

El futuro del Tiempo Universal Coordinado (UTC)

Elisa Felicitas Arias



Seminario de la UIT para la Región de las Américas
(Manta, Ecuador, 20-21 de septiembre de 2012)

Resumen

- Introducción histórica
- Evolución hacia la adopción del tiempo atómico
 - Motivaciones
 - Aplicaciones
- UTC con segundos intercalares
 - Es aún necesario?
 - Conflicto con las aplicaciones modernas
 - Caso de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS)
- Soluciones
- Rol del BIPM

El segundo y la escala de tiempo, un poco de historia

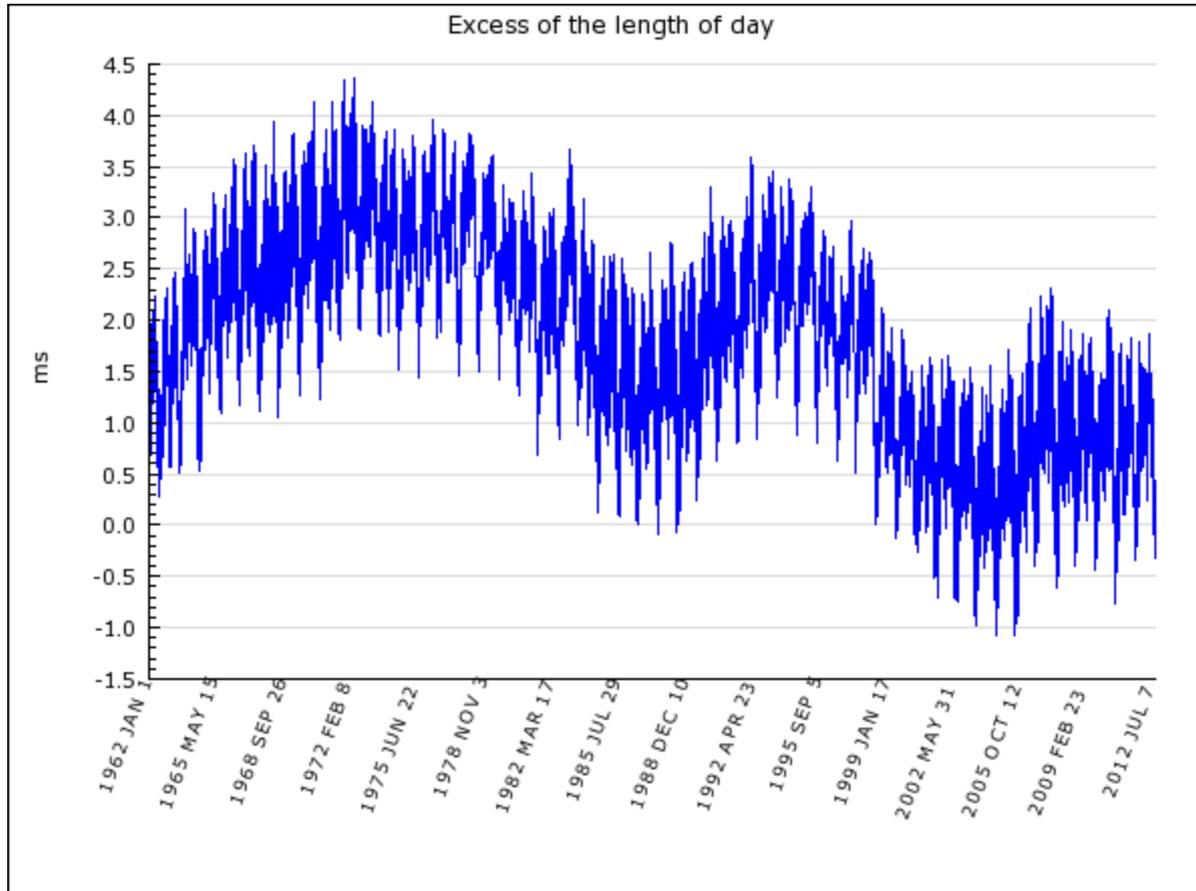
- Unión Astronómica Internacional (UAI)
 - 1/86400 día solar medio
- Comité Internacional de Pesos y Medidas CIPM (1956), UAI, Conferencia General de Pesos y Medidas CGPM(1960)
 - 1/31 556 925.9747 año trópico 1900
- CIPM (1964), CGPM(1967)
 - 9 192 631 770 períodos de la radiación de la transición entre dos niveles hiperfinos del átomo de Cesio 133 en reposo
- Tiempo Universal (UT)
 - Basado en la rotación de la Tierra (movimiento diurno aparente del Sol)
- Tiempo de Efemérides (ET)
 - Basado en el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol
- ET fue una escala de tiempo utilizada solamente por los astrónomos, mientras que UT siguió siendo la escala práctica
- CCDS, CIPM (1970), CGPM (1971)
 - Definición del Tiempo Atómico Internacional (TAI)
- Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)
 - Definition of UTC
- CGPM (1971), Endorses UTC

Conceptos útiles

- La velocidad de rotación de la Tierra no es uniforme
 - La longitud del día cambia
 - Los segundos no tienen la misma duración
 - UT1 (una forma de UT corregida por el desplazamiento del eje de rotación terrestre pero afectada por la rotación irregular de la Tierra)

$$D(t) = \frac{\omega_0}{\omega(t)} \times 86400 \text{ s} \qquad \frac{d(UT1)}{dt} = \frac{\omega(t)}{\omega_0}$$

- Segundo “rotacional” definido como una fracción del día



Conceptos útiles

- **Tiempo de efemérides ET**
 - Definido formalmente como el argumento (t) en las ecuaciones dinámicas del movimiento anual aparente del Sol;
 - Tal argumento representa un tiempo uniforme;
 - ET puede determinarse en tiempo diferido solamente, a partir de la diferencia entre las observaciones y las posiciones calculadas del Sol (de la Luna en la práctica);
 - El segundo de ET se determinó como próximo a la duración promedio del segundo del tiempo solar medio calculado en el siglo; en el momento de su adopción, el segundo de ET era 1.4×10^{-8} más corto que el segundo solar medio;
 - Esto significó una violación al principio de continuidad al redefinirse una unidad física, y ...
 - ...las consecuencias se evidenciaron más tarde, al adoptarse el tiempo atómico.

La adopción del tiempo atómico

- El segundo atómico se definiò preservando la continuidad con el segundo de efemérides, y en consecuencia resultó de menor duración que el segundo derivado del día solar medio;
- TAI puede ser considerado un promedio de lecturas de relojes situados sobre el geoide en rotación, y realizando al segundo del Sistema Internacional de Unidades (SI) con alguna aproximación;
- La unidad de escala de TAI se calcula mediante una suerte de promedio, pero es aún necesario fijar un origen (arbitrario) para disponer de una escala de tiempo apta para la medición de intervalos de tiempo;
- En su definición TAI se fijó igual a una forma particular de UT (UT1) el 1 de enero de 1958, a 0 h UT.
- Cambiar de UT a TAI implicó que: **como ω decrece a largo plazo \Rightarrow 1 día rotacional $>$ 1 « día atómico »**

Los motivos del cambio (años 60)

Se hacía necesaria una redefinición de ET en base a las nuevas teorías dinámicas

Essen ya había construido el oscilador atómico de frecuencia

UK, USA operaban relojes de Cs

El BIH ya utilizaba estos relojes en el cálculo de la escala de tiempo de referencia

Cualquier modificación implicaba un cambio mayor

Motivos para NO cambiar

El tiempo astronómico es el « tiempo de Dios »

Desincronización de las actividades humanas del ritmo solar

Necesidad de acceder a UT1 con cierta precisión



Definir ~~escalas~~ escalas para distintas aplicaciones

Definir una escala única adaptada a todas las aplicaciones

Usuarios de UT1

Navegación
astronómica

Determinación de la
longitud por observación
de objetos celestes con
posiciones conocidas

Necesidad de
acceder a UT1
con una
aproximación de
1 s

Astrónomos

Guiado de telescopios

Necesidad de
acceder a UT1
con una
aproximación de
1 s

Compromiso para satisfacer a todos los usuarios

- Adoptar TAI, cuyo intervalo unitario es el segundo atómico;
- Definir UTC, derivado de TAI, cuyo intervalo unitario es el segundo atómico, pero modificado de manera de mantenerlo próximo a UT1;
- Establecer una tolerancia aceptable para la navegación marítima y la observación astronómica:

$$|UT1 - UTC| < 0.9 \text{ s}$$

- Mantener la diferencia entre ambas escalas dentro de los límites de la tolerancia mediante la inserción de un segundo (positivo o negativo) a UTC según la decisión de la organización que estudia la rotación de la Tierra (IERS en la actualidad);
- La ITU-R aprobó la recomendación (ITU-R, TF-460.6, 1970) que fija el procedimiento de aplicación de los segundos intercalares en UTC.

Antes de la adopción de TAI y UTC

Limits of validity (at 0 h UTC)

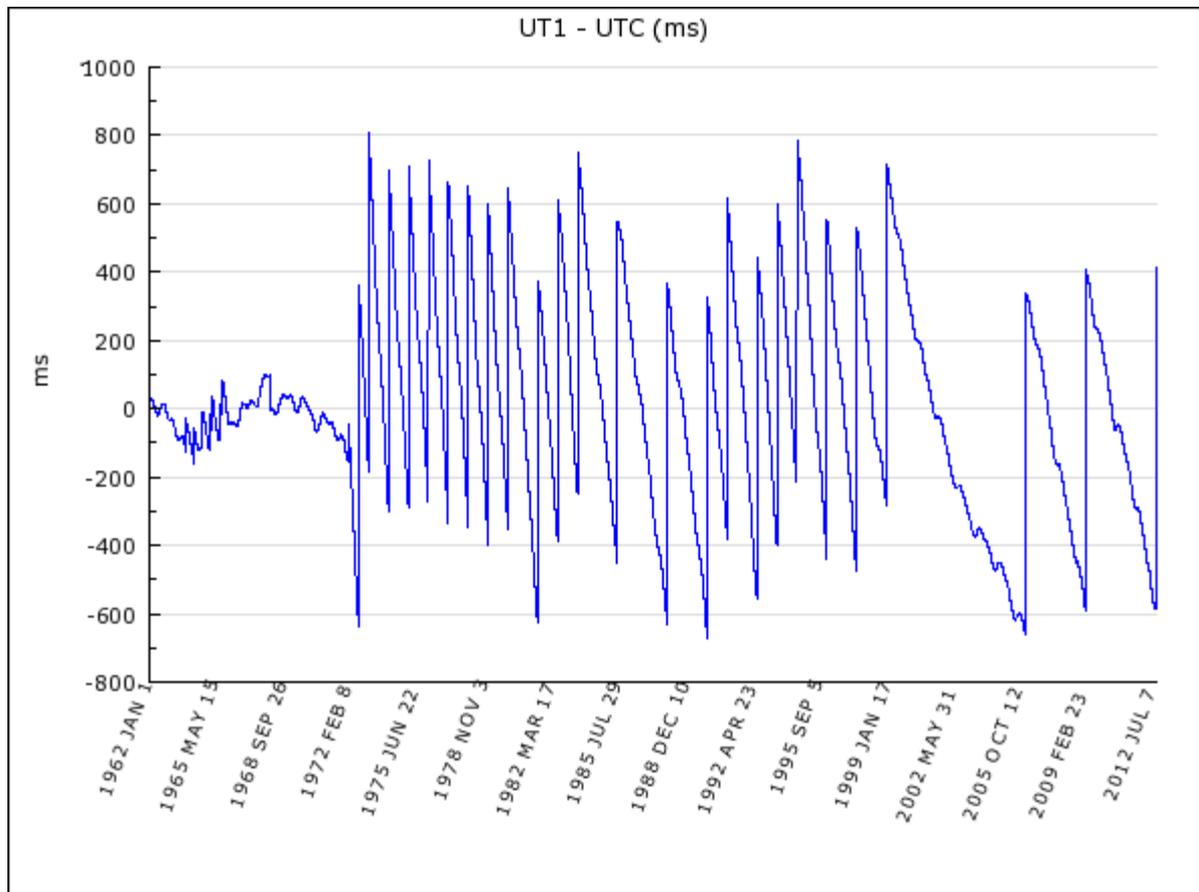
[TAI - UTC] / s

1961	Jan. 1 - 1961	Aug. 1	1.422 8180 + (MJD - 37300) x 0.001 296
1961	Aug. 1 - 1962	Jan. 1	1.372 8180 + " "
1962	Jan. 1 - 1963	Nov. 1	1.845 8580 + (MJD - 37665) x 0.001 1232
1963	Nov. 1 - 1964	Jan. 1	1.945 8580 + " "
1964	Jan. 1 - 1964	Apr. 1	3.240 1300 + (MJD - 38761) x 0.001 296
1964	Apr. 1 - 1964	Sep. 1	3.340 1300 + " "
1964	Sep. 1 - 1965	Jan. 1	3.440 1300 + " "
1965	Jan. 1 - 1965	Mar. 1	3.540 1300 + " "
1965	Mar. 1 - 1965	Jul. 1	3.640 1300 + " "
1965	Jul. 1 - 1965	Sep. 1	3.740 1300 + " "
1965	Sep. 1 - 1966	Jan. 1	3.840 1300 + " "
1966	Jan. 1 - 1968	Feb. 1	4.313 1700 + (MJD - 39126) x 0.002 592
1968	Feb. 1 - 1972	Jan. 1	4.213 1700 + " "
1972	Jan. 1 - 1972	Jul. 1	10 (integral number of seconds)
1972	Jul. 1 - 1973	Jan. 1	11
1973	Jan. 1 - 1974	Jan. 1	12
1974	Jan. 1 - 1975	Jan. 1	13
1975	Jan. 1 - 1976	Jan. 1	14

Después de la adopción de TAI y UTC, siguiendo la recomendación de la UIT

UT1-UTC

International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)



35 segundos
intercalares

Reglas establecidas por la Recomendación ITU-R TF-460.6

- **DUT1**

El valor de la predicción de UT1 – UTC, diseminado a través de señales horarias se indica con DUT1. Los valores de DUT1 son proporcionados por el IERS en la forma de múltiplos de 0.1 s.

El valor absoluto de DUT1 no debe exceder 0.8 s.

La diferencia entre UTC y UT1 no debe exceder ± 0.9 s.

Un segundo intercalar, positivo o negativo debe ser el último segundo de un mes UTC, dando primera prioridad a los finales de diciembre y junio, y segunda prioridad a los finales de marzo y septiembre.

Un segundo intercalar positivo comienza a las 23h 59m 60s y termina a las 0h 0m 0s del primer día del mes siguiente. Si se trata de aplicar un segundo intercalar negativo, al instante 23h 59m 58s lo seguirá, un segundo más tarde las 0h 0m 0s del primer día del mes siguiente.

El IERS es responsable de la decisión de aplicación de un segundo intercalar, y de anunciarlo al menos con ocho semanas de anticipación.

ITU-R, TF-460.6 (1970,..., 2002)

FIGURE 3
Positive leap-second

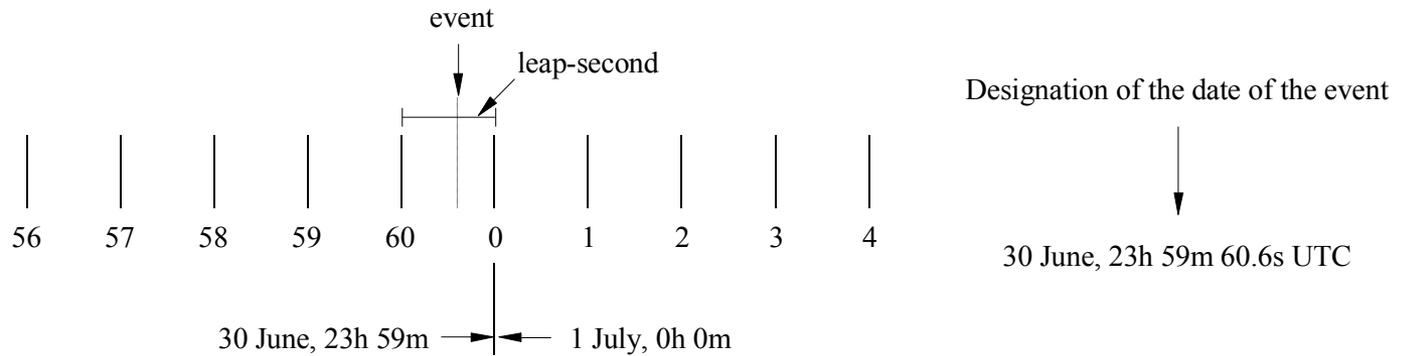
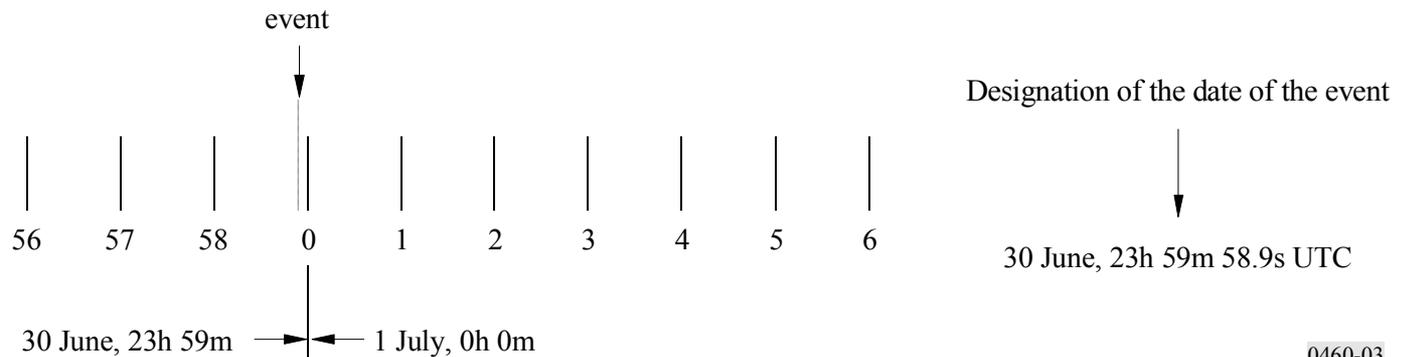
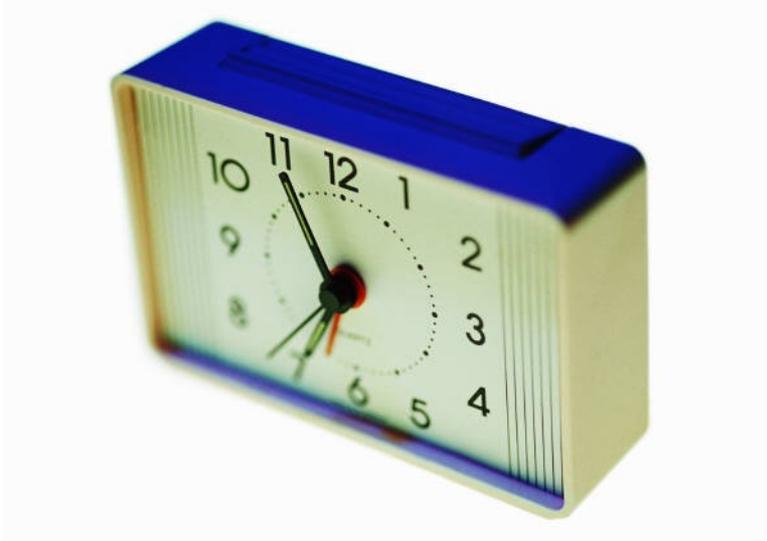


FIGURE 4
Negative leap-second



0460-03

Están los relojes preparados para marcar 60 segundos en un minuto?



http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time_server.html

Conviene el UTC discontinuo a las aplicaciones modernas?

- La introducción artificial de un segundo intercalar en un equipo no adaptado para soportar el segundo 60 puede provocar interrupciones de los sistemas, afectando:
- La sincronización de redes
 - Comunicaciones
 - NTP (network time protocol)
 - Computadoras
 - Distribución y control de potencia eléctrica
 -
- Sincronización de satélites
 - Escalas de tiempo de GNSS (GNSS times)
- Operaciones espaciales
 - Lanzamiento de vehículos
- Control de tráfico aéreo, operaciones aeroportuarias
- La diseminación de la hora en general

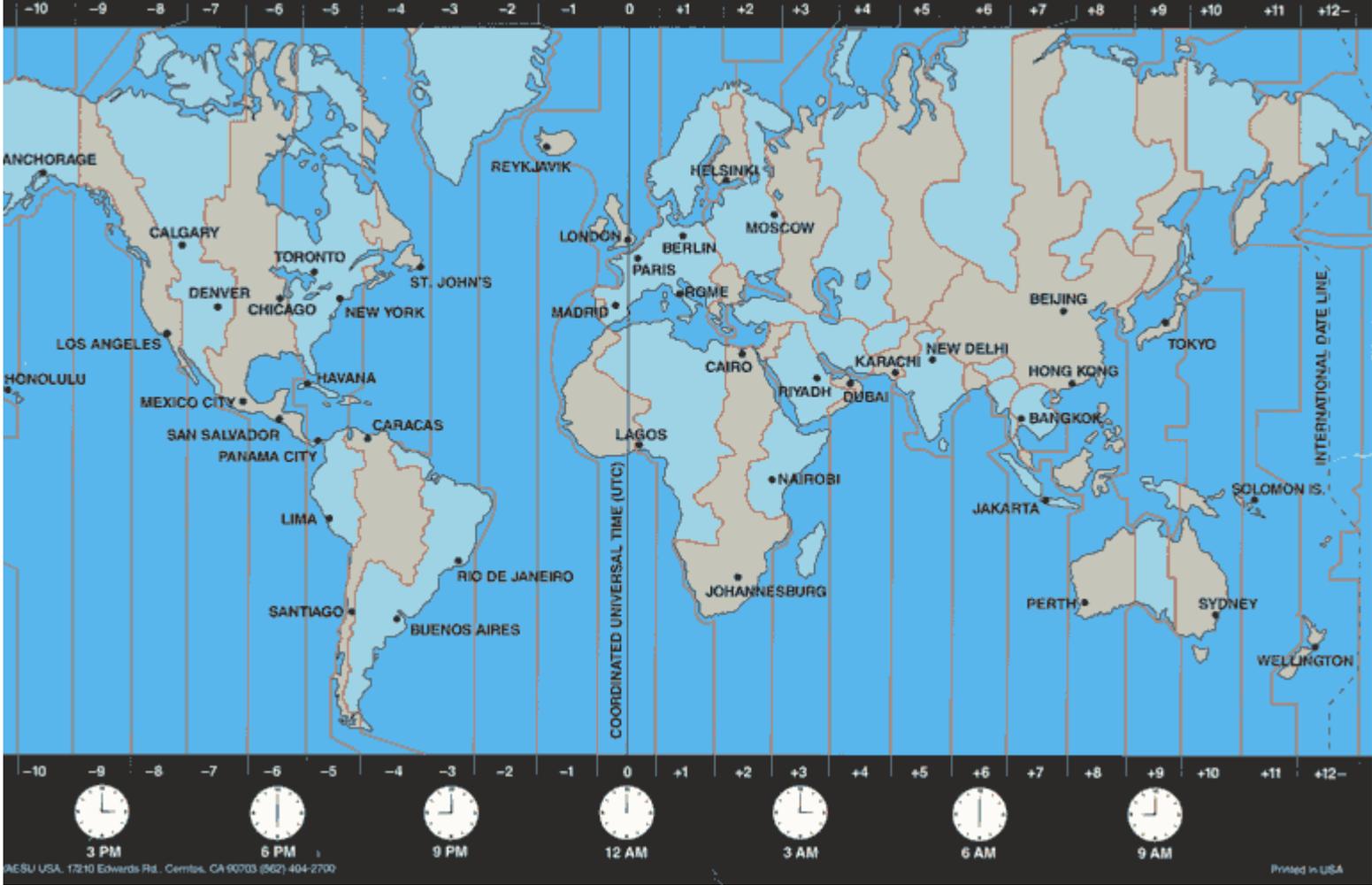
Aspectos negativos de UTC con segundos intercalares

- Rompe la natural cualidad del tiempo: su continuidad
- El evento « segundo intercalar » no es predecible y se produce a intervalos irregulares
- Por ser artificial, se requiere el mantenimiento manual de archivos
- Operación forzada de relojes en laboratorios de metrología
 - Hoy simplificada, los relojes de cesio industriales permiten programar la aplicación de un segundo intercalar
- Error de interpretación entre POSITIVO o NEGATIVO?
 - Riesgo de un corrimiento de 2 s de la realización local de UTC
- La aplicación es simultánea en todo el mundo, lo cual significa que se hace a la misma hora UTC (diferentes horas locales)
 - El impacto varía dependiendo de la hora local y la fecha de aplicación
- Probada violación del procedimiento de aplicación (ITU-R TF-460.6)
 - Aplicación en el primer día laborable del año (el laboratorio está cerrado...)
 - El segundo 60 se distribuye sobre un número de segundos alrededor de la medianoche

Argumentos a favor de UTC con segundos intercalares

- Aproxima el tiempo atómico (uniforme) al tiempo (no-uniforme) de la rotación terrestre
 - Cuál es el interés en la actualidad?
- Permite acceder a UT1 con una aproximación de 0.9 S
 - La predicción de UT1-UTC del IERS permite acceder a UT1 con mayor precisión
- UTC puede considerarse igual a UT1, y en consecuencia igual a GMT
 - GMT fue eliminado como referencia por la IAU en los años 50, siendo reemplazado por UT;
 - En 1972 se recomendó NO UTILIZAR GMT o su acrónimo para evitar la confusión con UTC
- El público en general cree que preservando UTC con segundos intercalares se vive en tiempo estrictamente solar
 - Las horas legales difieren de las que corresponden al huso horario!
 - Buenos ejemplos: Hora de Europa Central, China tiene hora única en todo el territorio, cambios de una hora para adaptar hora de verano y de invierno (bien aceptados por el público...)

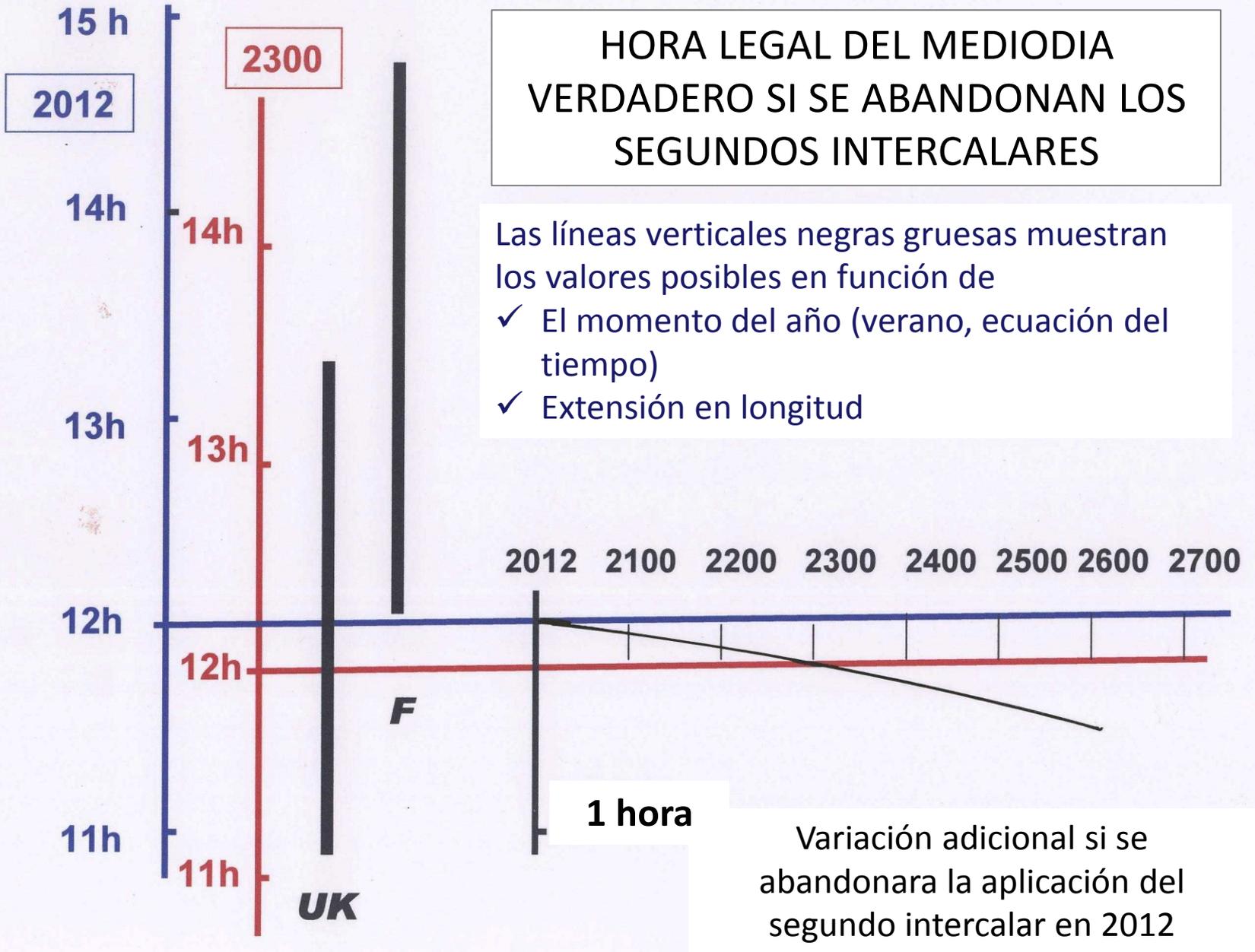
STANDARD TIME ZONES OF THE WORLD



RESU USA, 17210 Edwards Rd., Corcoran, CA 92703 (962) 404-2700

Printed in USA





Problemas y ambigüedades originados por la aplicación del segundo intercalar

[Timescales differing by seconds](http://leapsecond.com/java/gpsclock.htm)

<http://leapsecond.com/java/gpsclock.htm>

- **Problema del cambio de día**
 - En algunos sistemas, servicios diferentes utilizan distintas escalas de tiempo para la datación de eventos;
 - El cambio de día no es simultáneo en todas las escalas de tiempo cuando se aplica el segundo intercalar;
 - Problemas de este tipo acontecen en los GNSS, cuando se utilizan a la vez la escala de tiempo del GNSS y UTC.
- **Problema del cambio de semana**
 - Es similar al cambio del día;
 - La datación en semanas es típica en GNSS (semana GPS)
- **Fecha Juliana (MJD)**
 - Medida de intervalos de tiempo por el número de días de 86400 s transcurridos entre los extremos del intervalo.

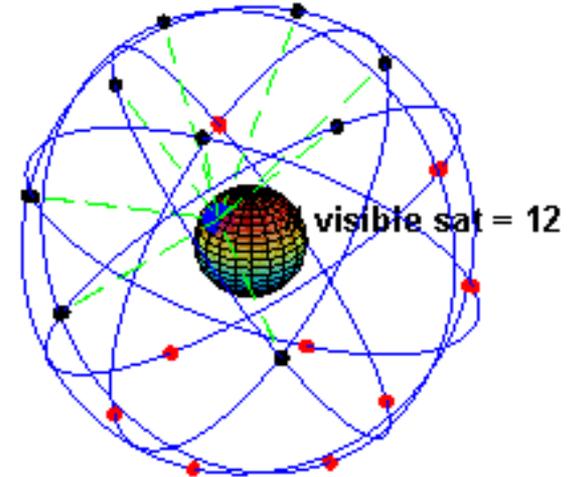
Supresión del segundo intercalar de UTC

- Pérdida de sincronización a UT1 (1 h en muchos siglos...)
- Software no preparado para tolerar valores no acotados de la diferencia UT1 – UTC
- Hardware no preparado para tolerar formatos de DUT1 de más de un dígito
- Se requiere un tiempo mínimo para adaptar los sistemas a la nueva definición
- UTC se convierte en una escala de referencia continua
- No más utilización de recursos humanos y materiales en la aplicación del segundo intercalar
- No más interrupciones de servicios en sistemas afectados por la aplicación del segundo intercalar (GLONASS es un ejemplo)
- Se facilita la interoperabilidad de los GNSS, las realizaciones de UTC sirven directamente para la sincronización de las escalas
- Probable desaparición de TAI (su diferencia de UTC permanecerá constante)
- Fin de la proliferación de escalas de tiempo, se evitan confusiones y se minimizan riesgos..

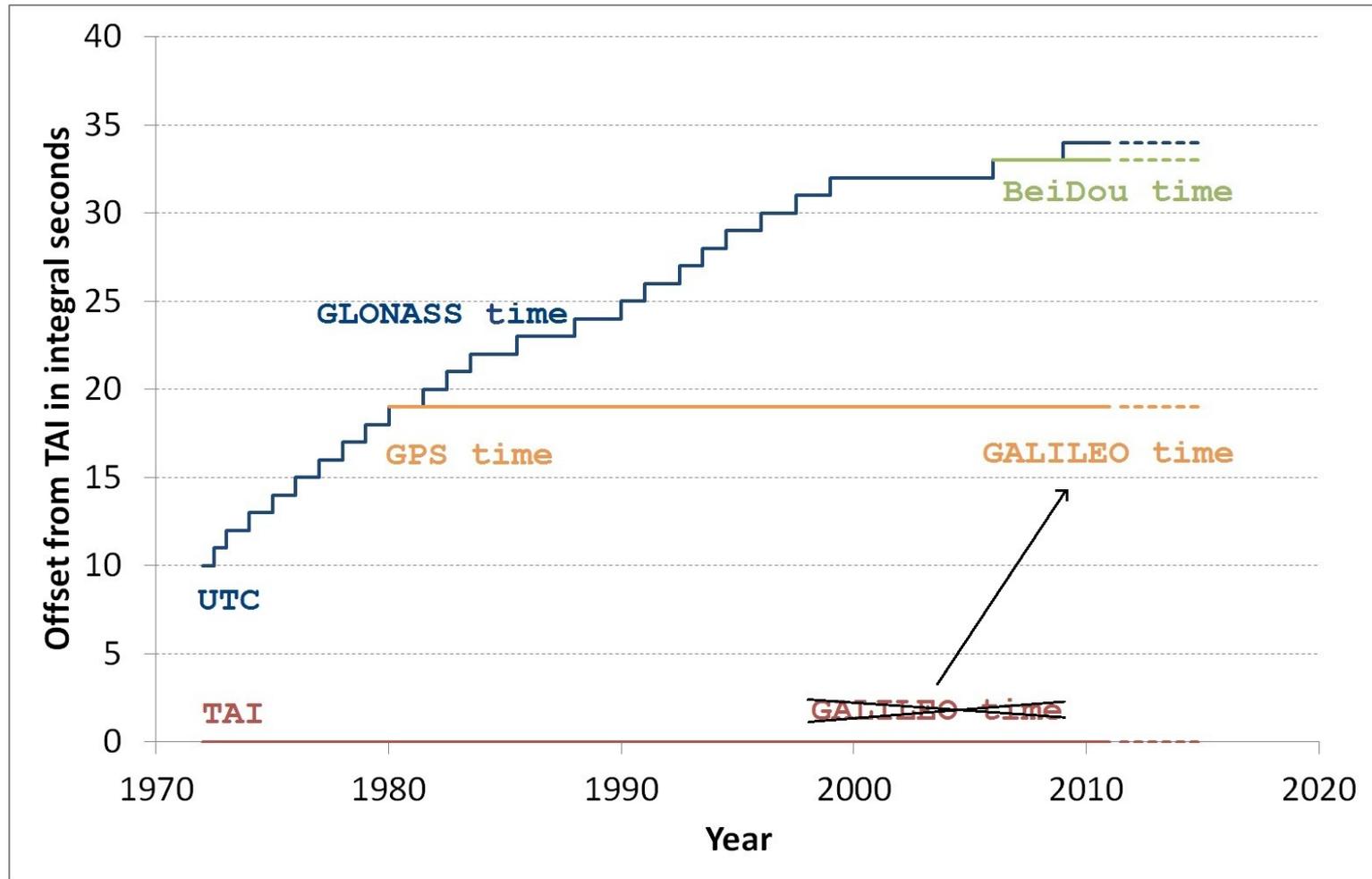
GNSS y el segundo intercalar

- ✓ Los GNSS requieren de escalas de tiempo internas para permitir la sincronización del sistema y obtener la solución de navegación.
- ✓ GNSS times son continuos, **construídos a partir de conjuntos de relojes, y sincronizados a una referencia externa**
- ✓ La referencia externa es una (o varias) realización(es) local(es) de UTC
- ✓ **UTC es discontinuo, en consecuencia hay preferencia por sincronizar a UTC(k) modulo 1 segundo**
- ✓ GLONASS está sincronizado sobre UTC(SU)
- ✓ **La elección del número entero de segundos con respecto a UTC es arbitraria.**
- ✓ Conflicto con la interoperabilidad.

GNSS time	Referencia de sincro.
GPS	UTC(USNO)
GLONASS	UTC(SU) [VNIIFTRI]
Galileo	UTC(k), k en Europa
BeiDou	UTC(k), k en China
EGNOS	UTC(OP)



Relación entre TAI, UTC y GNSS times



Relación entre dos escalas de tiempo de GNSS

[GPS time - GLONASS time]



Redefinición de UTC, el proceso

- El proceso de tratamiento de recomendaciones (aprobación/modificación) en la UIT es pesado (Working Party → Study Group → WRC)
- La discusión sobre la modificación de la recomendación ITU-R TF.460-6 lleva 12 años en el WP7A, con la oposición permanente de una administración que ha bloqueado el avance de la propuesta. En 2012 se unieron otras tres administraciones a la oposición.
- Los argumentos que se oponen al cambio no tienen carácter técnico
 - Pérdida de correlación con el Sol
 - Confusión del público, de la naturaleza, fechas religiosas (la adopción del calendario Gregoriano para acomodar la fecha de la Pascua implicó la eliminación de 10 días, al 4 de octubre de 1582 le siguió el 15 octubre, pero no fue adoptado por todo el mundo, solamente por aquel vinculado a Roma)
 - UTC es una aproximación de UT1, a su vez UT1 se aproxima a GMT(hora legal en UK); la diferencia UTC sin segundos intercalares y GMT crece indefinidamente (no existe ninguna realización física de GMT, sino que es considerado idéntico a la realización de UTC en UK en el National Physical Laboratory de Teddington)

Redefinición de UTC, el proceso (cont.)

- El proyecto de recomendación TF-460.6 que propone una nueva definición de UTC sin segundos intercalares fue presentado a la Asamblea de Radiocomunicaciones en enero 2012
 - Considerando la necesidad de adaptar software, hardware y procedimientos, se propone la aplicación de la recomendación al menos 5 años después de su aprobación.
- Un cuestionario enviado por la UIT-R a las administraciones previo a la RA fue contestado sólo por 15 administraciones, con tres oposiciones. En un cuestionario anterior, la UAI y el BIPM expresaron su apoyo a la modificación de la recomendación.
- La RA notó que existe un cierto equilibrio entre el número de administraciones con una opinión formada (positiva o negativa) y otras que expresan necesitar más información. En conclusión, se decidió postponer hasta la WRC 2015 la decisión sobre la adopción de una escala de referencia continua para la disseminación coordinada de señales de tiempo y frecuencia.
 - La delegación del BIPM ante la UIT continúa trabajando para que ello sea posible ...

Ayudando a agilizar el proceso, promoviendo la discusión, educando

- Volumen especial de la revista Metrologia, « Modern Timescales ». Publicado en julio 2011
 - Editores invitados: F. Arias (BIPM) and W. Lewandowski (BIPM), delegados a la UIT-R
- Discusión en la Royal Society of London el 3-4 noviembre 2011
 - Contribuciones por invitación
 - Participación por invitación
 - T. Quinn, F. Arias organizadores
- Planteo del problema en el Comité Internacional GNSS (ICG)
- Promoviendo una reflexión acerca de las responsabilidades en la definición, mantenimiento y diseminación de la referencia mundial de tiempo
 - La UIT reglamenta la diseminación de t&f por señales, pero no es la autoridad en metrología,
 - Existe una estructura metrológica mundial (CGPM-CIPM-BIPM-NMIs) que debería asumir la responsabilidad de la definición de la escala mundial.

Ultimo (?) segundo intercalar

Fin de junio 2012

TAI-UTC = 35 s