo a un punto dado en la esfera celeste; luego la observación del movimiento diurno del punto seleccionado provee la medición de dicho movimiento. Los tiempos rotacionales son, en consecuencia, escalas de tiempo local y, además, están afectados por el movimiento del polo terrestre vistos en el capítulo 8.

Tiempo Sidéreo

El *Tiempo Sidéreo Local* TSL se mide numéricamente en cada instante por el ángulo horario del equinoccio vernal t_y .

El equinoccio vernal no está fijo en la esfera celeste, tal como se detalla en el capítulo 5, lo que introduce nuevas denominaciones. El *Tiempo Sidéreo Aparente Local* TSAL es el ángulo horario del Equinoccio Verdadero de la Fecha γ_V , mientras que el *Tiempo Sidéreo Medio Local* TSML es el ángulo horario del Equinoccio medio de la Fecha γ_m . Cuando los ángulos horarios están referidos al meridiano de Greenwich, se denominan Tiempo Sidéreo Aparente en Greenwich TSAG y Tiempo Sidéreo Medio en Greenwich TSMG, respectivamente. Por consiguiente, $TSMG = TSML - \lambda$ y $TSAG = TSAL - \lambda$, con λ la longitud geográfica del lugar.

La diferencia entre TSAL y TSML se denomina Ecuación de los Equinoccios EE, denominada “*nutación en ascensión recta*” antes de 1960, es la ascensión recta del Equinoccio medio de la Fecha referida a Ecuador y Equinoccio Verdaderos de la Fecha, representada por el arco $\gamma_V O$ en la figura 5.11. Se encuentra tabulada diariamente en las efemérides referida al meridiano de Greenwich, siendo su expresión:

$$EE = TSAG - TSMG$$

$$EE = \Delta \psi \cos \varepsilon_V \simeq \Delta \psi \cos \varepsilon_m \quad (9.1)$$

En la práctica, el Tiempo Sidéreo Aparente no es utilizado como escala de tiempo, solamente se lo determina mediante la observación de las estrellas en tránsito. Utilizando la ecuación 9.1, se obtiene el Tiempo Sidéreo Medio y se establece como unidad el día sidéreo medio, que es el intervalo entre dos tránsitos consecutivos del Equinoccio medio de la Fecha γ_m (Mueller, 1969, p.140). Por convención, el día sidéreo medio se divide en horas, minutos y segundos, y si denominamos (sid) al intervalo sidéreo medio

$$1 \text{ día (sid)} = 24^h(\text{sid}) = 1440^m(\text{sid}) = 86400^s(\text{sid})$$

Cabe ahora preguntarnos si la unidad del Tiempo Sidéreo Medio tiene siempre la misma duración considerando solamente efectos en el sistema celeste de referencia. Debido a la precesión, el día sidéreo medio es apenas más corto que un período de rotación de la Tierra. El Equinoccio se desplaza sobre el Ecuador hacia el Oeste con la velocidad anual de precesión general en ascensión recta m (fórmula 5.39) y, como la Tierra rota de Oeste a Este, cualquier meridiano encuentra al Equinoccio $\sim 0^s,008$ antes de completar los 360° respecto a un Equinoccio idealmente fijo en el Ecuador.

Tiempo Solar

Similar al Tiempo Sidéreo, el movimiento del Sol en ángulo horario respecto al meridiano local define al *Tiempo Solar Verdadero* $TS_\odot L$ y su medida numérica en cada instante es el ángulo horario del Sol. Luego

$$TS_\odot L = t_\odot$$

$$TS_\odot L = TSL - \alpha_\odot \quad (9.2)$$

Esta escala fue muy utilizada en la antigüedad para regular la vida civil, la medida de este tiempo se realizaba con un reloj de Sol.

Variaciones del Tiempo Solar Verdadero

Siguiendo a Vives, (Vives, 1971, p. 223-224), analizaremos el movimiento del Sol a lo largo de la eclíptica asumiendo un movimiento no perturbado - $\beta_s = 0$ - y la oblicuidad de la eclíptica ε conocida. A partir de la fórmula de los 5 elementos aplicada al triángulo esférico rectángulo $SU\gamma$ de la figura 7.5,

$$\sin \delta_s \cos 90^\circ = \cos \lambda_s \sin \alpha_s - \sin \lambda_s \cos \alpha_s \cos \varepsilon$$

se obtiene

$$\tan \alpha_s = \tan \lambda_s \cos \varepsilon$$

La variación en α_s se calcula derivando esta ecuación

$$\frac{-1}{\cos^2 \alpha_s} d \alpha_s = \frac{-1}{\cos^2 \lambda_s} d \lambda_s \cos \varepsilon \quad (9.3)$$

El teorema del coseno provee la expresión

$$\cos \lambda_s = \cos \alpha_s \sin \delta_s + \sin \alpha_s \cos \delta_s \cos 90^\circ \quad (9.4)$$

Reemplazando 9.4 en 9.3 resulta

$$d \alpha_s = \frac{\cos \varepsilon}{\cos^2 \delta_s} d \lambda_s \quad (9.5)$$

Analicemos las variables de la fórmula 9.5. El movimiento del Sol sobre la eclíptica no es uniforme debido a la ley de las áreas, luego $d \lambda_s$ es máxima en el perigeo y mínima en el apogeo; además δ_s varía entre $-\varepsilon \leq \delta_s \leq \varepsilon$ y el término $\cos^2 \delta_s$ es máximo en los equinoccios. Entonces, $d \alpha_s$ no aumenta uniformemente, por ende tampoco lo hace t_s , implicando que el Tiempo Solar Verdadero no es uniforme.

Tiempo Solar Medio

Las irregularidades del Tiempo Solar Verdadero recién estudiadas, además de ser conocidas por Claudio Ptolomeo, evidenciaron que el empleo del Sol no resultaba conveniente para cronometrar el tiempo. Los astrónomos idearon, entonces, una escala de tiempo regular, el Tiempo Solar Medio, con el objeto de garantizar la proporcionalidad entre la nueva escala y el ángulo que describe la Tierra durante la rotación alrededor de su eje –asumida como constante en aquella época- (Audin y Guinot, 1988, p.40). Para esto, se define un objeto celeste imaginario, el Sol Medio Ficticio (SMF), ubicado en el Ecuador medio de la fecha moviéndose uniformemente con velocidad igual a la velocidad diurna promedio del Sol, la que difiere de la velocidad media anual del Sol a lo largo de la Eclíptica en la mínima aceleración secular del Sol (Mueller, 1969, p.147). A fin de evitar confusiones de nomenclatura en las referencias utilizadas, este objeto imaginario toma el nombre de sol ficticio en Mueller (Mueller, 1969), Sol medio ficticio en ESAA (ESAA, 1992) y Sol Medio Universal en Green (Green, 1988).

El Sol Medio Ficticio (SMF) queda caracterizado por una fórmula convencional de su ascensión recta referida al Equinoccio medio establecida por Newcomb en sus Tablas del Sol (1895)

$$AR(\text{SMF}) = 18^h 38^m 45^s,836 + 8640184^s,542 T_M + 0^s,0929 T_M^2 \quad (9.6)$$

donde T_M es el tiempo en centurias julianas de 36525 días solares medios desde la época estándar 0 de enero de 1900 a 12^h TU (Mueller, 1969, p.147)

El ángulo horario del Sol Medio Ficticio define la escala de *Tiempo Solar Medio Local*

$$TS_{\odot} ML = t_{\text{SMF}} \quad (9.7)$$

su unidad es el día solar medio, que es el intervalo entre dos tránsitos consecutivos del SMF. Similar al día sidéreo medio, se divide en horas, minutos y segundos, y si el intervalo solar medio se designa con (M) resulta

$$1 \text{ día (M)} = 24^h \text{ (M)} = 1440^m \text{ (M)} = 86400^s \text{ (M)}$$

Para que el día comience a medianoche, se define el *Tiempo Civil* como

$$TCivil = TS_{\odot} ML + 12 \text{ h} \quad (9.8)$$

En especial, el Tiempo Civil del meridiano de Greenwich se denomina *Tiempo Universal* TU, su utilización fue recomendada por la UAI en 1948 (Audin y Guinot, 1988, p.41); asimismo el Tiempo Solar Medio en Greenwich, más conocido por sus siglas GMT y utilizado

frecuentemente en varios sitios de internet, es equivalente al Tiempo Universal en el Reino Unido y en navegación.

La diferencia entre el Tiempo Solar Verdadero y el Tiempo Solar Medio en un cierto instante se denomina Ecuación del Tiempo (ET), el módulo de su amplitud nunca excede los 16 minutos (ESAA, 1992, p. 74). El valor diario de ET se encuentra en los almanaques (efemérides) náuticos, se utiliza en el posicionamiento en tierra y en mar de baja precisión mediante observaciones del Sol y en los relojes de Sol.

A pesar de sus irregularidades, el Tiempo Solar Verdadero era la única escala accesible directamente mediante la observación de las alturas del Sol y de las estrellas y fue el argumento de las efemérides utilizadas para navegación y Astronomía; la Ecuación del Tiempo se utilizaba cuando el Tiempo Solar Medio era requerido para ajustar los relojes y determinar el argumento de entrada de las tablas astronómicas. Desde fines del siglo XVIII el Tiempo Solar Verdadero fue gradualmente remplazado en la vida civil por el Tiempo Solar Medio, lo que también sucedió en el argumento temporal de las efemérides a mediados del siglo XIX (ESAA, 1992, p. 75), además en 1925 se adopta el comienzo del día solar medio a medianoche (Audin y Guinot, 1988, p. 41).

Además del día solar medio, otro intervalo solar relevante es el año trópico (año solar medio trópico), definido como el tiempo requerido entre dos pasajes consecutivos del Sol Medio Ficticio por el Equinoccio medio, o equivalentemente el tiempo promedio requerido por el Sol para realizar dos pasajes consecutivos por Equinoccio Verdadero; su duración es de 365,24219879 días solares medios (Mueller, 1966, p. 150). Recordemos que el calendario civil usado en todo el mundo, tanto el calendario Juliano introducido en el año 46AC como el calendario Gregoriano puesto en práctica en 1582 y vigente en la actualidad, se ajusta lo mejor posible a la duración del año trópico.

Conversión entre intervalos de Tiempo Sidéreo y Tiempo Solar

En la ecuación 9.6, el valor de $AR(SMF)$ fija en cada instante la posición del Sol Medio Ficticio respecto al Equinoccio y a las estrellas, relacionando el Tiempo Solar Medio, ángulo horario del SMF con el Tiempo Sidéreo, ángulo horario del equinoccio, expresado en la ecuación 9.2. Utilizaremos la expresión 9.6 actualizada por la IAU en 1983 para encontrar la relación entre el Tiempo Sidéreo Medio en Greenwich TSMG y el Tiempo Universal TU (Green, 1988, p. 242)

$$AR(SMF) = 18^h 41^m 50^s,54841 + 8640184^s,812866 T_M + 0^s,093104 T_M^2 - 6^s,2 \times 10^{-6} T_M^3 \quad (9.9)$$

T_M es el tiempo en centurias julianas desde 1 de enero de 2000 a 12^hTU1 (ver capítulo 8).

La expresión 9.8 permite expresar

$$TU = TS_{\odot} MG + 12 \text{ h}$$

$$TU = TSMG - AR(SMF) + 12 \text{ h}$$

reemplazando los valores de 9.9 se llega a

$$TSMG \text{ a } 0 \text{ h TU} = 6^{\text{h}} 41^{\text{m}} 50^{\text{s}},54841 + 8640184^{\text{s}},812866 T_M + 0^{\text{s}},093104 T_M^2 - 6^{\text{s}},2 \times 10^{-6} T_M^3 \quad (9.10)$$

cuyos valores diarios a 0h TU se encuentran tabulados en los almanaques astronómicos.

Encontremos ahora el factor de conversión entre el día sidéreo medio y el día solar medio. Los últimos términos de 9.10 se deben a una variación secular del año trópico causada principalmente por una variación en la velocidad de precesión, por lo tanto son independientes de las variaciones de la velocidad angular de rotación terrestre y pueden despreciarse este análisis (Green, 1988, p. 242).

En la figura 9.1, se representa la Tierra vista desde el Polo norte celeste (PNC), donde MG simboliza el meridiano de Greenwich y se indican las direcciones al Equinoccio vernal y al Sol Medio Ficticio SMF. Durante 1 día solar medio, el ángulo horario que describe el Equinoccio se compone de un recorrido completo de 24 horas sidéreas más un ángulo μ . Este ángulo es igual a la tasa de cambio de TSMG durante 1 día solar medio -dada por 9.10- en el instante 12hs TU (el SMF está en tránsito en el meridiano MG) (Mueller, 1969, p.156). Luego,

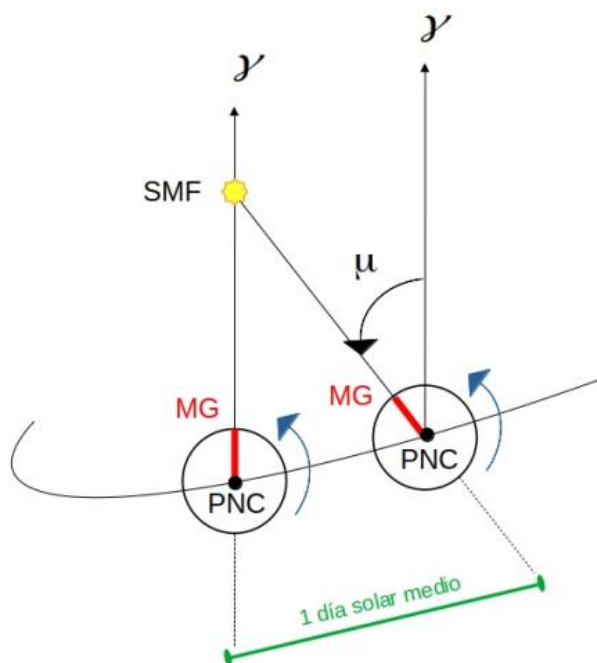
$$1 \text{ día (M)} = 1 \text{ día (sid)} + \mu$$

$$\mu = \frac{dTSMG}{dT_M} = \frac{8640184^{\text{s}},812866}{36525}$$

$$\mu = 236^{\text{s}},555367909$$

Figura 9.1.

Conversión entre día sidéreo medio y día solar medio



Nota. Adaptado de *Spherical and Practical Astronomy as Applied to Geodesy* (p. 158), por Mueller I. I., 1969, Frederick Ungar Publishing Co.

Finalmente,

$$1 \text{ día(M)} = 1,002737909350795 \text{ día (sid)} \quad (9.11a)$$

$$1 \text{ día (sid)} = 0,997269566329084 \text{ día (M)} \quad (9.11b)$$

Determinación del Tiempo Universal

En cualquier instante, una determinación directa de TU puede realizarse a partir del Tiempo Sidéreo Local en ese instante, generalmente observando el tránsito de un objeto celeste de ascensión recta conocida. Recordemos los pasos del procedimiento habitual de transformación del tiempo sidéreo aparente local TSAL en Tiempo Universal :

Primero: Calcular el Tiempo Sidéreo Medio Local mediante la ecuación de los equinoccios EE

$$TSML = TSAL - EE$$

Segundo: Obtener el Tiempo sidéreo medio en Greenwich mediante la longitud geográfica del lugar λ'

$$TSMG = TSML - \lambda'$$

Los pasos primero y segundo pueden intercambiarse

Tercero: Calcular el intervalo sidéreo θ entre 0h TU y el instante dado

$$\theta = TSMG - TSMG \text{ a } 0 \text{ h TU}$$

Cuarto: Convertir el intervalo sidéreo en un intervalo de TU (de tiempo solar medio) haciendo uso de 9.11b

$$TU = 0,997269566329084 \theta$$

Como se explicó en el capítulo 8, este procedimiento determina la escala de TU denominada TU0 que está afectada por el movimiento del polo y las irregularidades de la rotación terrestre. Sin embargo, es posible desafectar a TU0 del movimiento del polo utilizando la ecuación 8.21 para lo cual se asocia TU0 a la longitud instantánea λ y la nueva escala TU1 a la longitud convencional λ_0 del lugar de observación.

Difusión del Tiempo Universal

A fines del siglo XIX la vida civil utilizaba el Tiempo Solar Medio, sin embargo la coordinación de las actividades comerciales y del transporte requerían una referencia de tiempo única a nivel mundial. La adopción de un primer meridiano y de una hora universal fue recomendada en la conferencia internacional realizada en Washington en 1888, donde también se acordó que el día universal comenzara a medianoche en el primer meridiano (Audin y Guinot, 1988, p. 40). Esta hora universal estaría expresada en la escala TU.

A principios del siglo XX, el sistema de husos horarios ligado al Tiempo Universal se extendió a todo el mundo y la escala TU se difundía mediante señales horarias. Las diferencias de hasta 2 segundos detectadas entre estas señales evidenciaron notables discrepancias entre las distintas realizaciones locales de TU; este hecho motivó la creación de la Oficina

Internacional de la Hora (BIH) en 1912. Su tarea fue calcular un Tiempo Universal teórico –la hora definitiva- promediando observaciones astronómicas y transmitirlo mediante señales horarias (Audin y Guinot, 1988, p. 43).

Tiempos dinámicos

Una escala de tiempo uniforme podía conservarse y medirse en un reloj mecánico; tal es así que el Tiempo Solar Verdadero fue reemplazado por el Tiempo Solar Medio, concebido para que fuese proporcional a la rotación de la Tierra.

En la Grecia antigua la uniformidad de la rotación terrestre era un dogma, Copérnico adhería a este concepto aunque Kepler mencionaba la posibilidad de irregularidades en la misma. Flamsteed intentó medir dichas irregularidades con relojes de péndulo en el flamante Observatorio de Greenwich (1677) sin éxito. A mediados del siglo XVIII, la Academia de ciencias y bellas letras de Berlín debatió sobre la uniformidad de la rotación terrestre donde Kant propuso una causa: el posible frenado de la rotación terrestre era causado por la disipación de energía en las mareas oceánicas – lo que fue confirmado dos siglos más tarde por las observaciones-. La idea de la uniformidad de la rotación de la Tierra estaba muy arraigada entre los científicos, el reconocimiento de sus irregularidades comenzó en la segunda mitad del siglo XIX.

A mediados del siglo XIX Ferrel y Delaunay demostraron con principios de la dinámica que la diferencias entre las observaciones y las efemérides calculadas de la Luna se debían al aumento en la duración del día terrestre originado por las fuerza de marea entre la Tierra y la Luna.

El primer aporte de la no uniformidad de la rotación terrestre lo hizo el estudio de los movimientos de los planetas y de la Luna. Al orden de precisión de las observaciones de ese tiempo, el planteo de un modelo newtoniano de interacción gravitatoria entre el Sol y el planeta considerados puntuales era válido y desarrollado con gran precisión, aún despreciando la no esfericidad del planeta y los fenómenos disipativos de energía. Posteriormente, el modelo se ajustaba a las observaciones al comparar las posiciones del planeta calculadas en el instante de observación –en Tiempo Solar Medio- con dichas observaciones y surgían diferencias. Después de minimizar los posibles errores con un método de ajuste de las numerosas observaciones, las diferencias permanecían y no podían explicarse como errores aleatorios.

Este efecto fue observado por Newcomb al utilizar las efemérides de la Luna establecidas por Hansen en 1857 habiendo controlado previamente el modelo empleado; a partir de

los resultados obtenidos Newcomb consideró que el Tiempo Solar Medio posiblemente tenía irregularidades.

La confirmación de este hecho llegó en 1927 con el trabajo de Brown y de de Sitter sobre los efectos en la velocidad del movimiento orbital de Mercurio y Venus y las variaciones en las longitudes del Sol y la Luna. En la década de 1930 la aparición de los relojes de cuarzo permitió medir por primera vez la componente anual de la irregularidad de la rotación terrestre -aproximadamente 60ms- realizada en dos laboratorios en 1929 de forma independiente.

Casi simultáneo al trabajo de de Brown y de de Sitter, en 1929 Danjon escribió un artículo en una revista de aficionados donde sugirió la utilización de la dinámica de los movimientos orbitales para medir el tiempo, lamentablemente esta idea no acaparó la atención de sus colegas. En 1950, durante la Conferencia sobre las Constantes Astronómicas Fundamentales llevada a cabo en París, Clemence propuso establecer una escala fundamental uniforme definida por las Tablas del Sol de Newcomb. Finalmente, dicha escala fue aceptada denominándose "*Tiempo de las efemérides*" propuesto por Brouwer y adoptada por la UAI en 1952. Esta descripción histórica se obtuvo de Audin y Guinot, 1988, p. 43-46

Tiempo de Efemérides

El tiempo dinámico, representa la variable independiente de las ecuaciones de movimiento de los cuerpos del Sistema Solar (ESAA, 1992, p. 41) y es el argumento temporal de sus efemérides.

El *Tiempo de Efemérides* TE es una escala de tiempo dinámico expresado en forma solar. La teoría elegida fue la de Newcomb por ser la más usada en ese momento; TE es una escala estrictamente uniforme en la física Newtoniana asumiendo que la teoría en la que se basa es perfecta.

Para su definición, se introducen otro cuerpo ficticio, el Sol Medio de Efemérides (SME), que se mueve alrededor del Ecuador Medio con velocidad constante igual al movimiento medio del Sol; y un meridiano estándar, el meridiano de efemérides, que coincidiría con la dirección del meridiano de Greenwich si la Tierra rotase de manera uniforme a la velocidad implícita en la definición de TE; este meridiano no está fijo a la superficie terrestre y tiene un pequeño desplazamiento hacia el este (Green, 1988, p. 238). Cabe recordar que la dirección del meridiano de Greenwich en el espacio depende de la rotación de la Tierra y que los tiempos dinámicos son independientes de la misma.

La unidad y el origen de TE quedan definidos por convención mediante la adopción de la expresión numérica de la longitud media geométrica del Sol L dada por las tablas del Sol de Newcomb (1895),

$$L = 279^\circ 41' 48'',04 + 129602768'',13 T_E + 1'',089 T_E^2 \quad (9.12)$$

T_E es el intervalo medido en centurias julianas de efemérides (conteniendo 36525 días de efemérides, 1 día de efemérides conteniendo 86400 segundos de efemérides s_E) desde 0 de enero de 1900 a $12^h T_E$, origen de la escala e instante para el cual $L = 279^\circ 41' 48'',04$ (Mueller, 1969, p.168)

Similar a TU, el tiempo de Efemérides TE se define como

$$TE = t_{EF}(SME) + 12^h \quad (9.13)$$

Siendo t_{EF} el ángulo horario medido desde el meridiano de efemérides.

Unidad del Tiempo de Efemérides

La unidad primaria de TE es el año trópico en la época estándar de TE $T_E = 0$. Durante un año trópico, la longitud media geométrica L del SME aumenta 360° . Entonces, si N el número de segundos de efemérides en un año trópico, la variación de L durante ese intervalo de tiempo resulta

$$\frac{dL}{dT_E} N = 360^\circ \quad (9.14)$$

La ecuación 9.12 contiene un término lineal y otro cuadrático en T_E medidos en centurias de efemérides desde 1900 enero 0^d.5 TE; la derivada de este último da un término lineal en T_E que introduciría variaciones en la ecuación 9.14. El Tiempo de Efemérides fue creado como una escala de tiempo uniforme; entonces una unidad de tiempo constante se consigue cuando este término lineal en 9.14 se anule. Esto ocurre en el instante 1900 enero 0d.5 TE para el cual $T_E = 0$. Luego, la duración del segundo de efemérides s_E se calcula fácilmente:

$$\frac{1}{36525 \times 86400 s_E} \times 129602768'' , 13 \times N = 360 \times 3600''$$

$$N = 31556925,9747 s_E \quad (9.15)$$

La duración del segundo de efemérides s_E es la fracción $1/N$ del año trópico para 1900 enero 0d.5 TE. En 1956 fue adoptado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y formó parte del *Système International* (SI) hasta 1967 (Audin y Guinot, 1988, p. 548). El valor de s_E es muy cercano a la duración, en promedio, del segundo de tiempo solar medio durante los siglos XVIII y XIX (Audin y Guinot, 1988, p.53)

Determinación del Tiempo de Efemérides

La determinación primaria consiste en comparar las posiciones observadas del Sol con las efemérides donde el argumento es una medida del tiempo definida por la ecuación 9.12. El tiempo TE es, por definición, el valor del argumento para el cual la posición calculada – efemérides- coincide con la posición observada debidamente reducida aplicando las correcciones y transformaciones correspondientes vistas en capítulos anteriores (Mueller, 1969, p. 169). Por consiguiente, se sustituye el valor de L_{obs} en 9.12 y se resuelve la ecuación cuyo resultado es el TE correspondiente a la posición L_{obs} (Vives, 1971, p. 275). Esta determinación primaria de TE es muy difícil de realizar y poco precisa, suponiendo que la incerteza en la determinación de L_{obs} es del orden de $0''.5$, la incerteza en TE resulta del orden de 10s (Audin y Guinot, 1988, p.261).

Una mejora en la precisión de la determinación de TE se logra mediante las observaciones de la Luna durante las ocultaciones de las estrellas. La unicidad en la realización de la escala TE queda asegurada por el uso de una efemérides lunar particular recomendada por la UAI (Audin y Guinot, 1988, p. 261). Sin embargo, TE no estaba disponible de inmediato ni en un tiempo corto, ya que la reducción de las observaciones y el análisis de los datos requerían varios años (Mueller, 1969, p.169).

Un parámetro importante es la corrección ΔT que se define para cualquier instante como

$$\Delta T = TE - TU \quad (9.16)$$

En la práctica, se utiliza TU como escala intermediaria para el cálculo de ΔT , gracias a la menor incerteza en su determinación. ΔT se obtiene como la diferencia entre el instante en TE correspondiente a la posición L_{obs} y el instante de posición observada registrado en TU (ESAA, 1992, p. 79). Asimismo, ΔT está presente en la longitud geográfica del meridiano de efemérides mediante la expresión (Mueller, 1969, p.171).

$$\lambda_{EF} = 1,002738 \Delta T$$

En referencia a los objetos celestes ficticios que definen las escalas TE y TSM, el SME es similar al SMF. La ascensión recta del SME, AR(SME), está dada por la expresión

$$AR(SME) = 18^h 38^m 45^s,836 + 8640184^s,542 T_E + 0^s,0929 T_E^2 \quad (9.17)$$

La ecuación 9.17 se diferencia de la ecuación 9.6 en que t se expresa en centurias julianas de longitud variable contado desde una época estándar en TU. Como Newcomb asumió que la duración de la centuria juliana era estrictamente uniforme, la expresión que obtuvo fue 9.17 y no 9.6 (Mueller, 1969, p.170).

Dificultades del Tiempo de Efemérides

El Tiempo de Efemérides está definido por las Tablas del Sol de Newcomb y está basado en un conjunto de constantes astronómicas, por lo tanto cualquier cambio en la teoría del Sol y/o en las constantes astronómicas adoptadas modificarían su definición, como sucedió en 1984. Otro aspecto a considerar es que TE está definido en el marco de la dinámica newtoniana, sin poder clasificarse como una escala de tiempo baricéntrica o geocéntrica (ESAA, 1992, p.3), cuya distinción se verá más adelante.

Asimismo, la unidad primaria el año trópico para 1900 enero 0,5 TE fue elegida independiente de las constantes astronómicas, aunque su determinación lo sea. El origen o época fundamental fue fijado por convención a un valor determinado de la longitud geométrica media del Sol, no obstante las observaciones como las efemérides dependan del valor de la constante de aberración (ESAA 1992, p. 82).

Además de las incertezas en la determinación del TE y su disponibilidad no inmediata mencionadas arriba, esta escala está afectada por errores sistemáticos causados por su sensibilidad a la determinación del sistema de referencia y a los valores de las constantes astronómicas adoptadas en su definición; cualquier revisión provocaba un salto en TE como el

de 0,6 s en 1968 por el cambio en el valor de la constante de aberración (Audin y Guinot, 1988, p. 262).

Por todas las dificultades mostradas, el TE nunca fue difundido ni utilizado en la vida civil, su uso fue exclusivo de la dinámica astronómica. Cabe destacar que hasta 1960 la escala de tiempo oficial, TU, y la definición del segundo, la 86400ava parte del día solar medio, estaban coherentemente basadas en la rotación terrestre. No ocurrió lo mismo con la adopción del segundo de efemérides ya que la escala de tiempo continuaba siendo TU (Audin y Guinot, 1988, p.49).

Escalas modernas de tiempo dinámico

Hacia fines de la década de 1970 la UAI recomienda introducir dos nuevas escalas de tiempo para reemplazar al TE y reconocer la importancia de los efectos relativistas en la teoría dinámica de los miembros del Sistema Solar. Como se detallará más adelante, el segundo de efemérides había sido reemplazado por el segundo atómico como unidad de tiempo del SI en 1967 y la escala de tiempo oficial se basaba en el Tiempo Atómico Internacional TAI desde el 1 de enero de 1972. Recordemos que TE es la escala de tiempo dinámico en la mecánica newtoniana, uniforme, por lo que no es diferente del tiempo atómico –también uniforme- en el contexto de esta mecánica (Green 1988, p. 246).

El 1 de enero de 1977 se introduce la nueva escala de tiempo para las efemérides geocéntricas, denominada Tiempo Dinámico Terrestre TDT; su unidad es el segundo SI. Con respecto a su origen, éste se fija para mantener la continuidad con TE. Como se verá mas adelante $ET = TAI + 32^s,184$, luego

$$1 \text{ de enero de } 1977 \text{ a } 0^h TAI = 1 \text{ de enero de } 1977 \text{ a } 0^h 0^m 32^s,184 TDT$$

TDT comienza a utilizarse en los almanaques astronómicos recién en 1984 (Green, 1988, p. 240 y 246).

En 1976 y 1979 la UAI define el Tiempo Dinámico Baricéntrico TDB como la escala de tiempo de las ecuaciones de movimiento referidas al baricentro del Sistema Solar, esta escala difiere de TDT (luego TT) en pequeños términos periódicos cuyos valores dependen de la teoría relativista adoptada. Tanto TDT como TDB pueden considerarse como una extensión de TE (ESAA, 1992, p. 3).

Para situarnos en el contexto de las nuevas escalas definidas en 1991, se explicará brevemente la terminología referente al tiempo de la Relatividad General. En esta teoría, cada

punto del recorrido de una partícula en el espacio-tiempo está caracterizado por los valores de cuatro coordenadas en el espacio-tiempo (de 4 dimensiones) en un sistema de referencia dado. El tiempo propio es el tiempo que conserva un reloj que se mueve con la partícula, cualquiera sea la trayectoria y el campo gravitatorio en que se encuentre; en la práctica siempre es medible si el reloj puede viajar con la partícula. El tiempo coordinado es una de las cuatro variables independientes que caracterizan el evento en el espacio-tiempo, específicamente, el tiempo coordinado de un sistema de referencia dado es la variable independiente de las ecuaciones de movimiento de los cuerpos en ese sistema de referencia y, además, no es medible (Kaplan, 2005, p. 2).

En 1991, la Resolución A4 de la IAU definen nuevas escalas basadas en el segundo SI: las escalas de tiempo coordinado Tiempo Coordinado Baricéntrico TCB y Tiempo Coordinado Geocéntrico TCG que se utilizan en los desarrollos teóricos con origen en el BCRS y en el GCRS (ver capítulo 10), respectivamente (Kaplan, 2005, p. 9). El origen de TCG mantiene la continuidad con TE, mientras que el origen de TCB se fija tal que TCB tenga la misma lectura que TCG el 1 de enero de 1977 0h TAI en el Geocentro (Audin y Guinot, 1988, p. 222-224).

El Tiempo Terrestre TT es una variante de TCG cuya unidad es el segundo (de tiempo propio) sobre el geoide en rotación (Audin y Guinot, 1988, p.223). Para las aplicaciones prácticas, TT se considera una forma ideal de TAI con su origen fijo en 32^s,184 a fin de mantener la continuidad de TT con TDT y TE. Asimismo, la expresión ΔT en (9.16) adopta la forma

$$\Delta T = TT - TU$$

Tiempos físicos

El progreso en el conocimiento del electromagnetismo, de la física cuántica y atómica y de la espectroscopía llevado a cabo a fines del siglo XIX y durante la primera mitad del siglo XX propició la invención y el desarrollo de estándares de frecuencia y de tiempo. Al final de la década de 1930 Rabi desarrolló un método de resonancia magnética sobre un chorro atómico o molecular. En 1950 Ramsey introdujo el método de los campos oscilante separados que mejora las condiciones de interacción entre la onda electromagnética y los átomos. Estos métodos fueron la base para que Essen y Parry desarrollasen en 1955 el primer estándar de frecuencia de cesio operativo confiable en el National Physical Laboratory del Reino Unido (Audin y Guinot, 1988, p. 49-50).

Los desarrollos y mejoras de los relojes atómicos fueron contemporáneos de la definición del TE y de su unidad; por lo que Markowitz, Hall, Essen y Perry establecieron en 1958 el valor del segundo atómico en función del segundo de efemérides; este último determinado mediante un programa mundial de observaciones con la cámara lunar de Markowitz (Arias 2005; McCarthy y Seidelmann, 2018, p.95). Ante los inconvenientes que presentaba el TE, detallados más arriba, en 1967 la 13ra. Conferencia General de Pesas y Medidas adoptó una nueva definición del segundo, denominado segundo SI, como “la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133”. El valor numérico del segundo SI es igual al valor del segundo de efemérides determinado por Markowitz y Hall (Arias 2005; McCarthy y Seidelmann, 2018, p. 95) y su definición continúa vigente.

A fines de la década de 1950 se habían construido varios estándares de cesio de laboratorio y se comercializaban los estándares de cesio comerciales, permitiendo la realización de escalas de tiempo atómico independientes. Luego, surgieron como objetivos la comparación del rendimiento de los estándares y la producción de una escala atómica promedio más uniforme y confiable que los individuales (Arias, 2005).

Si bien la búsqueda de una escala de tiempo fácilmente accesible a toda la comunidad mundial comenzaba a dar sus frutos, la aprobación de la escala de tiempo atómico TAI no fue sencilla. Una objeción fue su origen artificial, mediante un dispositivo, opuesto a un fenómeno espontáneo (Arias 2005) como la rotación terrestre o la dinámica de los cuerpos del Sistema Solar, además se observaba un avance de TAI respecto a TU1 que alcanzaría aproximadamente 1 hora en 1000 años (Audin y Guinot, 1988, p. 59).

La escala de *Tiempo Atómico Internacional* TAI fue reconocida oficialmente en 1971 por la Conferencia General de Pesas y Medidas y por la Unión Internacional de Telecomunicaciones. La unidad de TAI es el segundo del Sistema Internacional de Unidades SI a nivel del mar (Earth Orientation Centre, <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php>), su origen se fijó convencionalmente de modo que la misma fecha en TAI y en Tiempo Universal ocurrió el 1 enero 1958 0hs TU, no utilizándose TE debido a su mala determinación en aquel momento. Luego se adoptó el valor $TE = TAI + 32^s,184$, donde el valor $32^s,184$ representa la mejor estimación de la diferencia entre TE y TAI para el 1 enero 1977 (Audin y Guinot, 1988, p. 222).

TAI es la base de las escalas de tiempo utilizado en la dinámica y el modelo de movimiento de los cuerpos celestes naturales y artificiales, con aplicaciones en la exploración del universo, comprobaciones de teorías, geodesia, geofísica y estudios del medio ambiente donde cobran relevancia los efectos relativistas (Arias, 2005).

Sin embargo, el rechazo a la adopción de TAI como la hora mundial reemplazando a TU1 tuvo una razón práctica. En ese tiempo, los navegantes utilizaban la navegación astronómica

para el posicionamiento en el mar y se opusieron firmemente al cese de difusión de TU1 (Audin y Guinot, 1988, p. 59), dato vital para determinar la longitud geográfica.

Finalmente, desde el 1 de enero de 1972 la escala mundial de tiempo civil desde el 1 de enero de 1972 es el *Tiempo Universal Coordinado TUC*. Su unidad es el segundo SI y la escala está sujeta a ajustes de 1 segundo, llamados segundos intercalares, para mantenerse dentro de 0,9s de TU1. (Kaplan, 2005, p. 11). TUC es la referencia horaria mundial de la vida civil y base legal de las horas oficiales de los países, en reemplazo de TU.

Los segundos intercalares se agregan, de ser necesario, al final de junio o diciembre, su anuncio y procedimiento se detallan en el Boletín C del Earth Rotation Centre. Hasta el momento, el último ocurrió el 1 de enero de 2017 0hs TUC (Boletín C 52) donde la secuencia de los segundos indicadores fue:

31 de diciembre de 2016, $23^h 59^m 59^s$ TUC

31 de diciembre de 2016, $23^h 59^m 60^s$ TUC

1 de enero de 2017, $0^h 0^m 0^s$ TUC

Como puede observarse, hay dos instantes distintos (2do y 3er segundos indicadores) para los que su valor numérico es la misma fecha. Esta situación causa inconvenientes técnicos y legales en las transacciones comerciales en red y en las transferencias electrónicas de fondos. Por este motivo, la IAU estableció un Grupo de Trabajo de la IAU sobre la Re-definición del Tiempo Universal Coordinado con el fin de plantear el problema del segundo intercalar y recomendar una solución, trabajando con el IERS, el Unión Internacional de Ciencias de la Radio (URSI), el Sector de Radiocomunicaciones de la Internacional Unión de Telecomunicaciones (UIT-R), la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), y las agencias de navegación pertinentes (Resolución B2 XXIV IAU GA 2000).

Creación TAI y de TUC

TAI es una escala de tiempo integrada debido a que se construye por acumulación de segundos, lo que conlleva a acumular incertidumbres que le valieron críticas a su adopción en reemplazo de TE, aunque prevaleció su precisión. La construcción de una escala de tiempo integrada requiere de un fenómeno, la definición de la unidad, las realizaciones de la unidad o

patrones de frecuencia (relojes continuamente operativos) y un algoritmo de cálculo adaptado a los requerimientos de la escala. (Arias, 2005).

Además, una escala de tiempo se caracteriza por su fiabilidad, estabilidad de frecuencia, precisión de frecuencia y accesibilidad. La fiabilidad está estrechamente relacionada con la fiabilidad de los relojes cuyas medidas se utilizan para su construcción y con su cantidad, que debe ser grande. La estabilidad de frecuencia de una escala de tiempo es la capacidad de mantener fija una proporción entre la unidad de la escala y su definición teórica. La exactitud de frecuencia es la aptitud de su intervalo de escala unitario para reproducir su contraparte teórica. La accesibilidad a una escala de tiempo mundial es su capacidad para proporcionar una forma de fechar eventos para cualquier uso. TAI se construye de modo de cumplir con estas condiciones (Arias, 2005). Las distintas etapas en su establecimiento se detallan a continuación.

TAI y TUC se obtienen a partir de la combinación de datos de aproximadamente 450 relojes atómicos que funcionan en más de 80 organismos de tiempo, cada reloj mantiene una escala local de TUC denominada TUC(k) (BIPM AR 2020, p. 9).

Dichos datos provienen de las comparaciones entre las escalas locales TUC(k) de los relojes que integran la red internacional de conexiones de tiempo (*time links*) organizada por el BIPM. Los métodos de comparación de estos relojes se basan en observaciones de satélites GNSS y en la transferencia de tiempo y frecuencia de doble vía (TWSTFT) (BIPM AR 2020, p. 9-10). Esta última utiliza satélites geoestacionarios de telecomunicación para comparar simultáneamente relojes ubicados, cada uno, en los extremos de la línea de base entre dos estaciones receptoras-emisoras (Arias 2005).

Las técnicas de transferencia de tiempo GNSS (en su mayoría satélites GPS) son los métodos All-in-view (AV), GPS PPP (BIPM AR 2020, p10) y en algunos casos el de Vista Común (CV) (BIPM AR 2020, p.10). CV permite comparar dos relojes que reciben simultáneamente la información de tiempo del mismo satélite, y posibilita eliminar y/o minimizar varios errores. AV es una variación de CV, donde los receptores de todas las estaciones participantes observan todos los satélites que están a la vista. La técnica de transferencia de tiempo basada en el posicionamiento de punto preciso PPP utiliza como datos las mediciones de código y fase del receptor GPS provenientes de todos los satélites observados por los relojes de dos sitios separados, el procesamiento de dichos datos permite estimar la diferencias de tiempo y frecuencia entre los dos sitios (McCarthy y Seidelmann, 2018, p.288-289). La información sobre la distribución geográfica de los laboratorios que contribuyen a TAI y los equipos de transferencia de tiempo están disponibles en el servidor FTP del Departamento de Tiempo del BIPM, sección Informes anuales.

La elaboración de TAI privilegia la estabilidad a largo tiempo (un mes o más) y la exactitud en frecuencia. La misma se establece en dos pasos: un algoritmo de estabilidad produce la

escala atómica libre EAL donde la estabilidad es óptima durante la duración del intervalo de muestreo, luego el pilotaje de TAI asegura la exactitud en frecuencia de TAI (Audin y Guinot, 1988, p. 227).

El algoritmo de cálculo de TAI, Algos, fue desarrollado en el BIH en la década de 1970 donde se fijaron los principios de la construcción de TAI, su cálculo está a cargo del BIPM desde 1988. En el primer paso, se calcula una escala como el promedio ponderado de las lecturas de los relojes obtenidas en las comparaciones de reloj con los métodos arriba descriptos. Esta escala se denomina escala de tiempo atómica libre (*Echelle Atomique Libre*, EAL) tiene una estabilidad de frecuencia óptima durante la duración del intervalo de muestreo pero su frecuencia no está restringida para ser precisa. Para asegurar la exactitud en frecuencia de la escala, el segundo paso consiste en corregir la frecuencia de la EAL en base a las frecuencias de los estándares primarios de frecuencia (Primary Frequency Standards, PFS), los que representan las mejores realizaciones del segundo SI (Arias 2005). Este procedimiento se conoce como pilotaje de TAI, y su resultado final es TAI. (Audin y Guinot, 1988, p. 227; Arias, 2005).

Recordemos que TUC se obtiene sumando el número entero de segundos intercalares aplicados desde el 1 enero 1972. Hasta el presente, $TUC - TAI = -37^s$ (Boletín C 52, Earth Orientation Centre).

Difusión de TAI y de TUC

TAI y TUC se difunden mensualmente a través de la Circular T de BIPM, publicada sin interrupción desde el 1 Marzo de 1988 y disponible en el servidor FTP del Departamento de Tiempo del BIPM. La Circular T contiene, cada 5 días a 0h TUC, las diferencias y sus incertidumbres en nanosegundos entre TUC y la realización local de la escala en cada uno de los laboratorios que contribuyen a la construcción de TUC, TUC(k). Las diferencias [TUC-TUC(k)] aseguran la trazabilidad de las aproximaciones locales TUC(k) a TUC, es decir, otorgan valor legal a cada TUC(k), principalmente porque muchas son la base de las horas oficiales de países.

Los satélites GPS difunden la escala de tiempo del sistema llamada Tiempo GPS, que resulta de la combinación de relojes ubicados en los sitios de monitoreo y a bordo de los satélites, y está gobernada por TUC(USNO) módulo 1 s, de la que no puede diferir en más de un microsegundo. Generalmente, los receptores GPS proporcionan TUC al usuario, pues se transmite el desfase horario entre TUC y el Tiempo GPS. De manera similar, los satélites

GLONASS difunde la escala Tiempo GLONASS (Arias, 2005; McCarthy y Seidelmann, 2018, p. 289).

Referencias

- XXIst General Assembly Buenos Aires, Argentina, 1991 Disponible en: https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1991_French.pdf
- XXIVst General Assembly, Manchester, UK, 2000 Disponible en: https://www.iau.org/static/resolutions/IAU200_French.pdf
- Arias, E.F. (2005) The Metrology of Time. *Physiological Transactions of the Royal Society A* 363, 2289-2305
- Audin C. y Guinot, B. (1988). *Les fondements de la mesure du temps. Comment les fréquences atomiques règlent le monde*. Paris Editorial Masson.
- BIPM Annual Report (2020), disponible en <https://www.bipm.org/en/time-ftp>
- ESAA (Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac) (1992). *A revision to the Explanatory Supplement of the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac*. P.K. Seidelmann (ed.). University Science Books
- Green, R.M. (1988). *Spherical astronomy*. Cambridge University Press.
- Kaplan, G.H. (2005) *The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems, Time Scales and Earth Rotation models. Explanation and Implementation*. United States Naval Observatory Circular No.179, 1-118.
- McCarthy, D.D. Seidelmann, P.K. (2018) *Time: From Earth Rotation to Atomic Physics*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Mueller, I.I. (1969). *Spherical and Practical Astronomy as Applied to Geodesy*. New York. Frederic Ungar Publishing CO.
- Vives, T.J. (1971). *Astronomía de posición. Espacio y tiempo*. Editorial Alhambra, S.A.