

Tema 4

Tiempo y Escalas de Tiempo

4.1- Introducción

Durante toda la historia de la humanidad, la necesidad de medir el tiempo lo mejor posible ha sido una tarea continuamente perfeccionada. En las civilizaciones antiguas el conocimiento del comienzo de las estaciones, las épocas de la siembra y de las cosechas ha sido de vital importancia para los pueblos.

Siempre la astronomía se usó para determinar el tiempo. El movimiento aparente del Sol, la Luna y los astros alrededor de la Tierra, fueron tomados como patrones de tiempo, definiendo los días y el año.

Las formas e instrumentos para medir el tiempo son de uso muy antiguo, y todas ellas se basan en la medición del movimiento y del cambio material de un objeto a través del tiempo. En un principio, se comenzaron a medir los movimientos de los astros, especialmente el movimiento aparente del Sol, dando lugar al tiempo solar aparente. La duración de un día solar definía la escala de tiempo. Para ello se fueron creando diversos instrumentos, tales como los relojes de sol, las clepsidras o los relojes de arena y los cronómetros mecánicos.

Paulatinamente la determinación de la medida del tiempo se fue perfeccionando hasta que, en la actualidad, los requerimientos de alta precisión propiciaron el desarrollo de los relojes atómicos.

4.2- El movimiento del Sol

Para que el Sol (o un astro cualquiera) pueda ser tomado como punto de referencia en la medición del movimiento de rotación de la Tierra, regulando días de duración constante, debe cumplir con una de las dos condiciones siguientes:

- (a) Que no tenga variaciones en ascensión recta (α)
- (b) Que en caso de tener variaciones en α , lo haga siempre con movimiento uniforme

Estos requisitos no los cumplen ni el Sol ni el punto vernal. En el caso del Sol, dos causas impiden que se encuadre en las mencionadas condiciones, perturbando por consiguiente la duración del día solar verdadero. Estas causas son:

I) La ley de las áreas. Sol Ficticio

Según la cual el radio vector Sol–Tierra debe barrer áreas iguales en tiempos iguales (2° Ley de Kepler). Esto ocasiona variaciones de la velocidad angular del Sol en su desplazamiento anual sobre la eclíptica, haciendo que la velocidad sea máxima en el perigeo y mínima en el apogeo.

Estas variaciones dan lugar a que el incremento diario de la longitud eclíptica del Sol no sea constante, lo que deriva en una desigual variación en ascensión recta, es decir de la proyección de la longitud eclíptica sobre el ecuador.

Para evitar estas desviaciones se idea un Sol imaginario llamado *Sol ficticio*, que se desplaza sobre la eclíptica con velocidad angular constante y la recorre, al igual que el Sol verdadero, en un año. Vale decir que la longitud eclíptica del Sol ficticio (**Lf**) aumenta o disminuye en una constante.

II) La Oblicuidad de la Eclíptica. Sol Medio

Si bien el Sol ficticio elimina la perturbación producida por la ley de las áreas sobre la duración del día solar verdadero, es insuficiente de por sí para regular días de igual duración en todas las fechas del año, puesto que sus variaciones diarias constantes

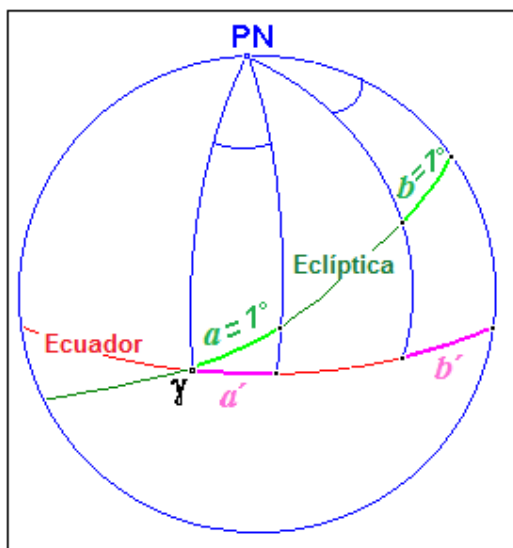


Figura 4.2a: Proyecciones de arcos de 1 grado sobre el ecuador

en longitud eclíptica, no lo son en ascensión recta, debido a que las proyecciones de arcos iguales de la eclíptica sobre el ecuador no son en general iguales, [Figura 4.2a].

Debido a que la eclíptica y el ecuador no coinciden ($\epsilon = 23^\circ 27'$), las proyecciones de arcos iguales de la eclíptica no son arcos iguales sobre el ecuador.

Consideremos sobre la eclíptica arcos a y b de un grado cada uno, el primero cerca del punto vernal y el segundo cerca del solsticio. Proyectemos mediante círculos horarios estos arcos sobre el ecuador para encontrar a' y b' .

Vemos que $a > a'$ y $b < b'$, por lo que $a' < I^\circ$ y $b' > I^\circ$. Concluimos que, dependiendo de la época, arcos iguales sobre la eclíptica no se corresponden con arcos iguales en el ecuador.

En consecuencia, para eliminar esta variación hubo que idear otro Sol imaginario llamado *Sol medio* (S_m) que se desplaza sobre el ecuador con movimiento uniforme y constante, de modo que la ascensión recta del Sol medio sea igual a la longitud eclíptica del Sol ficticio:

$$\alpha_m = L_f \quad (1)$$

Definimos el *Tiempo Solar Medio* (T_m) como el ángulo horario del Sol medio en algún instante considerado. Como este Sol es imaginario, el T_m no lo podemos determinar por la observación y debe, por lo tanto, ser calculado mediante alguna ecuación que relacione los tiempos medios (T_m) con los del verdadero Sol (T_v).

4.3- Ecuación del Centro (C)

Sabemos que tanto el Sol verdadero (S_v) como el Sol ficticio (S_f) se mueven sobre la eclíptica, el primero con velocidad angular variable y el segundo con movimiento uniforme.

Supongamos que ambos soles parten juntos del perigeo P, alrededor del 1° de Enero, [Figura 4.3a]. Como la velocidad angular del S_v en el trayecto hasta el punto M es mayor que la velocidad constante del S_f , será S_v quien saque ventaja. Desde el punto M hasta el apogeo A, el S_v ira perdiendo la ventaja haciendo que en A ambos soles lleguen juntos.

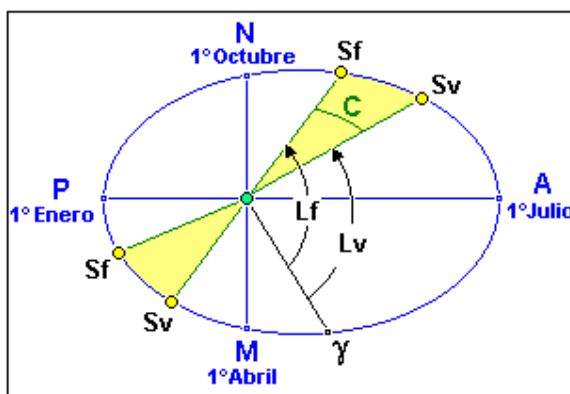


Figura 4.3 a: Diferentes posiciones del S_f y del S_v

A partir de A ocurre la inversa, siendo S_f quien marcha en ventaja hasta llegar juntos a P.

Se ve entonces que la longitud eclíptica del Sol verdadero L_v se obtiene agregando a la longitud eclíptica del Sol ficticio L_f una corrección denominada *Ecuación del Centro* (C).

$$C = L_v - L_f \quad (2)$$

Resulta así que la ecuación del centro se anula en los puntos P y A siendo positiva de P→A y negativa de A→P. El valor máximo de C se alcanza a principios de Abril (punto M) y es de unos 2° (aproximadamente 8^m), [Figura 4.3b].

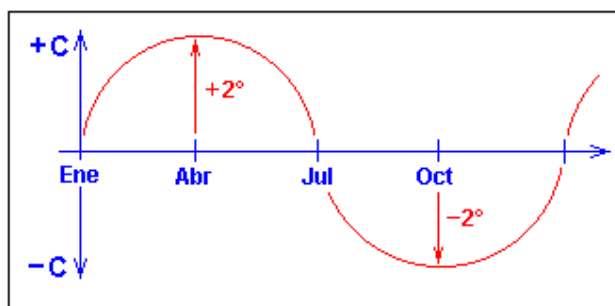


Figura 4.3b: Gráfica de la ecuación del centro (C)

Es a principios de Octubre (punto N) cuando se alcanza el valor mas negativo, valiendo -2° (aproximadamente -8^m).

4.4- Reducción al Ecuador (R)

Es un término correctivo de valor periódicamente variable, que sumado a la longitud eclíptica del Sol verdadero nos da el valor de la ascensión recta del Sv.

$$R + L_v = \alpha_v$$

donde :

$$R = \alpha_v - L_v \quad (3)$$

Es evidente que, si el Sv recorre la eclíptica con velocidad no uniforme, la longitud eclíptica varía diariamente. Por otra parte, la proyección de L_v sobre el ecuador no nos da ascensiones rectas constantes, sino que α_v varía diariamente.

La corrección R se anula cuatro veces al año, cuando $\alpha_v = L_v$. Ocurre para los valores de $L_v = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ y 270° , que corresponden al comienzo de las cuatro estaciones del año, [Figura 4.4a].

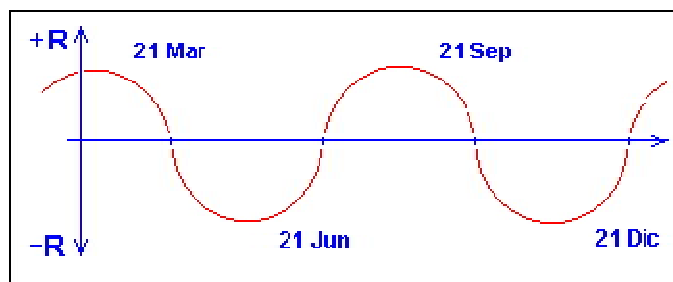


Figura 4.4a: Gráfico anual de la reducción al ecuador

4.5- Ecuación del Tiempo (Et)

Como vimos antes, estamos buscando una relación entre el Tiempo verdadero (T_v) y el Tiempo medio (T_m). Queremos encontrar una cantidad que sumada o restada al Tiempo del Sol verdadero nos dé el Tiempo medio (T_m)

Hasta el momento sabemos que:

$$\alpha_m = L_f \quad (1)$$

$$C = L_v - L_f \quad (2)$$

$$R = \alpha_v - L_v \quad (3)$$

De (3): $\alpha_v = L_v + R$

De (2): $L_v = L_f + C$

Reemplazando (2) en (3) resulta: $\alpha_v = \alpha_m + (C + R)$

$$\alpha_m - \alpha_v = -(C + R) \quad (4)$$

Sabemos que $\theta_l = \alpha + H$. Como para un mismo instante el ángulo horario del punto vernal (tiempo sidéreo θ_l) tiene que ser el mismo cualquiera sea el astro utilizado (verdadero o medio), entonces:

$$\theta_l = \alpha_m + H_m = \alpha_v + H_v$$

Como los ángulos horarios los puedo tomar como tiempos: $H_m = T_m$, $H_v = T_v$
Entonces:

$$\theta_l = \alpha_m + T_m = \alpha_v + T_v$$

La ecuación (4) queda:

$$\alpha_m - \alpha_v = T_v - T_m = -(C+R)$$

Esta última relación se denomina *Ecuación del Tiempo (Et)* y puede escribirse como:

$$Et = -(C+R) = T_v - T_m \quad (5)$$

La *Et* puede ser positiva o negativa, es decir que el Sol medio puede seguir o preceder al Sol verdadero durante el movimiento anual alrededor de la Tierra.

La curva de la *Et* puede obtenerse sumando las gráficas vistas de *C* y *R*, [Figura 4.5a]. La *Et* viene tabulada en almanaques y efemérides astronómicas para todos los días del año.

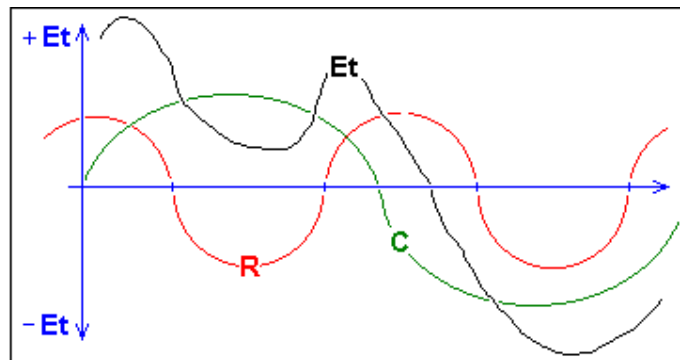


Figura 4.5a: Gráfica de la ecuación del tiempo (*Et*)

Según la [Figura 4.5b], la *Et* también puede calcularse de la siguiente forma. Sea el círculo que representa al ecuador y sobre él tracemos el meridiano de Greenwich (G).

El equinoccio (γ) lo suponemos en algún lugar de ecuador. Supongamos que el S_m está en el meridiano inferior de Greenwich, es decir comenzando el día (0^h de TU). El Tiempo sidéreo de Greenwich (θ_g) se mide como el ángulo horario sobre el ecuador desde G hasta γ .

Pero en el instante que el Sm está ubicado en las 0^h , el tiempo sidéreo recibe el nombre de *Tiempo Sidéreo de Greenwich a las 0^h de TU* (θ_0). Este valor de θ_0 viene tabulado y es un único valor diario, ya que el Sm está solo una vez al día pasando por el meridiano inferior de Greenwich.

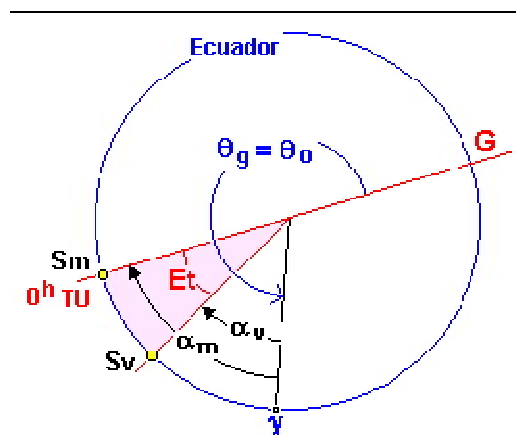


Figura 4.5b: Et como diferencia angular

Del gráfico vemos que:

$$Et = (\theta_0 \pm 12^h) - \alpha_v \quad (6)$$

En alguna época del año la Et puede tener valores de aproximadamente ± 16 minutos, es decir que como máximo el Sv y el Sm pueden estar desfasados dieciséis minutos en tiempo.

4.6- Definiciones de Día

4.6.1- Tiempo Solar Verdadero y Día Solar Verdadero

Si tomamos como referencia el meridiano superior de un lugar, el *Tiempo Solar Verdadero* (Tv) puede ser medido como el *Ángulo Horario* (Hv) del Sv.

Para la definición del “día” debe tomarse como referencia el meridiano inferior. De tal manera puede definirse al *Día Solar Verdadero* como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del Sol verdadero por el meridiano inferior.

4.6.2- Tiempo Solar Medio y Día Solar Medio

Si tomamos como referencia el meridiano superior de un lugar, el *Tiempo Solar Medio* (Tm) puede ser medido como el *Ángulo Horario* (Hm) del Sol medio.

De todo lo anterior podemos definir el *Día Solar Medio* como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del Sol medio (S_m) por un punto de referencia. Para el comienzo del día (0 horas), en la Argentina se toma como referencia el meridiano inferior del Huso de 3 horas al oeste de Greenwich.

El segundo de Tiempo Medio (T_m) se define como:

$$1 / 86400 \text{ partes del Día Medio}$$

4.7- Calendarios

4.7.1- Calendario Lunar

El período más importante es la *Lunación* o *Período Sinódico*, desde Luna llena hasta la próxima Luna llena, que toma 29.530589 días; mientras que el *Período Sidéreo* es respecto a una estrella fija de la esfera celeste y dura 27.321662 días.

También la Luna posee otros períodos como el *Anomalístico* de 27.554550 días, de perigeo a perigeo, que es importante para el estudio de las mareas. El período *Tropical* es de 27.321582 días, de equinoccio a equinoccio, diferenciándose del período sidéreo por el movimiento de precesión del equinoccio que lo disminuye en $50''.2$ de arco. Por último puede nombrarse el período *Dracónico*, de nodo a nodo, que toma 27.212221 días.

Si usamos 12 meses lunares o lunaciones sumamos 354.36 días y si usamos 13 meses tendremos 383.89 días. Es decir, que un calendario formado por 12 o 13 meses lunares estará muy por debajo o muy por encima del año real.

El calendario lunar creado por los babilonios consiste en años de 12 meses de 29 y 30 días alternados y, de vez en cuando, intercalar uno de 13 meses de manera tal que cada 8 años se cumplan 99 lunaciones.

Por supuesto que el calendario lunar hoy día no se emplea, salvo en los países musulmanes y en China donde solo se lo conserva como antigua tradición.

Un ciclo famoso en la predicción de eclipses es el llamado *Ciclo de Saros*, que es un período de tiempo al cabo del cual la configuración “Sol – Tierra – Luna ” vuelve a ocupar la misma posición (ocurre cada 18 años y 11.3 días = 6585.321 días), por lo que los eclipses de Sol y de Luna se repiten aproximadamente cada 223 lunaciones.

En un mismo año puede haber varios eclipses de Sol y de Luna que pertenecen a distintos ciclos o “familias” de Saros.

4.7.2- Calendario Egipcio

El calendario solar tiene su origen en Egipto. Consiste en 12 meses de 30 días que suman 360 días y a fin de año se le agregan 5 días extras.

Este calendario tiene un error de 0.242190 días por año acumulativos. Pero para los egipcios esto no era problema ya que ellos basaban sus actividades en la época de inundación del río Nilo, para la siembra del arroz.

4.7.3- Calendario Juliano

Julio César, en el año 46 a.C., consultó a su astrónomo Sosígenes quien dedujo el error del calendario egipcio y sugirió la incorporación de 1 día más, de manera tal de tener 3 años de 365 días y 1 año de 366 días. Esto promediaba un año de 365.25 días, una mejor aproximación al año real (año trópico de 365.242190 días) que la que ofrecía el calendario egipcio.

Además, la idea de Sosígenes fue repartir los 5 días adicionales de los egipcios en otros meses, formando meses de 30 y 31 días.

La inserción de los días extras se venía haciendo 6 días antes del primero de marzo, o sea el 23 de febrero. En esa época el calendario comenzaba el 1° de Marzo (en latín CALENDAS MARTIAS, principio de marzo) y de ahí el origen de la palabra “Bisiesto” (en latín BIS SEXTUS, 6 días antes).

Para el nuevo calendario Juliano, se le sacó un día al último mes Febrero para agregarlo al mes Julio, en honor a Julio César después de su muerte. Para el año 8 a.C. se le sacó otro día a Febrero para agregárselo a Agosto en honor a Augusto, quien no podía ser menos que Julio César.

Quedó entonces como año bisiesto a aquél año que se le agrega 1 día extra a Febrero y cuya cifra es divisible por cuatro.

Pero todavía hay un problema con el calendario Juliano. Si hacemos la resta: 365.25 (año juliano) – 365.242190 (año trópico), arroja un error de 11 minutos por año adelantándose. Así, en un siglo se acumula un error de 0.78 días y en un milenio alcanza 7.8 días.

4.7.4- Calendario Gregoriano

Por el año 1582 d.C. existía un desfase acumulado muy grande entre la realidad de las estaciones y el calendario Juliano. El Papa Gregorio XIII sobre la base de los cálculos efectuados por los astrónomos Luis Lilio y Cristóbal Clavius, reformó el calendario con las siguientes modificaciones:

Si el año es divisible por 4 , entonces “Si” es bisiesto (Ej. año 2016).

Si el año es divisible por 100 , entonces “No” es bisiesto (Ej. año 2100)

Si el año es divisible por 400 , entonces “Si” es bisiesto (Ej año 2000).

Gregorio XIII dispuso que al día 4 de Octubre de 1582 le siguiera el día 15 de Octubre, para corregir el desfase de diez días entre el año astronómico y el civil adoptado. Además estableció que el nuevo calendario tomase como unidad de medida la duración del año trópico (determinado con la precisión de aquella época).

Gradualmente los diferentes países del mundo fueron adoptando este calendario, siendo hoy día el almanaque de uso oficial en casi todo el globo. Este tiene entonces un año de 365.2425 días, acumulando un error de 1 día cada 3300 años.

No todos los pueblos poseen el mismo calendario. Los mismos varían de acuerdo al punto de partida que su cultura toma para contar el paso de los años y del astro involucrado (Sol o Luna):

- El hebreo es una combinación del Sol y la Luna (se denomina lunisolar).
- El chino también es lunisolar, aunque solo lo emplean para sus festividades tradicionales, por cuanto sus actividades normales son manejadas con el calendario gregoriano.
- El musulmán es lunar, con un ciclo de 30 años dividido en 19 años de 354 días y 11 años de 355 días.
- El persa es solar, comienza en marzo con seis meses de 31 días, los cinco meses siguientes de 30 días y el último con 29 o 30 días según sea bisiesto o no.

4.8- Longitud de los Años

4.8.1- Año Trópico

Es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasajes sucesivos del Sol medio por el equinoccio o punto vernal (γ). Se desarrolla de equinoccio a equinoccio.

Es el tiempo real que tarda la Tierra en cumplir una traslación alrededor del Sol. Debido al efecto de precesión que hace retroceder al punto vernal $50''.2$ en un año, el Sol medio no logra completar una revolución y encuentra al equinoccio anticipadamente.

$$\text{Un Año Trópico} = 365.242198 \text{ días medios } (365^{\text{d}} 05^{\text{h}} 48^{\text{m}} 46^{\text{s}})$$

Además, como la precesión va incrementándose lentamente, la longitud del año trópico decrece unos 5.36 segundos cada 1000 años.

4.8.2- Año Sidéreo

Es el tiempo necesario para que la Tierra, en su movimiento de traslación (o el movimiento aparente del Sol sobre la eclíptica) recorra los 360 grados, es decir desde una estrella fija a una estrella fija de la esfera celeste.

Es el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de la Tierra por un mismo punto de su órbita.

$$\begin{aligned} \text{Un Año Sidéreo} &= 365.256363004 \text{ días sidéreos,} \\ &365.242190402 \text{ días solares medios } (365^{\text{d}} 05^{\text{h}} 48^{\text{m}} 45.25^{\text{s}}). \end{aligned}$$

4.8.3- Año Anomalístico

Es el tiempo entre dos tránsitos sucesivos de la Tierra por el perihelio (3 de Enero). La duración del año anomalístico es ligeramente mayor que el año sidéreo a causa de que la línea de los ápsides tiene un movimiento anual en sentido directo de 11.7 segundos de arco aproximadamente, lo que supone que al Sol le lleva 4.5 minutos más cada año entrar en conjunción con el perihelio

$$\text{Un Año Anomalístico} = 365,259635864 \text{ días medios } (365^{\text{d}} 06^{\text{h}} 13^{\text{m}} 52^{\text{s}}, J2000.0)$$

Nota 4.1

Se llama Período Juliano al intervalo de días y fracción (medio día de Greenwich) transcurrido desde el mediodía en Greenwich del día 1º de Enero del año 4713 antes de Cristo. El Día Juliano (JD) es el intervalo de tiempo en días y fracción transcurrido desde esa fecha.

Nota 4.2

En la bibliografía astronómica suelen encontrarse notaciones tales como “B1950.0” o “J2000.0”. Estas son dos maneras de indicar un tipo de año o época de referencia.

Décadas atrás existía el concepto de *Año Besseliano* y se indicaba con el prefijo “B”. Este es un año que comienza en el mismo instante para todo el mundo cuando la ascensión recta del Sol vale $18^h 40^m$ (aproximadamente el 1 de Enero). El comienzo del año Besseliano 1950 corresponde a la fecha juliana: $B1950.0 = JD 2433282.523$

En 1984 debido a la proximidad del año 2000, se decidió la utilización del equinoccio del año 2000.0. El comienzo del año Juliano 2000 corresponde a la fecha juliana: $J2000.0 = JD 2451545.0$. Este valor simplifica notablemente los cálculos al tener menos cifras.

4.9- Escala de Tiempo Sidéreo

El *Tiempo Sidéreo local* (θ_l) es el ángulo horario del punto vernal. Un *día sidéreo* puede definirse entonces como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del punto vernal por el meridiano superior del lugar.

Debido a las enormes distancias estelares, podemos considerar a las estrellas fijas en la esfera celeste. Por el contrario, debido a la cercanía, el Sol y los planetas tienen diferentes velocidades aparentes respecto a la esfera celeste. Día a día vemos que sus posiciones van cambiando respecto a las constelaciones de fondo; así el Sol va recorriendo las constelaciones del Zodiaco en un año.

Un reloj basado en el movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra camina con diferente marcha respecto a otro reloj regulado en el movimiento estelar. Es por ello que el tiempo sidéreo y el tiempo solar (verdadero o medio) tienen diferentes escalas. Esto lo podemos observar de las siguientes tres figuras consecutivas, [Figura 4.9a].

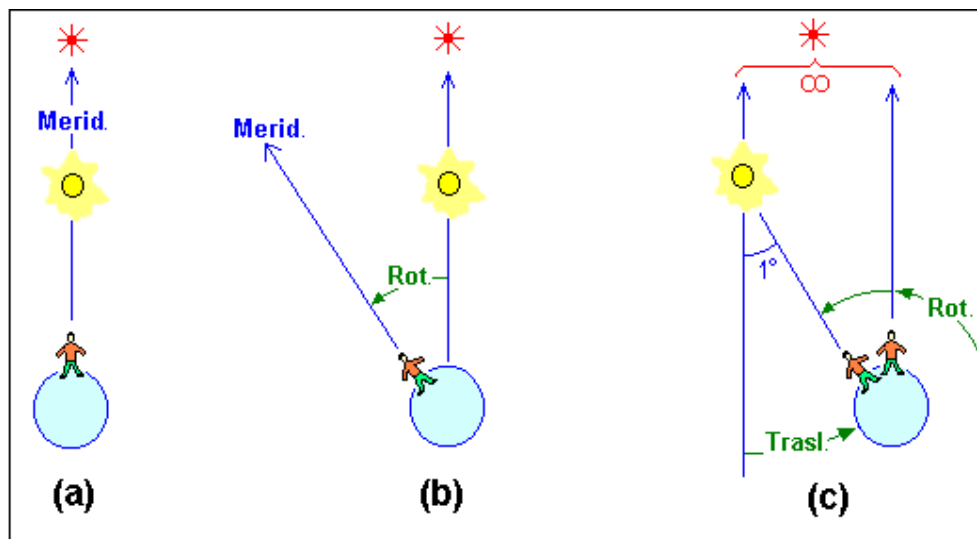


Figura 4.9a: Diferencia angular entre el tiempo sidéreo y el tiempo solar

- (a) Supongamos que estamos parados en algún punto de la Tierra. En un instante cualquiera, sobre nuestra cabeza (en el meridiano), se encuentran alineados el Sol y una estrella en el infinito (sus rayos pueden considerarse paralelos).
- (b) Un instante después la Tierra habrá girado un cierto ángulo, por lo que el Sol y la estrella se habrán separado del meridiano. Si existiera solamente rotación, al cabo de un giro completo, deberíamos a tener al Sol y la estrella alineados nuevamente sobre nuestra cabeza.
- (c) Pero, además del movimiento de rotación, la Tierra se traslada alrededor del Sol. Así que cuando la Tierra ha rotado también se ha desplazado sobre su órbita, por lo que el observador mira pasar primero a la estrella sobre el meridiano y un rato después al Sol. La Tierra tiene que rotar un poco más (casi 1°) para que el meridiano local coincida con la visual al Sol.

La diferencia angular debida a los movimientos aparentes del Sol y la estrella (o esfera celeste), da como resultado una diferencia temporal de casi cuatro minutos por día. Podemos decir que la esfera celeste gira más aprisa que el Sol, provocando que el tiempo sidéreo tenga una escala más rápida que el tiempo solar.

$$T \text{ medio} - T \text{ sidéreo} = 3^{\text{m}} 56^{\text{s}} \cdot 55536 \text{ por día}$$

$$1 \text{ Día Medio} = 24^{\text{h}} 03^{\text{m}} 56^{\text{s}} \cdot 55536 \text{ de tiempo sidéreo}$$

Esta pequeña diferencia se va acumulando día a día, de manera tal que al cabo de un año se acumula un día entero (365.242190 días solares = 366.242190 días sidéreos)

El *Tiempo Sidéreo Medio de Greenwich (GMST)* se denota con θ_g y está apoyado, por supuesto, en el meridiano superior de Greenwich. Como dijimos anteriormente, existe un *Tiempo Sidéreo de Greenwich* θ_0 , que ocurre cuando el Sol medio está en el meridiano inferior de Greenwich, o sea a las cero horas de tiempo de Greenwich (0^{h} TU), al comienzo del nuevo día.

Hay un único valor diario de θ_0 . Este valor lo puedo calcular o extraer de las efemérides y almanaques astronómicos. La siguiente expresión de Aoki permite calcular el Tiempo Sidéreo Medio de Greenwich a las 0^{h} de TU :

$$\theta_0 = 6^{\text{h}} 41^{\text{m}} 50^{\text{s}} \cdot 54841 + 8640184^{\text{s}} \cdot 812866 T + 0^{\text{s}} \cdot 093104 T^2 - 6^{\text{s}} \cdot 2 \times 10^{-6} T^3 \quad (7)$$

donde :

T = número de siglos julianos de 36525 días de TU transcurridos desde el mediodía (12^{h} TU) del 1° de Enero de 2000 (JD 2451545.0) .

Es decir : $T = (\text{JD} - 2451545.0) / 36525$

El tiempo sidéreo es una magnitud angular dependiente de la posición del punto vernal (equinoccio). Si consideramos el equinoccio verdadero se le denomina *Tiempo Sidéreo Aparente de Greenwich (GAST)*. En cambio cuando hablamos del equinoccio medio nos referimos al *Tiempo Sidéreo Medio*.

Se llama *Ecuación de los Equinoccios (EE)*, a la proyección de la nutación $\Delta\Psi$ sobre el ecuador. Es la oscilación del punto vernal sobre el ecuador en un ciclo de 18.6 años.

Cuando hablamos de tiempo sidéreo a secas hablamos de *tiempo sidéreo medio*, ya que no consideramos la nutación. Pero si la tenemos en cuenta, debemos definir lo que se llama *tiempo sidéreo aparente*. El tiempo sidéreo aparente se obtiene sumando al tiempo sidéreo medio la llamada *Ecuación de los Equinoccios (EE)*, [Figura 4.9b].

$$\theta_{aparente} = \theta_{medio} + \Delta\psi \cos \varepsilon \quad (8)$$

$$EE = \Delta\Psi \cos \varepsilon$$

En las efemérides utilizadas vienen tabulados los tiempos sidéreos aparente y medio y en algunos casos se incluye la ecuación de los equinoccios. Otra expresión para calcular la Ecuación de los Equinoccios en segundos de arco es la siguiente:

$$EE = 1/15 (\Delta\Psi \cos \varepsilon + 0''.00264 \text{ sen } \Omega + 0''.000063 \text{ sen } 2\Omega) \quad (9)$$

donde Ω es la Longitud Media del Nodo Ascendente de la Luna

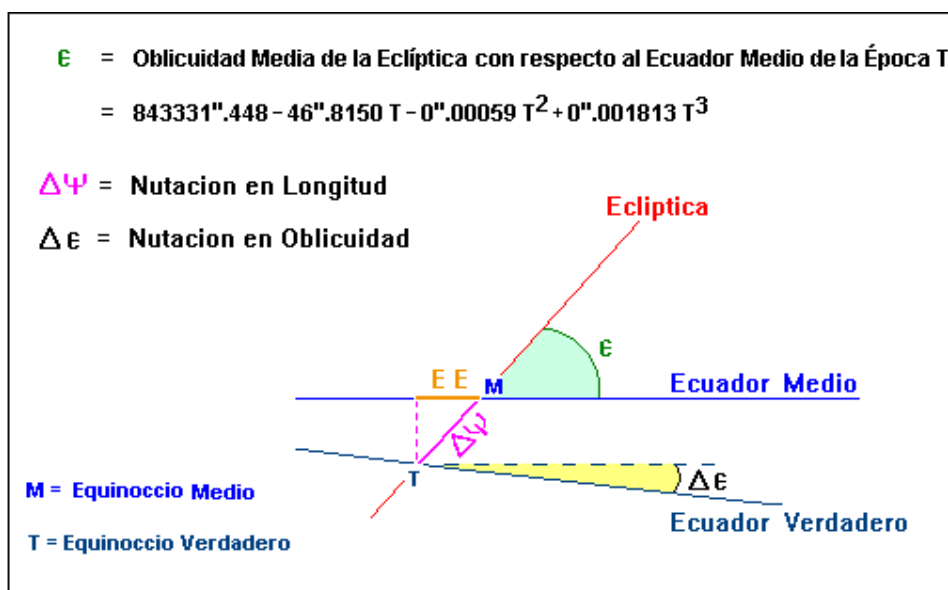


Figura 4.9b: Gráfico de la ecuación de los equinoccios

El *Ecuador Medio* se obtiene después de aplicar la precesión, es la intersección de la eclíptica de la fecha con el ecuador medio de la fecha. El *Equinoccio Verdadero* es la intersección de la eclíptica con el *Ecuador Verdadero* (instantáneo), es decir, el ecuador afectado por la nutación. No hay una eclíptica media porque la misma tiene un movimiento regular.

Los valores de $\Delta\varepsilon$ y $\Delta\Psi$ son funciones de series de senos y cosenos bastantes largas y complicadas (106 términos), que tienen a su vez dentro de los términos otras series que involucran la época T con la anomalía media de la Luna y el Sol, la longitud del nodo ascendente y la elongación de la Luna, etc. De todos modos sus valores vienen tabulados día a día en los almanaques astronómicos para las 0^h de TU, de manera que pueden ser interpolados para el instante de la época T.

4.10- Escalas de Tiempo Universal

Desde la más remota antigüedad, la medición del tiempo se ha basado en el movimiento de rotación terrestre, el cual fue por muchos años considerado uniforme. Algunas décadas atrás se descubrió que la rotación sufría pequeñas perturbaciones temporales y por lo tanto no era posible usarla como un patrón de tiempo invariante.

Las causas de las variaciones en la rotación de la Tierra son principalmente por:

- a) Una constante disminución secular de la velocidad de rotación debido a la fricción de las mareas contra el fondo marino. Esto produce un incremento en la duración del día de aproximadamente 4.5×10^{-8} segundos por día, alcanzando en un siglo 0.0016 segundos.
- b) Aceleraciones irregulares positivas y negativas, también llamadas fluctuaciones, debidas al desplazamiento de las masas en el interior de la Tierra imposibles de predecir. Este efecto provoca irregularidades del orden de algunos milisegundos por año (por ejemplo desde -0.001 hasta $+0.002$ segundos).
- c) Variaciones Estacionales causadas por los eventos meteorológicos (vegetación, acumulación de nieve, lluvia, vientos, etc.), de manera que producen desequilibrios entre los distintos hemisferios terrestres. Son alteraciones muy pequeñas que solo se pueden medir con relojes de alta precisión tales como los relojes atómicos.

En consecuencia la rotación de la tierra no es un fenómeno constante y por lo tanto no puede pretenderse como patrón de tiempo estable y preciso.

El *Tiempo Universal (TU)* –en inglés *Universal Time (UT)*- es aquél que involucra el movimiento medio diurno del Sol. Lo define la rotación de la Tierra y está en función del tiempo sidéreo a través de una fórmula matemática.

Hasta el año 2003, el *TU* se relacionaba con el tiempo sidéreo medio de Greenwich y se obtenía por observaciones del ángulo horario (movimiento diurno) de estrellas de ascensión recta (α) conocida (en la actualidad se observan radiofuentes). La relación entre el tiempo sidéreo (θ) y el tiempo universal (*TU*) es:

$$\theta_{(Tu)} = 2\pi (0.7790572732640 + 1.00273781191135448Tu) \quad (10)$$

donde $Tu = JD_{UT1} - 2451545.0$, JD_{UT1} es la fecha juliana del instante t en *UT1* y 2451545.0 es la fecha juliana del 01/01/2000 a las 12 horas *UT1*.

El conocido coeficiente “ $B = 1.00273781191135448$ ” puede usarse ahora directamente para transformar un intervalo de tiempo *UT1* en un intervalo de tiempo sidéreo.

La relación (10) dada para $\theta_{(UT)}$ ha sido deducida de la siguiente expresión convencional del *GMST (Greenwich Mean Sideral Time)* a 0^h *UT* de 1982:

$$GMST = 24110^S.54841 + 8640184^S.12866 Tu + 0^S.093104 Tu^2 - 6^S.2 \times 10^{-06} Tu^3 \quad (11)$$

donde $Tu = (JD - 2451545.0)/36525$.

Así, el *TU* se determina mediante observaciones de los movimientos diurnos de las estrellas. El *TU* definido por la rotación de la Tierra nos permite conocer la posición de un meridiano local respecto a un meridiano origen. En este sentido el *TU* puede ser identificado con el Tiempo Medio de Greenwich.

Nota 4.3

La expresión (11) se modificó para hacerla compatible con la teoría de Precesión-Nutación IAU 2000.0 . Esta fórmula estaba basada en la de Newcomb de la ascensión recta del Sol ficticio medio con las constantes UAI 1976. La misma estaba asociada con el uso de catálogos de estrellas y el UT1 se determinaba indirectamente por observaciones de estrellas. Desde el año 2003 se la perfeccionó añadiéndole términos complementarios para hacerla consistente con la precisión del VLBI.

La nueva definición del $\theta_{(UT)}$ está asociada a las técnicas modernas, principalmente con observaciones VLBI y con el ICRS realizado con radiofuentes extragalácticas. En este caso se necesita una nueva definición del GST cuya expresión tiene en cuenta la desviación del equinoccio medio J2000.0 respecto del origen “ Σ ” en el ICRS.

La expresión moderna para la Ecuación de los Equinoccios es la siguiente:

$$EE = \Delta\psi \cos \varepsilon + \text{términos complementarios}$$

Con los términos complementarios se obtiene una precisión del orden de los micro-segundos de arco.

Se distinguen tres clases de TU:

- i) **Tiempo Universal Cero (TU0):** es el resultado en bruto de las observaciones astronómicas. Está basado en la rotación de la Tierra sin ninguna corrección aplicada.
- ii) **Tiempo Universal Uno (TU1):** es el TU0 teniendo en cuenta la corrección por movimiento del Polo. Cuando se habla de TU sin ningún dígito (cero, uno o dos), se supone TU1.

$$TU1 = TU0 + \text{Corrección Movimiento del Polo}$$

$$TU1 - TU0 = -(\mathbf{x} \text{ sen } \lambda + \mathbf{y} \text{ cos } \lambda) \tan \phi / 15$$

donde:

φ, λ : latitud y longitud astronómicas adoptadas

x, y : coordenadas del polo instantáneo de rotación de la Tierra

iii) **Tiempo Universal Dos (TU2)**: es el *TUI* corregido periódicamente por el efecto de la Variación Estacional mediante correcciones empíricas. Su uso actualmente a prácticamente desaparecido.

$$UT2 = UT1 + \text{Corrección Variación Estacional}$$

$$UT2 = UT1 = +0^s.0220 \text{ sen } 2\pi t - 0^s.0120 \text{ cos } 2\pi t - 0^s.0060 \text{ sen } 4\pi t + 0^s.0070 \text{ cos } 4\pi t$$

donde t es la fracción del año.

Nota 4.4

El organismo internacional denominado *Bureau International de l'Heure (BIH)* en París, fue el encargado de las diferentes medidas del tiempo universal y del mantenimiento de las escalas de tiempo. Desde 1987 la responsabilidad de los patrones de tiempo está en manos del *Bureau of Weights and Measures (BIPM)* y la rotación de la Tierra al *International Earth Rotation and Reference Systems (IERS)*.

El IERS publica en su página información, notas técnicas, reportes y boletines que proveen toda la información referente a la rotación de la Tierra y los sistemas de referencia.

Los boletines emitidos son los siguientes:

- Boletín A: contiene rápidas determinaciones de los parámetros de orientación de la Tierra.
- Boletín B: contiene los parámetros mensuales de orientación de la Tierra.
- Boletín C: contiene anuncios de los segundos intercalados de UTC.
- Boletín D: contiene anuncios de los valores de DUT1.

4.11- Hora Civil Local (HCL)

Un día medio (de 86400 segundos medios de duración) comienza cuando el Sol medio se encuentra en el meridiano inferior del lugar.

La *Hora Civil Local (HCL)* está ligada al tiempo medio astronómico (o ángulo horario medio) mediante:

$$HCL = Hm + 12h$$

donde:

$$Hm = Tm, \text{ es el ángulo horario del Sol medio o Tiempo medio}$$

La aplicación de la Hora Civil Local adolece de una gran dificultad ya que se refiere a un lugar determinado con su propio meridiano. Si el observador se mueve en la dirección Este-Oeste cambia de meridiano y, en consecuencia, la hora.

Los países o regiones de un país tienen diferentes tiempos según sus meridianos locales; o sea, según sus diferentes longitudes astronómicas (o geográficas).

4.12- Hora Oficial. Hora Oficial Argentina

Debido a la impracticabilidad de la HCL, en cada país se decidió que regiría una hora denominada *Hora Oficial*, correspondiente generalmente al meridiano central. Así, en Inglaterra la Hora Oficial es la concerniente al meridiano de Greenwich y en la Argentina durante mucho tiempo fue la correspondiente al meridiano de Córdoba.

La decisión del meridiano de referencia de cada país es de tipo político, al igual que el sistema de adoptar más de una hora de acuerdo a la extensión Este-Oeste del territorio o según las estaciones. Por ejemplo, los EEUU posee cuatro horas distintas a lo ancho de su territorio que además en verano adelantan una hora. Por el contrario en China, a pesar de lo extenso del país se conserva la misma hora oficial.

Para reducir al mínimo los problemas que implica la diferencia de hora entre dos puntos de distinta longitud geográfica (λ), por sugerencia de Sandford Fleming en el año 1884 se dividió a la Tierra en veinticuatro husos horarios iguales de quince grados cada uno. En cada huso rige la hora propia aportada por el meridiano central del mismo, [Figura 4.12a].

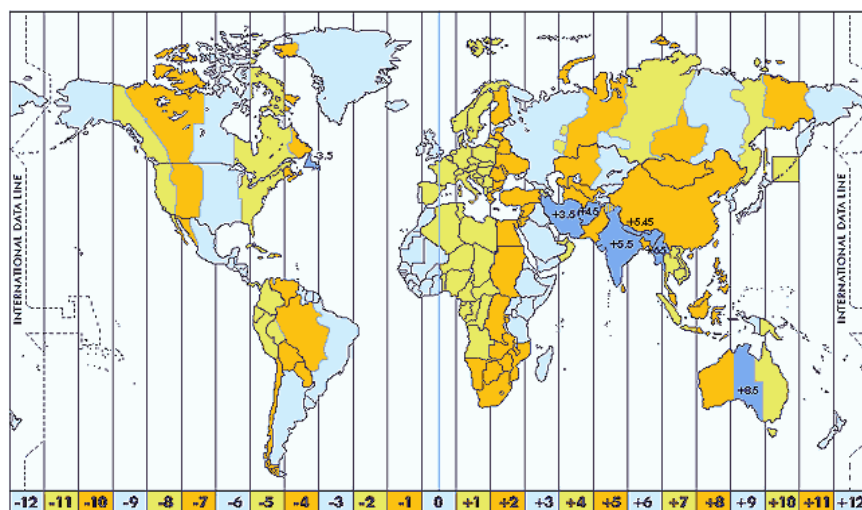


Figura 4.12 a: Husos horarios de todo el mundo

La primera faja es aquella cuyo meridiano central pasa por Greenwich. La Argentina se adhirió al sistema internacional de husos horarios el 01/05/1920, correspondiéndole el meridiano de 60° al oeste de Greenwich (4 horas al Oeste) y por lo tanto la *Hora Oficial Argentina (HOA)* debería ser cuatro horas menor que en Inglaterra. Sin embargo, en la actualidad, el gobierno nacional adopta la faja de 45° (tercer huso) al oeste de Greenwich, por lo que la hora de nuestro país tiene tres horas de diferencia con la hora de Greenwich.

Veremos más adelante que las escalas de tiempo astronómicas basadas en el movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra, es decir en la rotación terrestre, carecen de la precisión que se requiere en la actualidad. Desde hace algunas décadas la hora oficial es una escala de tiempo atómica definida en términos de la física, sin participación de la dinámica astronómica pero manteniendo aún una estrecha relación con la astronomía.

4.13- Transformaciones de Tiempo

Con la ayuda del siguiente gráfico, [Figura 4.13a], podemos visualizar fácilmente las transformaciones entre los tiempos hasta ahora vistos.

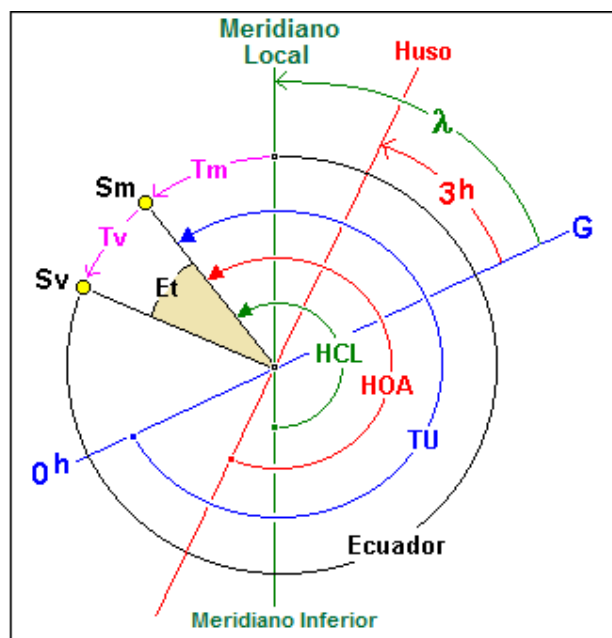


Figura 4.13a: Relación entre las escalas de tiempo

Sea el círculo del ecuador y sobre él trazamos el meridiano local, el meridiano de Greenwich (G) y el huso horario de 3 horas al oeste de Greenwich (G). La longitud geográfica (λ) de nuestra ubicación es el ángulo diedro entre el plano del meridiano G y el plano del meridiano local. En algún instante cualquiera medimos la posición del Sol verdadero (Sv) mediante su ángulo horario (H_v) que corresponde al tiempo verdadero (T_v). A partir de ese valor de H_v , aplicamos la ecuación del tiempo (E_t) y encontramos la posición del imaginario Sol medio mediante su ángulo horario (H_m) correspondiente al tiempo medio (T_m).

Definimos :

Tiempo Universal (TU): al ángulo apoyado en el meridiano inferior de Greenwich, hasta la posición del Sm.

Hora Oficial Argentina (HOA): está apoyada en el meridiano inferior correspondiente al huso de 3 horas al oeste de Greenwich, hasta la posición del Sm.

Hora Civil Local (HCL): está apoyada en el meridiano inferior del lugar, hasta la posición del Sm.

De acuerdo a la [Figura 1.13a] podemos deducir los siguientes algoritmos para realizar las transformaciones de tiempo:

Hv = Tv	TU
-	-
Et	Huso 3h
-----	-----
Hm = Tm	HOA
+	-
12 h	$\lambda - \text{Huso}$
-----	-----
HCL	HCL
+	-
$\lambda - \text{Huso}$	12 h
-----	-----
HOA	Tm = Hm
+	+
Huso 3 h	Et
-----	-----
TU	Tv = Hv

Ejemplo 1

Mediante el telescopio ecuatorial del Oafa se hizo una observación del Sol el día 01/08/2008. El círculo graduado ecuatorial marcó 310°. ¿A qué TU aproximadamente fue realizada dicha observación?

Datos:

Fecha =	01/08/2008
Hv =	310° = -3 ^h 20 ^m 00 ^s
λ =	4 ^h 34 ^m 29 ^s
Huso =	3 ^h
$\lambda - \text{Huso} =$	1 ^h 34 ^m 29 ^s

De las efemérides extraigo más datos:

$$\theta_o = 20^h 38^m 40^S$$

$$\alpha_v = 8^h 45^m 01^S$$

La Et la puedo consultar de las efemérides o calcularla por la expresión (6):

$$Et_{01/08/08} = (20^h 38^m 40^S - 12^h) - 8^h 45^m 01^S = -6^m 21^S$$

Aplicando el algoritmo de cálculo:

Hv	-3 ^h 20 ^m 00 ^S
-	-
Et	-6 ^m 21 ^S
-----	-----
Hm	-3 ^h 13 ^m 39 ^S
+	+
12 ^h	12 ^h
-----	-----
HCL	8 ^h 46 ^m 21 ^S
+	+
λ - Huso	1 ^h 34 ^m 29 ^S
-----	-----
HOA	10 ^h 20 ^m 50 ^S
+	+
Huso	3 ^h
-----	-----
TU	13 ^h 20 ^m 50 ^S

Pero hay un problema, la Et que calculé es para las 0^h de TU del día 01/08/2008, es decir, para el comienzo del día, y la que necesito es para otro momento del día.

Así, el valor encontrado de TU = 13^h 20^m 50^S es solo una aproximación y deberé recalcularlo con la apropiada Et. Entonces, debo calcular la Et para el siguiente día e interpolarla para el momento de la observación.

Datos 02/08/2008 : $\theta_o = 20^h 42^m 37^S$

$$\alpha_v = 8^h 48^m 53^S$$

$$Et_{02/08/08} = (20^h 42^m 37^S - 12^h) - 8^h 48^m 53^S = -6^m 16^S$$

$$1 \text{ día} \left| \begin{array}{l} \text{Et}_{01/08/08} -6^m 21^S \\ \text{Et}_{02/08/08} -6^m 16^S \end{array} \right| \text{Diferencia} = 05^S$$

El momento de la observación es TU = $13^h 20^m 50^S / 24 = 0^d.556$

Si para : $1^d \dots\dots\dots 05^S$
 $0^d.556 \dots\dots\dots X = (0^d.556 \times 05^S) / 1^d = 03^S$

$$\text{Et}_{01/08/08} + 03^S = -6^m 18^S \text{ (Et}_{01/08/08} \text{ a las } 0^d.556)$$

Recalculando:

Hv		-3 ^h 20 ^m 00 ^S
-	-	
Et		-6 ^m 18 ^S

Hm		-3 ^h 13 ^m 42 ^S
+	+	
12 ^h		12 ^h

HCL		8 ^h 46 ^m 18 ^S
+	+	
λ - Huso		1 ^h 34 ^m 29 ^S

HOA		10 ^h 20 ^m 47 ^S
+	+	
Huso		3 ^h

TU		13 ^h 20 ^m 47 ^S

Finalmente, la observación se realizó a las **HOA = 10^h 20^m 47^S** , **TU = 13^h 20^m 47^S**

Ejemplo 2

¿Cuál es el ángulo horario del Sol a las 17^h 20^m 15^S del 01/08/01 en el Oafa?

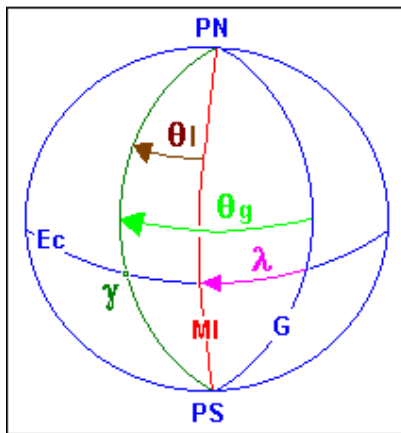
- Datos : Fecha = 01/08/01
 HOA = 17^h 20^m 15^S
 λ = 4^h 34^m 29^S
 Et = -6^m 20^S
 Huso = 3^h

HOA	17 ^h 20 ^m 15 ^S
- λ – Huso	- 1 ^h 34 ^m 29 ^S
-----	-----
HCL	15 ^h 45 ^m 46 ^S
- 12 ^h	- 12 ^h
-----	-----
Tm = Hm	3 ^h 45 ^m 46 ^S
+ Et	+ -6 ^m 20 ^S
-----	-----
Tv = Hv	3 ^h 39 ^m 26 ^S

Como la observación es al atardecer, es lógico que el resultado sea Hv (+) .

Transformaciones entre Tiempos Medios y Sidéreos

Veamos ahora el pasaje entre tiempos medios y sidéreos. Para ello, en la [Figura 4.13b] del globo terrestre dibujamos el ecuador sobre el que se miden la longitud



geográfica (λ), los tiempos, el meridiano del lugar (MI), el meridiano de Greenwich (G) y el meridiano que pasa por el punto vernal (γ) donde quiera que esté.

El ángulo horario del punto vernal contado desde G es el *tiempo sidéreo de Greenwich* (θ_g). El ángulo horario del punto vernal desde nuestra posición es el *tiempo sidéreo local* (θ_l).

Figura 4.13b: Tiempos sidéreos

Ya vimos que el parámetro θ_0 llamado *tiempo sidéreo de Greenwich* a θ^h de TU se extrae de las efemérides y es siempre un dato disponible. Por otro lado se conoce que la diferencia entre tiempo medio y sidéreo es de 3^m 56^S.55536 por día. Para realizar las transformaciones entre estos tiempos deberá calcular las equivalencias mediante una regla de tres simple o aplicar la siguiente corrección:

$$\text{Corrección} = 24^h 03^m 56^s.55536 / 24 = 1.002737909351$$

Para pasar de tiempo medio a sidéreo, la corrección se aplica multiplicando. En el caso inverso habrá que dividir.

El valor $\theta_g - \theta_o$ relacionado con la citada corrección recibe el nombre de *intervalo sidéreo*:

$$\text{TU} * \text{Corrección} = \theta_g - \theta_o$$

$$(\theta_g - \theta_o) / \text{Corrección} = \text{TU}$$

El algoritmo a emplear es:

	TU		θ_l
*		+	
	1.002737909351		λ
	-----		-----
	$\theta_g - \theta_o$		θ_g
+		-	
	θ_o		θ_o
	-----		-----
	θ_g		$\theta_g - \theta_o$
-		/	
	λ		1.002737909351
	-----		-----
	θ_l		TU

Ejemplo 3

¿A qué tiempo sidéreo local fue realizada la observación del Ejemplo 1?

<u>Datos</u> : TU = 13 ^h 20 ^m 47 ^S		
θ _o = 20 ^h 38 ^m 40 ^S	*	13 ^h 20 ^m 47 ^S
λ = 4 ^h 34 ^m 29 ^S	*	1.002737909351
	-----	-----
	θ _g – θ _o	13 ^h 22 ^m 59 ^S
+	θ _o	20 ^h 38 ^m 40 ^S
	-----	-----
	θ _g	34 ^h 01 ^m 39 ^S
-	24	-----
	λ	4 ^h 34 ^m 29 ^S
	-----	-----
	θ_I	5^h 27^m 10^S

Ejemplo 4

¿Qué HOA es en el momento en que un reloj sidéreo marca las 14^h 01^m 32^S del día 22/09/01 ?

Datos : λ = 4^h 34^m 29^S
 θ_I = 14^h 01^m 32^S
 θ_o = 00^h 03^m 41^S

	θ _I	14 ^h 01 ^m 32 ^S
+	λ	4 ^h 34 ^m 29 ^S
	-----	-----
	θ _g	18 ^h 36 ^m 01 ^S
-	θ _o	00 ^h 03 ^m 41 ^S
	-----	-----
	θ _g – θ _o	18 ^h 32 ^m 20 ^S
/	Corrección	1.002737909351
	-----	-----
	TU	15^h 29^m 18^S

Nota 4.5:

Al hacer transformaciones entre tiempos medio y sidéreo usamos siempre el valor de θ_0 a las 0^h de TU. Pero las 0^h de TU de Greenwich ocurren para HOA = 21^h , es decir 3 horas menos. Por lo tanto hay que tener cuidado al realizar las transformaciones, porque si la HOA es mayor que 21^h , significa que en Greenwich ya comenzó un día nuevo y en consecuencia necesitaré emplear el dato θ_0 del día posterior.

4.14- Tiempo de Efemérides (TE)

A causa de las variaciones que experimenta la rotación de la Tierra, el tiempo medio deja de tener las condiciones de uniformidad e invariabilidad que requiere un patrón de tiempo. A la definición del “segundo de tiempo” como $1/86400$ partes de un día solar medio, no se le puede exigir mucha precisión ya que, a causa de las irregularidades de la rotación terrestre, son todos los días de diferente duración (pueden variar décimas de milisegundos o milisegundos).

Fue necesario en 1952 establecer otro patrón de tiempo astronómico independiente de la rotación, y ese fue el *Segundo de Tiempo de Efemérides (TE)* que vale:

$$1 / 31\,556\,925.9747 \text{ partes del año trópico en Enero 0 de 1900 a las } 12^h \text{ TE}$$

El TE es una medida uniforme que depende para su determinación de las leyes dinámicas del movimiento orbital de la Tierra, la Luna y de los planetas, es decir que es una escala basada en la traslación de la Tierra alrededor del Sol.

La unidad primaria del TE es el año trópico a la época fundamental Enero 0 de 1900 a las 12^h de TE, en el momento en que la longitud eclíptica del Sol, corregida por aberración, era $L = 279^\circ 41' 48''.04$ dada por la teoría de Newcomb del Sol.

El TE fue determinado según las teorías dinámicas y las constantes de movimiento. Cualquier incertidumbre en estos valores conducen a diferencias entre los valores medidos de las observaciones. Además, en aquella época no se tenían en cuenta los efectos relativistas del tiempo debido a las grandes masas y al movimiento.

Como el segundo de tiempo medio y el segundo de tiempo de efemérides tienen diferente longitud (el segundo medio es algo mayor que el segundo de efemérides), esta pequeña diferencia se va acumulando hasta alcanzar aproximadamente 1 segundo al cabo de un año, [Figura 4.14a].

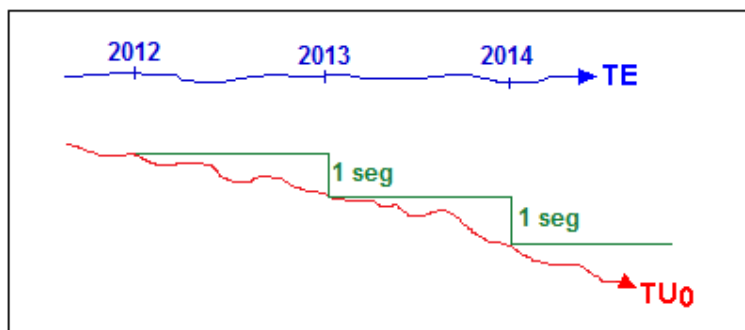


Figura 4.14a: Diferencia de escala de 1 segundo entre el TE y el tiempo medio TU0. Nótese que ambas escalas poseen trazos no lineales debido a las irregularidades del movimiento de rotación y traslación de la Tierra

Graficando estas escalas vemos que no son uniformes, más aún el TU0 porque la rotación de la Tierra es bastante irregular. La diferencia de escalas es de aproximadamente 1 segundo por año, es decir que dos relojes andando en TU y TE que parten al mismo instante, al cabo de un año el reloj de TU atrasa alrededor de 1 segundo.

En los años 1960, debido a las irregularidades de la rotación terrestre, se hizo insostenible la utilización de la escala de tiempo medio TU. A fin que la astronomía no perdiera la hegemonía del manejo del patrón de tiempo, se implementó el uso de la escala de TE, algo más precisa que el TU pero muchísima más difícil de acceder y sumamente complicada de entender para el común de la gente. El TE duró muy pocos años y, debido a que era también una escala irregular, se abandonó finalmente en beneficio de un patrón físico invariante.

4.15- Tiempos Atómicos

En 1955 comenzaron a disponerse de relojes atómicos basados en la resonancia magnética de átomos de cuarzo, rubidio y cesio. Al someterse un cristal de aquellos elementos a un campo eléctrico vibra uniformemente, dando posibilidad de utilizarlo como patrón de tiempo.

Habiendo la tecnología encontrado una base de tiempo muy regular, se abandonó la definición de un patrón de tiempo “astronómico” y se adoptó la definición de un patrón de tiempo “físico”, mas preciso, estable y reproducible. Nació así el Tiempo Atómico.

Tiempo Atómico Internacional (TAI)

En 1967 se adoptó una definición basada en un proceso físico observable y reproducible. La unidad de tiempo del *Sistema Internacional (SI)*. Se definió al *Tiempo Atómico* como:

La duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del átomo de Cesio 133

Esta duración se hizo coincidir deliberadamente con la definición del segundo de TE para el año 1900, de manera de no perder vinculación y proveer continuamente TE para sus usuarios.

En 1971 el Bureau International de l’Heure (BIH) en París, adoptó esta escala de tiempo para todo el mundo y la denominó *Tiempo Atómico Internacional (TAI)*.

La unidad de tiempo no descansa en un solo reloj atómico patrón, sino que está basado en un promedio de las lecturas de unos 300 relojes atómicos que funcionan en institutos de todo el mundo, conforme a la definición del segundo dado por el SI.

La precisión (capacidad para reproducir el segundo de SI) y estabilidad de frecuencia (capacidad de mantener una marcha uniforme) de los relojes atómicos, permiten mantener el tiempo con variaciones del orden de 1×10^{-12} segundos por día e inclusive 1×10^{-14} segundos por día con los más precisos máseres de hidrógeno.

En 1985 la International Astronomical Union (IAU) transfirió la responsabilidad del TAI desde BIH al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Además, el IERS es la institución encargada de relacionar el TAI con el TU, a través de la determinación de las coordenadas del polo, el DUT1 y el TUC.

Tiempo Universal Coordinado (TUC)

Para hacer que el TAI sea accesible a los físicos, astrónomos, navegantes, geodestas e ingenieros de todo el mundo, se creó una escala de tiempo atómico llamada *Tiempo Universal Coordinado (TUC)*, que tiene la particularidad de incluir saltos anuales de 1 segundo, de manera de mantener una correspondencia con la rotación de la Tierra, es decir con el TU1. La diferencia entre el TU1 y TUC se denomina *DUT1*, [Figura 4.15a].

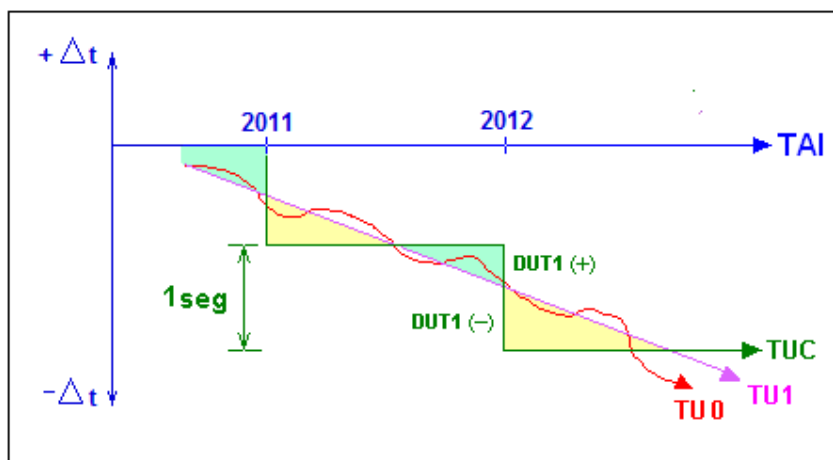


Figura 4.15a: Relación entre el TUC y el TU ($DUT1 = TU1 - TUC$)

Cuando el valor absoluto del DUT1 se torna cercano o igual que *0.9 segundos*, es necesario insertar un salto artificial de 1 segundo entero al sistema TUC. Ello lo realiza el IERS mediante avisos anticipados el 30 de Junio o, más probablemente en el último segundo del 31 de Diciembre de todos los años.

Debido a los saltos de 1 segundo, el TUC suele quedar por encima o por debajo del TU1, por lo que el valor del DUT1 puede ser positivo o negativo.

La escala TUC es una escala atómica, por lo tanto invariante e insensible a la rotación terrestre. Mantiene a través del DUT1 un compromiso con el TU, pero puede suceder que, debido a lo impredecible de la rotación terrestre, algún año no haga falta agregar el segundo intercalado. Eso es decisión del IERS que lo comunica anticipadamente en sus boletines.

El segundo intercalado en las fechas establecidas se agrega siguiendo la siguiente secuencia: ...57, 58, 59, 60, 00, 01, 02 ...

El TUC también es accesible en todo el mundo en cualquier momento, a través de los “tops” de señales radiales horarias emitidas por diversas emisoras tales como la LOL del Servicio Naval Argentino en 5 MHz y 10 MHz o la WWV de USA que transmite las 24 horas en 15 MHz y 20 MHz. El DUT1 es un dato disponible en las señales horarias, ya que viene indicado mediante dobles tops. Estos dobles tops ocurren antes del segundo N° 10, si el DUT1 es positivo, o después del segundo N° 10, si el DUT1 es negativo; y la cantidad de dobles tops indica el valor del DUT1 en décimas de segundo.

El TUC, con ayuda de los diferentes husos horarios, rige la Hora Oficial de todos los países del mundo.

Entonces la hora que portamos en relojes de muñeca, de pared, que escuchamos en la radio o vemos en la televisión es la escala atómica de Tiempo Universal Coordinado (en la Argentina bajo el huso de 3^h), y no depende de los caprichos de la rotación de la Tierra como el TU. Sin embargo, hasta el momento, sigue relacionada con la astronomía (mediante los saltos de un segundo y el DUT1), porque es el movimiento aparente del Sol, en definitiva, el que determinamos con las observaciones y el que regula la vida del hombre.

En los ejemplos de transformación de tiempos vistos anteriormente hacíamos que: $HOA + Huso = TU$, pero de esta manera estamos mezclando tiempo atómico con tiempo medio sin tener en cuenta la relación entre ellos ($DUT1 = TUI - TUC$). Por lo tanto estábamos cometiendo un error que puede llegar a valer ± 0.9 segundos. En cálculos aproximados para calajes de estrellas esta una cantidad despreciable, pero si buscamos precisión debemos tener en cuenta el DUT1 de la fecha. En consecuencia la expresión correcta es la siguiente: $HOA + Huso \pm DUT1 = TU$.

Tiempo Terrestre (TT)

Anteriormente llamado *Tiempo Dinámico Terrestre (TDT)*, es el tiempo atómico dado por un reloj funcionando sobre la superficie del Geoide.

Es un tiempo atómico definido con una unidad de: *un día de 86400 segundos atómicos de SI*, al nivel medio del mar.

Los distintos lugares de la Tierra poseen diferentes potenciales gravitacionales de acuerdo a la forma del geoide y la altura sobre el mismo. De acuerdo al potencial gravitacional y según la Teoría General de la Relatividad, los relojes atómicos pueden diferir en cantidades muy pequeñas, del orden de 1×10^{-9} segundos.

El Tiempo Terrestre está relacionado con el TAI por una constante, de la siguiente manera:

$$TT = TAI + 32^S.184$$

La cantidad $32^S.184$ es debida a la variación original del TE.

Tiempo Baricéntrico (TB)

Anteriormente llamado *Tiempo Dinámico Baricéntrico (TDB)*, es el tiempo atómico propio del Baricentro del Sistema Solar; es decir sería el tiempo dado por un reloj funcionando en el baricentro del Sistema Solar.

Tiene la misma escala que el TT y difiere de este en factores relativistas del orden 1.5×10^{-8} . Esta diferencia es despreciable y solo se aplica en trabajos teóricos. El TB se obtiene del TT mediante una fórmula matemática que involucra términos lunares y planetarios:

$$TB = TT + 0^S.001658 \text{ sen } g + 0^S.000014 \text{ sen } 2g$$

donde:

$$g = \text{anomalía media de la órbita de la Tierra} = 2\pi(357^{\circ}.528 + 35999^{\circ}.050 T) / 360^{\circ}$$

$$T = \text{intervalo de TB medido en siglos julianos desde la época J2000}$$

Tiempo GPS

Es el tiempo usado en el sistema de posicionamiento satelitario *Global Positioning System (GPS)*. Es un tiempo atómico de acuerdo con la definición del segundo SI y lleva una diferencia constante de 19 segundos con el TAI, ya que cuando se inició fue coincidente con el TUC a la época Enero 06 de 1980.

$$TAI = TGPS + 19^S$$

Apéndice 1

Principios Generales de la Medición del Tiempo.

Conceptos

La definición de una escala de tiempo requiere primero seleccionar un proceso físico particular observable. Si no hay incertezas observables, una buena definición conduce a una única escala, cualquiera sea la precisión requerida. Diferentes conceptos o axiomas pueden derivar en distintas escalas de tiempo.

Los experimentos conforman estrictamente los requerimientos para una primaria realización de escalas de tiempo. Es necesario un acuerdo convencional sobre una simple realización, o una síntesis de varias realizaciones. Una correcta notación de la realización del tiempo es $T(xxx)$ donde (xxx) es un identificador de la medición o de la síntesis. Por ejemplo, el *Tiempo Universal Uno* es una escala de tiempo obtenida por el International Earth Rotation and Reference Systems Service y puede colocarse como $TUI(IERS)$.

El procedimiento para realizar una escala de tiempo consiste en asignar datos a eventos. Puede usarse un dispositivo llamado “reloj” o medir angularmente algún movimiento celeste aparente. Existen también escalas que resultan del cálculo y no están asociadas a ningún dispositivo real, tales como los promedios de TUI dados por el IERS o el Tiempo Atómico Internacional (TAI), que se asumen como la salida de un “reloj ficticio” caracterizado por seguridad, estabilidad y precisión, como si fuera un reloj real.

Escalas de Tiempo Integradas y Dinámicas

Hay dos caminos que se han usado para producir escalas de tiempo:

- (a) la adición de intervalos de tiempo estándar que conducen a una escala integrada de tiempo;
- (b) el uso de teorías dinámicas que conducen a escalas dinámicas de tiempo.

Escalas de Tiempo Integradas

Consideramos dos estados bien identificados de un proceso físico y concebimos que la duración entre estos dos estados permanezca sin cambios cuando los procesos físicos se repiten en las mismas condiciones y que nos provean con un estándar de tiempo. Para obtener una escala de tiempo, la duración estándar puede ser indefinidamente agregada sin tiempo muerto, obteniendo de esta manera una escala de tiempo integrada. Un ejemplo de esta escala es el TAI.

Un defecto de este tipo de escalas es que la indefinida adición de duraciones estándar hace libre la elección de un origen y por lo tanto no se puede tener una ideal definición del origen. Además, como los errores en la duración de estándares se agregan también indefinidamente, la integración realizada de la escala de tiempo diverge indefinidamente de la escala ideal. La integración genera derivas en las escalas de tiempo y fluctuaciones de largo período.

Escalas de Tiempo Dinámicas

Una teoría dinámica es un modelo matemático que representa y predice las configuraciones sucesivas de un sistema material como una función de un parámetro de tiempo t . Este parámetro debe ser único para las distintas configuraciones del sistema. A este parámetro t lo llamamos *Tiempo Dinámico*.

Un ejemplo de escala de tiempo dinámica puede ser alguna que obedezca la ley de inercia de la mecánica clásica donde se establece que *si una partícula está lejos y no influenciada de las demás partículas del Universo, se moverá con una velocidad constante respecto de un marco inercia*".

Esta ley establece una relación lineal entre las coordenadas espaciales y el parámetro t en un marco inercial y provee la manera de medir el tiempo dinámico mediante la medida del desplazamiento de una estrella por su movimiento propio.

Para alguna escala de tiempo dinámica en particular, las fases de definición son como las siguientes:

- (1) La elección de la teoría (mecánica newtoniana, Teoría General de la Relatividad, etc.)
- (2) La elección de un sistema físico en el cual se aplica la teoría.
- (3) El análisis de las interacciones en el sistema.

- (4) La aplicación de la teoría matemática y la introducción de condiciones iniciales observadas, las cuales conducen a las “Efemérides”.

Las efemérides dan la configuración observable del sistema (o coordenadas espaciales) como una función del tiempo dinámico implicado en la teoría. La realización de la escala de tiempo dinámica consiste en observar en algún instante la configuración del sistema y las efemérides dan, para ese instante, la lectura de la escala de tiempo dinámico correspondiente.

Hay muchas fuentes de errores: imperfección en la teoría, conocimiento incompleto de las acciones, truncamiento de integraciones, errores en las condiciones iniciales, etc. No obstante, cuando se adopta la definición, el error en la realización de una escala de tiempo depende solo del error de la medida dimensional. Esta es limitada y los logros técnicos la mejoran.

Apéndice 2

Los Tiempos de Modelos Dinámicos

El Tiempo Solar Medio y el Tiempo Universal

Origen Histórico

La duración del día y el año medio fueron considerados a priori como duración estándar, y las escalas de tiempo asociadas, tiempo solar verdadero y medio, habrían sido como escalas de tiempo integradas.

La aplicación por Euler, en 1736, de los principios de la mecánica de Newton a la rotación terrestre que conferían la invariabilidad de la velocidad de rotación, implicaron que el tiempo solar medio tuviera el carácter de tiempo dinámico. El segundo se definió como $1/86400$ partes del día solar medio y se tomó como estándar.

En 1895 el astrónomo y matemático canadiense naturalizado en los EEUU, Simon Newcomb, dio una definición del tiempo solar medio proporcional a la rotación de la Tierra con respecto a un sistema inercial. Se nombró un *Sol medio ficticio* sobre el ecuador y el tiempo medio se representaba por su ángulo horario. El tiempo solar medio de Greenwich (GMT) antes de 1925 comenzaba su día al medio día; pero la Unión Astronómica Internacional (UAI) en 1925 estableció que el día estaría avanzado 12 horas.

La designación de esta nueva escala de tiempo fue *Tiempo Universal (TU)* y tuvo una lenta aceptación en los científicos. Las dificultades en el modelado de las perturbaciones geofísicas de la rotación de la Tierra hacen que el TU no sea una buena forma de tiempo dinámico.

Formas del TU

La medición del TU requiere el conocimiento de las *coordenadas del polo* (x,y) de rotación en un marco terrestre. Cuando el TU se refiere a estas coordenadas variables, se designa como TU1.

La forma obtenida de las observaciones sin tener en cuenta las coordenadas del polo se denomina TU0

$$TUI - TU0 = -(x \operatorname{sen} \lambda + y \operatorname{cos} \lambda) \operatorname{tg} \varphi / 15$$

Esta última expresión puede llegar a alcanzar cerca de 20 milisegundos a latitudes medias. En el Observatorio Astronómico “Félix Aguilar” de San Juan, se han calculado mediante observaciones estelares con el Astrolabio Fotoeléctrico PAII, valores cercanos a los ± 10 milisegundos de variación diaria.

Una forma regularizada del TU1 es el llamado TU2 que es corregido convencionalmente por la variación estacional, la cual tiene de pico a pico una amplitud de 60 milisegundos. TUIR es el TU1 corregido por los efectos de los términos de corto período (mas de 35 días) debido a las mareas zonales; la corrección puede alcanzar ± 3 milisegundos.

Disponibilidad del TU

Cuando las señales radiales de tiempo comenzaron en el siglo 20, fueron diseminando el tiempo civil de Greenwich (aquí llamado TU o TU1).

La necesidad de acordar una simple realización del TU condujo a la creación del Bureau International de l’Heure (BIH) en París. En 1931 la referencia del BIH aparecía basada en el promedio de las medidas astronómicas de TU bajo el nombre de *Hora Definitiva* que fue mas tarde designada como *TU(BIH)* o *TU1(BIH)*.

Otras realizaciones del TU por promedios fueron editadas por el International Polar Motion Service (IPMS). Después de 1988 la tarea de evaluar el TU1 fue dada a un nuevo servicio, el International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) que funciona en París y reemplazó al BIH y al IPMS.

Abandono del TU como patrón de tiempo

En 1677 el astrónomo británico John Flamsteed no pudo encontrar ninguna variación de la duración del día medio, mediante el empleo de un reloj de péndulo. El dogma de la rotación terrestre uniforme resistió también las primeras contradicciones científicas. En 1864 Ferrel y en 1865 Delaunay, explicaron las discrepancias entre las efemérides lunares y las observaciones del alargamiento de los días.

Finalmente el trabajo de Newcomb, durante la primera mitad del siglo 20 y Brown, Sitter, Spencer Jones y Stoyko revelaron, sin duda, usando movimientos orbitales y relojes artificiales, las principales componentes de las irregularidades de la rotación de la Tierra y condujeron a medir el tiempo basado en el movimiento orbital de la Tierra llamado *Tiempo de Efemérides (TE)*.

La definición del segundo como una fracción $1/86400$ del día solar medio se abandonó en 1960.

Tiempo de Efemérides

El *Tiempo de Efemérides (TE)* es un tiempo dinámico en la mecánica Newtoniana. La teoría se aplica al movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol que es observable como el movimiento angular del Sol en el marco de referencia celeste. El TE es así definido por la adopción convencional de efemérides del Sol que se derivan de expresiones numéricas de las posiciones del Sol en el sistema de referencia convencional (ecuación de definición).

La ecuación de definición es una expresión numérica de la longitud media geocéntrica (L_0) del Sol dada por Newcomb y adoptada por la IAU en 1952.

$$L_0 = 279^\circ 41' 48''.04 + 129602768''.13 t_E + 1''.089 t_E^2 \quad (1)$$

donde:

t_E :es la medición en centurias julianas de 36525 días de efemérides desde el comienzo de 1900, cuando la longitud media del Sol fue de $279^\circ 41' 48''.04$

Históricamente la expresión de la longitud media del Sol fue hecha por Newcomb mediante observaciones en el siglo 19, las cuales fueron referidas a un tiempo solar medio. Newcomb uso el valor de $20''.50$ para la constante de aberración, diferente del valor convencional $20''.47$ en uso hasta 1967 y de $20''.497$ desde 1968. El sistema de referencia espacial es la eclíptica y el equinoccio medio.

De acuerdo a la definición, el TE se implementó por medio de mediciones de la longitud del Sol y lecturas de relojes auxiliares. El TU se ha usado frecuentemente como un reloj auxiliar siendo definido por la UAI como: $\Delta T = TE - TUI$

Introduciendo mediciones de la longitud de la Luna se mejora la precisión en la lectura en la escala de tiempo dinámico, ya que la Luna varía su longitud 13 veces más rápido que el Sol.

Disponibilidad del TE

Desde la realización y puesta a punto del TE en 1952 fue posible evaluar el ΔT de observaciones ancestrales, como por ejemplo eclipses lunares y solares de 700 años antes de Cristo.

La definición del TE estimuló la observación de ocultaciones de la Luna con métodos fotoeléctricos. Las medidas del error en las observaciones modernas que incluyen las irregularidades del limbo de la Luna y de las posiciones de las estrellas arrojan una incerteza de $0^S.1$ por año. Las calibraciones de TE pueden tener variaciones de varias unidades de 10^{-9} .

El Lunar Laser Ranging (LLR) puede proveer mejor precisión en la lectura del TE y mejor uniformidad. Pero es más conveniente usar el tiempo atómico como un reloj secundario para dar el TE. La unidad de tiempo atómico está basada en medidas de frecuencia hechas en 1955-1958 para TE de 1900. No obstante en 1958 la diferencia entre TE y Tiempo Atómico tuvo un offset. Medidas posteriores mostraron que no había una deriva significativa; así que una conveniente realización es: $TE = TAI + 32^S.184$

El segundo de TE

En la Conferencia General de Pesas y Medidas en 1960 se estableció que: *El segundo es la fracción 1/31 556 925.9747 del año trópico de 1900 en Enero 0 a las 12 horas de TE.*

Los no astrónomos se vieron confundidos por la mención de la duración de un año a un instante dado. Además, la definición no provee la información necesaria para realizar el segundo en cualquier instante.

Esta desafortunada definición del segundo del Sistema Internacional de Unidades (SI) podría haberse evitado porque las frecuencias atómicas estándares ya estaban bien estudiadas y era evidente que el segundo SI sería prontamente basado en la transición atómica. Esto fue hecho en 1967, así que la definición del segundo de efemérides como una unidad SI duró 7 años.

Estabilidad del TE

En términos muy largos (sobre centurias), la principal causa de inestabilidad del TE es la deriva de frecuencia debido al error de t_E^2 de la ecuación (1) y otros términos periódicos de variación de la longitud del Sol despreciados. También la deriva debido a la incerteza del valor adoptado para la desaceleración de la Luna.

El uso del TE

No es posible mantener acuerdo entre el TE y cualquier otro tiempo por varias razones:

- (i) Los modelos dinámicos para el sistema solar pueden diferir. En particular el TE se define en mecánica clásica Newtoniana y hoy día existen teorías relativistas.
- (ii) Debido a incertezas en los términos de segundo orden en la definición del TE y los despreciados términos superiores, el TE no es estrictamente uniforme en la mecánica Newtoniana.
- (iii) La realización de efemérides incluyen fuentes de errores como por ejemplo errores de integraciones e imperfecciones en las condiciones iniciales.

La UAI en 1976 resolvió lo siguiente:

- (a) En el instante de 1977, Enero 01^d 00^h 00^m 00^s TAI, el valor de la nueva escala de tiempo para efemérides geocéntricas aparentes es 1977, Enero 01^d.0003725 exactamente.
- (b) La unidad de esta escala de tiempo es un día de 86400 segundos SI al nivel medio del mar.
- (c) La escala de tiempo para las ecuaciones de movimiento referidas al baricentro del sistema solar será tal que solo habrán variaciones periódicas entre estas escalas y las efemérides geocéntricas aparentes.
- (d) no se introducirá un paso de tiempo en la escala del TAI.

En 1979 otra recomendación de la UAI definió los *Tiempo Dinámico Terrestre (TDT)* y *Tiempo Dinámico Baricéntrico (TDB)*. La unidad del TDT es un día de 86400 segundos SI en cualquier instante y es así que el TDT es una forma ideal de tiempo atómico sin relación con ninguna teoría dinámica.

No obstante el adjetivo “dinámico” en la designación de esta escala de tiempo fue engañosa ya que no estaba dada por la dinámica.

Para evitar equivocaciones se propuso renombrar al TDT y al TDB como TT y TB respectivamente. El segundo SI se entiende como segundo atómico. Puede designarse en un sistema de referencia geocéntrico:

$$TT_{(TAI)} = TAI + 0^d.0003725$$

La realización de una escala dinámica de tiempo basada en movimientos orbitales tiene muchas dificultades. La pérdida de precisión en las lecturas y la inevitable demora en disponibilidad, hacen impráctico el uso fuera de la astronomía dinámica.

Con el desarrollo de escalas de tiempo atómicas y teorías dinámicas modernas, el TE ha perdido mucho de su interés.

Apéndice 3

Tiempo Pulsar

Los pulsares fueron descubiertos en 1967. Ellos son estrellas de neutrones en rápida rotación que emiten rayos de radiación electromagnética en 100 - 1500 MHz.

La mayoría de los pulsares tienen períodos del orden de 1 o pocos segundos y son muy estables con respecto al tiempo atómico, excepto por ocasionales irregularidades. También existen pulsares de milisegundos como el *PSR 1937+21* con un período de *1.6 ms* descubierto en 1982.

Considerados como generadores de frecuencia, los pulsares tienen el defecto de estar localizados en el espacio, así que la frecuencia observada comparada con la frecuencia de relojes atómicos de laboratorios depende de:

- (a) el movimiento del laboratorio respecto al baricentro del sistema solar.
- (b) el movimiento del pulsar respecto a este baricentro.
- (c) el modelo de propagación de ondas electromagnéticas.
- (d) el medio interestelar.

Muchos otros parámetros involucrados no están suficientemente bien conocidos a priori y deben determinarse por un ajuste de registros de tiempo de arribo de los pulsos.

Además, el período de los pulsares es cambiante, presumiblemente linealmente con el tiempo y la velocidad de la deriva debe ser obtenida mediante observaciones.

El tiempo de arribo del pulso de *PSR 1937+21* puede referirse a escalas de tiempo atómicas con una incerteza menor de 1 microsegundo. Promediando observaciones de dos horas, estas incertezas pueden reducirse a 0.1 microsegundo.

Así, este pulsar no puede ofrecernos una buena medida del tiempo. Pero promediando observaciones de 1 año o más, algunos pulsares de milisegundos tienen inestabilidades menores que las escalas de tiempo atómicas.; Entonces los pulsares pueden mejorar la estabilidad de largos períodos en las escalas atómicas.