

CINCO AÑOS DE COMPARACIÓN INTERNACIONAL UTC(CENAM) Vs UTC: ASEGURANDO LA GENERACIÓN DE UNA ESCALA DE TIEMPO DE CLASE MUNDIAL PARA MÉXICO

J. Mauricio López R, Francisco Jiménez T
Centro Nacional de Metrología, División de Tiempo y Frecuencia
Km. 4.5 Carretera a los Cués, El Marques, Querétaro, México
Tel. 014 211 0543, Fax 014 215 3904, jlopez@cenam.mx, fjimenez@cenam.mx

Resumen: En este trabajo se hace una breve introducción a la escala de Tiempo Atómico (AT), la escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI) y a la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC). Se describe la forma en que el Centro Nacional de Metrología genera la escala UTC, el UTC(CENAM), se muestran los mecanismos de disseminación a nivel nacional e internacional de esta escala de tiempo. Se presentan y discuten los resultados de la comparación internacional mantenida durante cinco años entre el UTC(CENAM) y la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC) generada por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). Finalmente se hace una comparación entre las escalas de tiempo UTC mantenidas por el National Institute of Standards and Technology (NIST), el National Research Council (NRC), el Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) y el Centro Nacional de Metrología (CENAM).

INTRODUCCIÓN

La unidad de tiempo, el segundo, está definida en el Sistema Internacional (SI) de unidades en términos de propiedades del átomo de Cesio-133, a saber: un segundo es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación asociada a la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133 [1]. Al segundo así definido usualmente se le conoce como segundo atómico. La reproducción de la definición del segundo permite la medición de intervalos de tiempo con incertidumbres de hasta partes en 10^{15} [2]. Sin embargo, para efectos de sincronía a nivel regional, nacional e internacional, es necesaria la generación de escalas de tiempo que sirvan como referencia común y accesible para la medición de tiempo.

La generación de escalas de tiempo de alta calidad metrológica representa para los países desarrollados una referencia de alto valor estratégico para asegurar, entre otras cosas, que los niveles de sincronía nacionales e internacionales permitan operar a los sistemas de comunicación satisfactoriamente. El UTC(CENAM) presenta características metrológicas similares a las mejores escalas de tiempo del mundo, y constituye una referencia de tiempo valiosa en la sincronía de las actividades del país, aún en las mas demandantes.

La primera sección de este trabajo está dedicada a una breve introducción sobre el concepto de la escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI). En la segunda sección se aborda la definición de la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC). En la tercera sección se describe la forma en que el Centro Nacional de Metrología (CENAM) genera su escala de tiempo UTC, el UTC(CENAM). Así mismo se

muestran los mecanismos por medio de los cuales el UTC(CENAM) es disseminado nacional e internacionalmente. En la cuarta sección se presentan los resultados de la comparación del UTC(CENAM) respecto al UTC generado por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). En la parte final de esta misma sección se presenta una comparación entre las escalas de tiempo UTC(CENAM), UTC(NIST), UTC(NRC) y UTC(PTB). Se pone especial atención a las estabildades de estas escalas de tiempo evaluadas con la Varianza de Allan. Finalmente se dan las conclusiones.

TIEMPO ATÓMICO INTERNACIONAL (TAI)

En 1971, la 14ª Conferencia General de Pesas y Medidas definió la Escala Internacional de Tiempo Atómico, denotada como TAI (del francés **T**emps **A**tomique **I**nternational) y se delegó en aquel entonces la responsabilidad de su generación a la Oficina Internacional de la Hora BIH (del francés **B**ureau **I**nternational de l'**H**oure) en París sobre las bases de la información de la medición de tiempo mantenida por los laboratorios primarios de metrología acorde con la definición del segundo. En la actualidad esta tarea es llevada a cabo por la Sección de Tiempo del BIPM.

La unidad de tiempo en la escala TAI es el segundo del SI con correcciones debidas a efectos sistemáticos por la altura sobre el nivel del mar en que es reproducida la unidad. Este es un efecto enmarcado en el contexto de la Teoría General de la Relatividad y tiene una proporción de una parte en 10^{16} por cada metro de altitud. En otros términos, el TAI es referido a un potencial gravitacional específico, el nivel del mar.

Esta escala de tiempo es independiente de los movimientos de rotación y traslación de la tierra con la salvedad de que la definición del TAI considera que ésta coincide exactamente con el Tiempo Universal (UT1) el primero de enero de 1958 a las 0 horas TAI.

Para generar el TAI, el BIPM usa algoritmos matemáticos diseñados específicamente para tal efecto, en la actualidad al algoritmo usado se le denomina ALGOS. Estos algoritmos determinan las inestabilidades de los relojes participantes y les asignan pesos estadísticos en la promediación. Es importante señalar que la escala TAI es una escala virtual en el sentido de que no existe señal física alguna que defina esta escala, el TAI es mas bien el resultado matemático de una promediación ponderada. Los laboratorios participantes en la generación del TAI son los usuarios primarios del TAI ya que constituye una referencia para sus escalas de tiempo atómico locales $TA(k)$, donde k denota el acrónimo del laboratorio. Las escalas de tiempo $TA(k)$ son escalas reales en el sentido de que existe una señal física que define la escala, usualmente una señal de un pulso por segundo (1pps). Información más detallada sobre la generación del TAI puede encontrarse en la referencia [3].

TIEMPO UNIVERSAL COORDINADO

La Escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC) esta definida por dos ecuaciones, a saber:

$$UTC - TAI = n, \quad (1)$$

$$|UTC - UT1| \leq 0,9s, \quad (2)$$

donde n es un número entero de segundos. La ecuación (1) establece que las diferencias entre el UTC y el TAI son siempre iguales a un número entero de segundos, mientras que la ecuación (2) establece que el UTC no puede diferir del UT1 mas de 0,9 segundos. En otros términos, la unidad de tiempo del UTC es igual a la unidad de tiempo del TAI y el número de segundos del UTC al año depende de las condiciones de rotación de la tierra. Con el objeto de mantener la condición de la ecuación (2), periódicamente se insertan segundos "bisiestos" al UTC a las 0h00 UTC preferentemente los días 30 de junio o 31 de diciembre. Desde 1972 hasta la fecha se ha acumulado una diferencia de 32 segundos entre el UTC y el TAI, esto es $n = -32$ en la primer ecuación. El organismo internacional encargado de tomar la decisión de la inserción o no de los segundos bisiestos en el UTC, y por supuesto de

hacer publicas sus decisiones, es el International Earth Rotation Service (IERS) [4].

El BIPM es el organismo encargado de generar la escala de tiempo UTC. De manera similar a la generación del TAI, el BIPM recibe información de aproximadamente 45 laboratorios alrededor del mundo que participan con el envío de datos de sus escalas de tiempo UTC locales, estas escalas de tiempo locales son denotadas como $UTC(k)$, donde k corresponde al acrónimo del laboratorio. El algoritmo para la generación del UTC considera la duración de la unidad de tiempo de acuerdo a patrones primarios de tiempo (relojes atómicos) que han sido sujetos a una evaluación exhaustiva de errores sistemáticos y cuya exactitud ha sido determinada sin referencia a ningún otro patrón. El número de relojes atómicos que contribuyen al UTC de esta manera es reducido (menor que diez), mientras que la continuidad y estabilidad del UTC esta sustentada por la contribución de aproximadamente 250 relojes atómicos comerciales que operan en 45 laboratorios. Es importante señalar que el UTC es una escala de tiempo virtual en el mismo sentido en el que el TAI lo es, mientras que las escalas de tiempo $UTC(k)$ son escalas de tiempo reales en el mismo sentido en que las escalas $TA(k)$ lo son. Las escalas de tiempo $UTC(k)$ pueden considerarse predicciones del UTC ya que el UTC es conocido un mes después de que los $UTC(k)$ son promediados. En la práctica las escalas de tiempo $UTC(k)$ se mantienen con diferencias tan bajas como sea posible respecto al UTC, típicamente estas diferencias son en la actualidad menores a 200 nanosegundos.

La escala de tiempo UTC es la referencia para definir los husos horarios locales en función de la posición geográfica. Por ejemplo, en el caso de México, en el horario de invierno a la zona horaria del Centro le corresponde el tiempo UTC- 6 horas, a la zona de las Montañas le corresponde el tiempo UTC-7 horas, y a la zona del Pacífico le corresponde el tiempo UTC-8 horas. Para el horario de verano las diferencias son: UTC – 5 horas, UTC – 6 horas, UTC – 7 horas, respectivamente [5].

El UTC(CENAM)

El CENAM genera la escala de tiempo mas confiable de México, el UTC(CENAM). La unidad de tiempo del UTC(CENAM) esta definida por el periodo de la señal de un pulso por segundo (1pps) del Patrón Nacional de Tiempo, mientras que un sistema automático mantiene registro de los pulsos y les asigna coordenadas. El UTC(CENAM) se mantiene en comparación internacional con otros 45 laboratorios desde marzo de 1996 por medio del BIPM. Esta

comparación permite a su vez que el CENAM participe en la generación del UTC por medio del envío de datos del desempeño del UTC(CENAM). En la Figura 1 se muestran los resultados de la comparación entre el UTC y el UTC(CENAM) durante este periodo de tiempo.

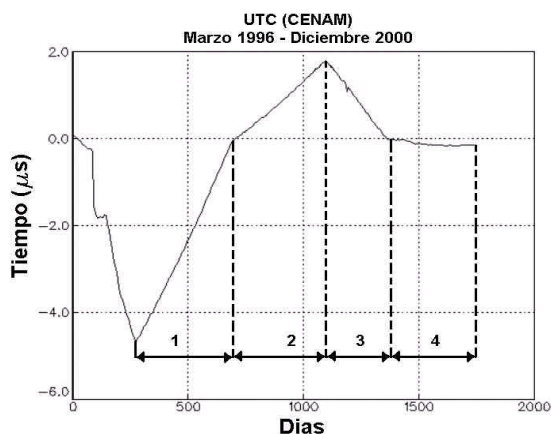


Figura 1. Resultados de la comparación del UTC(CENAM) con el UTC durante el periodo comprendido entre marzo del año 1996 y diciembre del año 2000

La característica metrológica más importante de una escala de tiempo es la estabilidad. Esto se debe al hecho de que la estabilidad de un escala de tiempo está estrechamente relacionada con la “predictibilidad” de ésta. En la Figura 1 se aprecian intervalos de tiempo bien definidos en los que las diferencias entre el UTC y el UTC(CENAM) presentan pendientes bien definidas, estos intervalos de tiempo corresponden a periodos durante los cuales al Patrón Nacional de Tiempo se le introdujeron corrimientos fraccionales de frecuencia controlados no mayores a 2×10^{-13} . Esto fue hecho con el objeto de estimar los errores sistemáticos presentes en el patrón [6]. Las diferencias fraccionales entre la unidad de tiempo del UTC(CENAM) respecto a la unidad de tiempo del UTC para las regiones 1, 2, 3, y 4 de la Figura 1 son $1,29 \times 10^{-13}$, $5,3 \times 10^{-14}$, $-8,0 \times 10^{-14}$, -5×10^{-15} , respectivamente. La Figura 2 muestra un gráfico de la estimación de la estabilidad del UTC(CENAM), en términos de la varianza de Allan, para tiempos de promediación τ que van desde 5 días hasta 4 meses. La estabilidad del UTC(CENAM) oscila típicamente entre 2×10^{-14} para tiempos cortos (5 días) y 4×10^{-15} para tiempos largos (4 meses).

El UTC(CENAM) es diseminado nacional e internacionalmente por los mecanismos mostrados en la figura 3. Por vía telefónica en el número +52 4 215 3902, en el +52 4 211 0506 se disemina el

Tiempo del Centro, en el +52 4 211 0507 el Tiempo de las Montañas, en el +52 4 211 0508 el Tiempo del Pacífico. Por INTERNET a través del servidor de tiempo cronos.cenam.mx (para mayor información de la forma de realizar los enlaces vía INTERNET ver [7]). Por radio en la Ciudad de México en la frecuencia 1350 kHz de AM [8]. Estos sistemas de diseminación tienen un nivel de sincronía de 50 milisegundos aproximadamente. Para la inmensa mayoría de los usuarios del UTC(CENAM) estos niveles de sincronía son suficientes. Sin embargo, existen algunas aplicaciones muy importantes para las cuales se requiere un nivel de sincronía mucho mayor, del orden de 10^{-8} segundos. Para estos usuarios el UTC (CENAM) es transferido por medio de la técnica de vista común con los satélites del sistema GPS (Global Positioning System) [9].

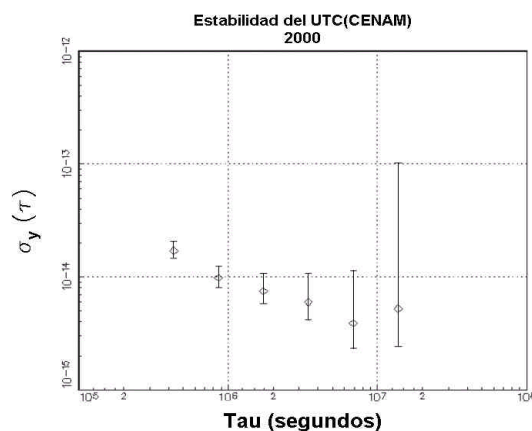


Figura 2. Estabilidad del UTC(CENAM) estimada por medio de la varianza de Allan $\sigma_y(\tau)$. La estabilidad del UTC(CENAM) oscila típicamente entre 2×10^{-14} para tiempos cortos (5 días) y 4×10^{-15} para tiempos largos (4 meses).

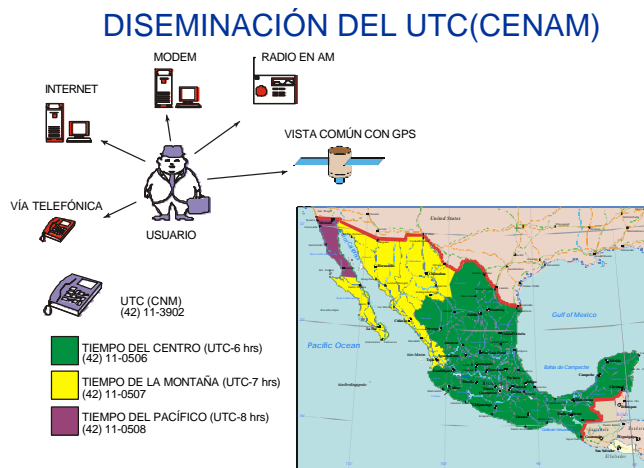


Figura 3. Sistemas de diseminación de la escala de tiempo UTC(CENAM).

COMPARACIÓN ENTRE EL UTC(CENAM), UTC(NIST), UTC(NRC) Y UTC(PTB)

Con el objeto de comparar el desempeño del UTC(CENAM) respecto a otras escalas de tiempo generadas por laboratorios primarios de metrología de reconocido prestigio internacional, se ha hecho una comparación del UTC(CENAM) con el UTC(NIST), el UTC(NRC) y el UTC(PTB). La Figura 4 muestra los resultados de la comparación de las escalas de tiempo UTC(NIST), UTC(NRC) y UTC(PTB) respecto al UTC. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las estabildades de estas mismas escalas de tiempo.

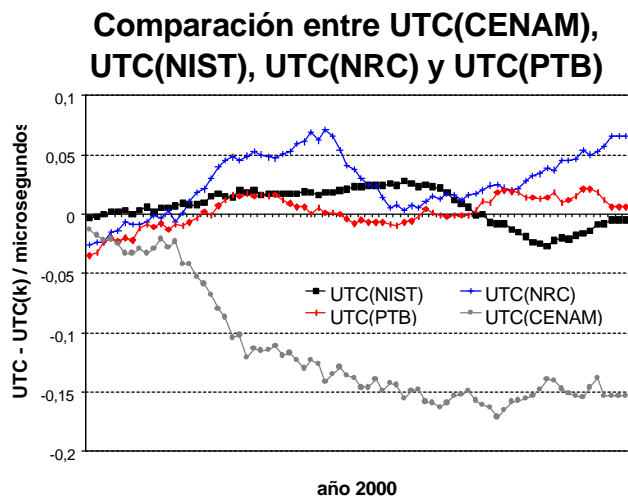


Figura 4. Comparación entre las escalas de tiempo UTC(CENAM), UTC(NUST), UTC(NRC) y UTC(PTB). La referencia común en esta comparación es el UTC.

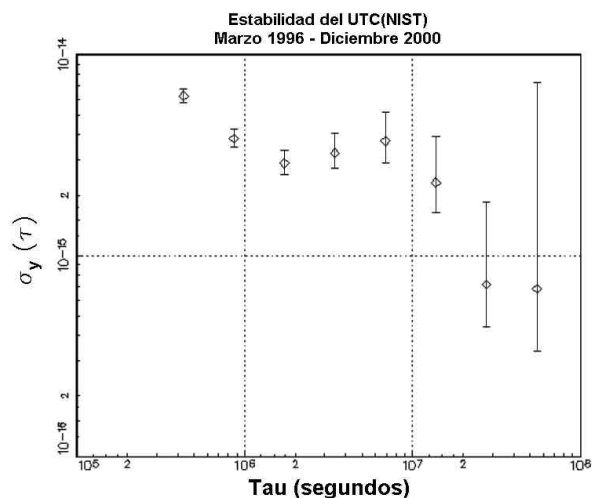


Figura 5. Estabilidad de la escala de tiempo UTC(NIST).

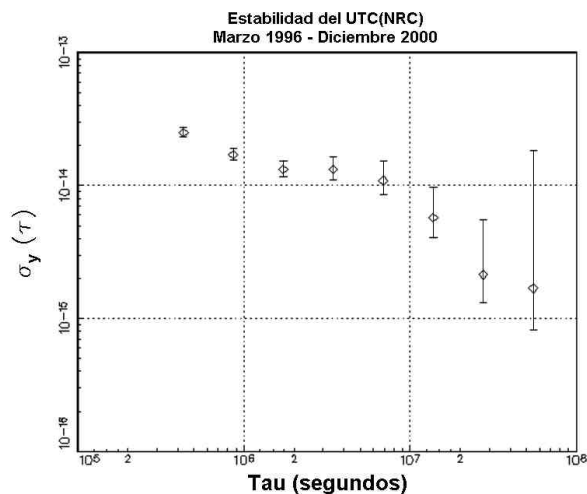


Figura 6. Estabilidad de la escala de tiempo UTC(NRC).

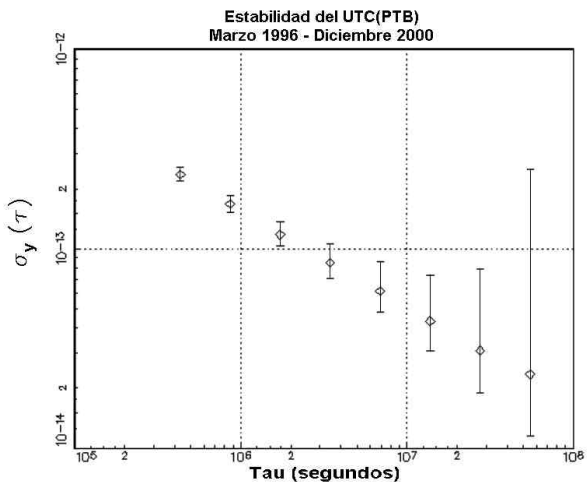


Figura 7. Estabilidad de la escala de tiempo UTC(PTB).

Las estabilidad del UTC(NIST) oscila en el intervalo 6×10^{-15} para tiempos de promediación de 5 días (tiempos cortos) y 7×10^{-16} para tiempos de promediación de varios meses (tiempos largos), la estabilidad del UTC(NRC) toma valores en el intervalo 2×10^{-14} para tiempos cortos y 2×10^{-15} para tiempos largos, finalmente la estabilidad del UTC(PTB) oscila entre los valores 2×10^{-13} para tiempos cortos y 2×10^{-14} para tiempos largos. Recuerdese que la esatbilidad del UTC(CENAM) oscila en el intervalo 1.7×10^{-15} para tiempos cortos y 4×10^{-15} para tiempos largos. Es interesante observar

que existe una diferencia de aproximadamente un orden de magnitud entre la estabilidad del UTC(NIST) y las estabildad del UTC(CENAM) y del UTC(NRC), y de dos ordenes de magnitud respecto al UTC(PTB). La razón de estas diferencias estriva en el hecho de que la escala de tiempo el UTC(NIST) es generada con la contribución de aproximadamente 20 patrones primarios de frecuencia comerciales, un patrón primario de frecuencia no comercial y 5 máseres de hidrógeno [10], mientras que las escalas de tiempo UTC(CENAM), UTC(NRC) y UTC(PTB) son producidas con la contribución de un solo patrón primario de frecuencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han abordado los conceptos sobre las escalas de Tiempo TA y UTC. Se ha mostrado el mecanismo de generación de la escala de tiempo UTC producida por el Centro Nacional de Metrología, el UTC(CENAM). De igual manera, se mostraron los mecanismos de diseminación a nivel nacional e internacional del UTC(CENAM). Así mismo se han presentado los resultados de la comparación permanente mantenida entre el UTC(CENAM) y el UTC. Se ha hecho un análisis de la estabilidad del UTC(CENAM) mostrando que la estabilidad de esta escala de tiempo oscila en el intervalo comprendido entre $1,7 \times 10^{-14}$ y 4×10^{-15} . Estos límites de estabilidad corresponden a tiempos de promediación de 5 días y cuatro meses, respectivamente. Se ha hecho una comparación del desempeño del UTC(CENAM) respecto a las escalas de tiempo UTC(NIST), UTC(NRC) y UTC(PTB) encontrando como resultado que las estabildades del UTC(CENAM) y UTC(NRC) son muy similares, mientras que la estabilidad del UTC(PTB) presenta una inestabilidad mayor que la del CENAM y el NRC por un orden de magnitud aproximadamente. De igual manera el análisis de estabilidad del UTC(NIST) muestra que esta escala de tiempo es un orden de magnitud más estable que la del UTC(CENAM) y el UTC(NRC) y dos ordenes de magnitud mas estable que la del UTC(PTB) aproximadamente. La causa de estas diferencias estriva en el hecho de que el UTC(NIST) es generado con la contribución de 20 patrones primarios de frecuencia comerciales, 1 patrón primario de frecuencia no comercial y 5 máseres de hidrógeno, mientras que las escalas de tiempo UTC(CENAM), UTC(NRC) y UTC(PTB) son generadas por un solo patrón primario de frecuencia.

Los resultados de evaluación del UTC(CENAM) a cinco años de iniciada su generación muestran que las características metrológicas de esta escala de

tiempo en cuanto exactitud, mejor que 2 partes en 10^{13} , y su estabilidad, mejor que 2 partes en 10^{14} , soportan las necesidades mas demandantes del país en sincronía y medición de frecuencia las cuales se encuentran en el sector de las telecomunicaciones.

Dada la rápida incorporación de nuevas tecnologías en el sector de las telecomunicaciones se preveé que en los próximos años la exactitud y estabilidad actualmente presentes en el UTC(CENAM) no sean suficientes para soportar las demandas del país. En este sentido, la División de Tiempo y Frecuencia trabaja en la implementación de un algoritmo para generar el UTC(CENAM) con la contribución de todos los osciladores de alta exactitud mantenidos en operación en el CENAM incluido los patrones primarios de frecuencia diseñados y construidos en esta División. Se estima que con estas acciones el UTC(CENAM) mejore tanto la exactitud como la estabilidad por un factor cercano a diez.

REFERENCIAS

- [1] 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967.
- [2] C. Salomon et al, "Laser cooling of Cesium atoms below 3 μK ", *Europhys. Lett.*, **12** (8), pp. 683-688 (1990)
- [3] Terry J. Quinn, "The BIPM and the accurate measurement of time", *Proceedings of the IEEE*, Vol. **79**, No 7, July 1991
- [4] International Earth Rotation Service (IERS), Observatoire de paris 61, avenue de l'Observatoire – 75014 Paris, Francia.
- [5] Ver decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 01 de febrero del 2001.
- [6] J. M. López-Romero et al, "First year results of the international comparison of UTC(CENAM)", *Memorias del 1997 International Frequency Control Symposium*, Orlando, Florida, EUA.
- [7] Consultar página web del CENAM www.cenam.mx
- [8] Para mayor información sobre el servicio de diseminación de tiempo por radio ver www.lahoraexacta.com
- [9] D. W. Allan et al, "Accuracy of international time and frequency comparisons via Global Positioning System satellites in common-view", *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements*, Vol. **IM-34**, June 1985 pp. 118-125.
- [10] Marc A. Weiss and Thomas P. Weissert, "TA2, a time scale algorithm for post-processing: AT1 plus frequency variance", *Metrologia*, Vol. **28**, (1991), pp. 65-74.