

# EL UTC(CNM): DESEMPEÑO Y PERSPECTIVAS DE MEJORA

J. M. López-Romero, E. Marquina-Cruz, F. Jiménez-Tapia  
Centro Nacional de Metrología (CENAM), División de Tiempo y Frecuencia  
km 4.5 Carretera a los Cues, El marques, Querétaro, México  
01 (442) 211 0543, jlopez@cenam.mx

**Resumen:** La escala de Tiempo Universal Coordinado que mantiene el CENAM, UTC(CNM), es por mucho la mejor escala de tiempo de México y es comparable a las mejores escalas de tiempo del mundo. En este trabajo se presentan y discuten las principales características metrológicas del UTC(CNM) así como los resultados de su comparación internacional durante el año 2001 con otros 45 laboratorios en coordinación con el BIPM. Se discute el algoritmo implementado en el CENAM para generar una nueva escala de tiempo promediada con el objeto de mejorar el desempeño del UTC(CNM) aumentando su estabilidad y su inmunidad a fallas de equipo.

## INTRODUCCIÓN

La División de Tiempo y Frecuencia del Centro Nacional de Metrología, CENAM, genera y distribuye la escala de tiempo de mayor exactitud en México, el Tiempo Universal Coordinado del CENAM, UTC(CNM). Desde Marzo de 1996 el UTC(CNM) participa a nivel internacional en la generación de la escala de Tiempo Universal Coordinado internacional, UTC, con otros 45 laboratorios coordinados por el *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM). La escala de tiempo UTC(CNM) constituye el primer eslabón en la cadena de sincronía a nivel nacional y representa una ventaja competitiva para el desarrollo tecnológico nacional.

En este trabajo hacemos una breve introducción a la definición del UTC y a la realización del UTC en el CENAM, el UTC(CNM). Así mismo se presenta la técnica usada en la comparación internacional del UTC(CNM) y los resultados obtenidos durante el año 2001. Se aborda el problema de la mejora del UTC(CNM) por medio de la generación de escalas de tiempo promediadas y se describe el algoritmo que el CENAM utiliza para la generación de dicha escala de tiempo con el objeto de generar una escala de tiempo con muy alta estabilidad y mayor inmunidad a fallas de equipo.

## EL UTC Y EL UTC(CNM)

La unidad de tiempo, el segundo, está definida en términos de la separación energética de los niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio-133 [1]. Al segundo así definido se le suele llamar segundo atómico. La escala de tiempo resultante de la acumulación de segundos atómicos se le llama

Tiempo Atómico (AT). Oficialmente la escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI) fue definida en la 14ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1971 y se hizo coincidir con el Tiempo Universal (UT1) a las cero horas de enero de 1958 [2]. Con el objeto de considerar efectos relativistas, esta escala de tiempo está formada por segundos atómicos reproducidos al nivel del mar. Es importante resaltar que la escala de tiempo TAI es independiente de los movimientos de rotación y traslación de la tierra. En la actualidad el BIPM es el organismo responsable de generar el TAI con la contribución de 45 laboratorios a nivel internacional, el CENAM incluido. No obstante que la escala de tiempo TAI es una escala de tiempo de muy alta exactitud, desde 1958 a la fecha la diferencia de tiempo acumulada entre el TAI y el UT1 es de 32 segundos aproximadamente, esto es  $TAI-UT1 \approx 32$  segundos. Esta diferencia es un indicativo de una diferencia sistemática entre la duración del segundo atómico y el segundo astronómico la cual es del orden de 2,3 partes en  $10^8$ , es decir el segundo atómico es ligeramente menor en duración al segundo astronómico (en partes en  $10^8$ ). Es importante mencionar que la razón de incremento en la diferencia TAI-UT1 no es constante, de hecho la no constancia en esta razón de incremento se debe a la falta de uniformidad en la velocidad de rotación de la tierra. La dinámica en la redistribución de masas en el planeta tierra es de manera que el momento de inercia de la tierra es impredecible al nivel de partes en  $10^9$ ; esta fina aleatoriedad en la redistribución de masas es responsable de que la velocidad angular de la tierra no sea constante (y tampoco predecible al nivel de partes en  $10^9$ ). Por estas razones, en 1972 se introdujo a nivel internacional la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC), la cual tiene el objetivo de

proveer de una referencia para la medición de tiempo (sincronía) de muy alta exactitud en fase con los movimientos de rotación de la tierra. Las ecuaciones que definen al UTC son dos, a saber:

$$|UTC - UT1| \leq 0,9 \text{ s} \quad (1)$$

$$UTC = TAI + n \quad (2)$$

donde  $n$  es un número entero de segundos. El UTC está formado por segundos atómicos (ecuación 2) y corregido eventualmente por segundos bisiestos con el objeto de hacer cumplir la ecuación (1). De hecho la inserción de segundos bisiestos en el UTC se realiza, en orden de prioridad, a las 24h00 UTC el 31 de diciembre, o el 30 de junio o en cualquier otra fecha. Al momento de escritura de este artículo  $n = -32$  segundos. El organismo internacional responsable de asegurar la validez de la ecuación (1) es el *International Earth Rotation Service* (IERS) mientras que el BIPM es el responsable de mantener la ecuación (2).

La escala de tiempo UTC es una escala de tiempo virtual en el sentido de que es el resultado de un algoritmo que combina las mediciones de tiempo realizadas en 45 laboratorios alrededor del mundo, es decir, no existe una señal física (única) que defina al UTC. Por esta razón las escalas de tiempo mantenidas en los 45 laboratorios participantes son de suma importancia en las aplicaciones prácticas. Las escalas de tiempo locales se denotan como UTC(k), donde k es el acrónimo del laboratorio, por ejemplo k=CENAM para el caso del Centro Nacional de Metrología. El algoritmo (ALGOS) implementado por el BIPM en la generación del UTC opera de manera que los resultados se conocen un mes después del evento, por esta razón las realizaciones locales del UTC, UTC(k), son en cierto sentido predicciones del UTC. Las escalas de tiempo UTC(k) son escalas de tiempo reales (no virtuales) en el sentido de que existen señales físicas (eléctricas, por ejemplo un pulso por segundo) que las definen.

El UTC(CNM) es una escala de tiempo real generada por un conjunto de relojes atómicos que se mantienen en operación continua en los laboratorios de la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM. Un reloj (llamado Reloj Maestro) se mantiene en una comparación interna con todos los otros relojes del CENAM con el objeto de medir en tiempo real el desempeño de cada uno de ellos, esta comparación se hace por medio de la técnica

denominada Comparación de Fase por Doble Mezclador [3]. Bajo este esquema se realiza una medición de fase de las señales de 5 MHz de cada par de relojes cada segundo, las 24 horas del día, todos los días. Con esta medición es posible estimar la estabilidad en frecuencia de cada reloj y conocer su desempeño en tiempo real. Adicionalmente el Reloj Maestro se mantiene en una comparación internacional con otros 45 laboratorios utilizando la técnica de vista común usando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

## VISTA COMUN DEL SISTEMA GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [4] es un sistema satelital diseñado y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para fines de navegación. El sistema GPS consta de 24 satélites distribuidos en 6 orbitas (4 satélites por órbita) semisíncronas de periodos de 11h58 minutos con 55° de inclinación y 22,000 km de radio (4.2 veces el radio de la tierra). Transmite en dos portadoras en la banda L, a 1.57542 GHz y a 1.2276 GHz en espectro disperso lo cual hace que la transmisión sea resistente a interferencias naturales e inducidas permitiendo que la señal de los satélites esté siempre presente. El diseño del sistema GPS es tal que en cualquier momento en cualquier parte del mundo se tienen a la vista por lo menos 4 satélites. Los satélites llevan a bordo dos relojes atómicos de Cesio y dos relojes atómicos de rubidio. Entre las múltiples aplicaciones del GPS se encuentra la de medición de tiempo ya que el sistema opera bajo principios de sincronía. Parte importante de la información que envían los satélites es el tiempo de la escala *GPS-time*, la cual es una escala de tiempo propia del sistema, definida por un pulso por segundo.

La técnica denominada *vista común del sistema GPS*, la cual es usada para la comparación de escalas de tiempo generadas por dos laboratorios A y B, consiste en: i) cada laboratorio (A y B) realiza mediciones de diferencia de tiempo, simultáneamente, con el mismo satélite, ii) tener una agenda común de observaciones, iii) intercambio de información. Supóngase que las mediciones de diferencia de tiempo  $\Delta t_{A-S}$  al tiempo  $t$  que realiza el laboratorio A con el satélite S son

$$\Delta t_{A-S}(t) = T_A(t) - T_{GPS}(t) - D_A \quad (3)$$

donde  $T_{GPS}(t)$  es el tiempo del sistema GPS al tiempo  $t$ ,  $T_A(t)$  es el tiempo del laboratorio A al

tiempo  $t$  y  $D_A$  es la suma de retardos en la propagación de la señal del satélite S. De manera similar, las mediciones que realiza el laboratorio B pueden expresarse como:

$$\Delta t_{B-S}(t) = T_B(t) - T_{GPS}(t) - D_B \quad (4)$$

Tomando las diferencias de las mediciones del laboratorio A y del laboratorio B se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \Delta T_{A-B}(t) &= \Delta T_{A-S}(t) - \Delta T_{B-S}(t) \\ &= T_A(t) - T_B(t) - (D_A - D_B) \end{aligned} \quad (5)$$

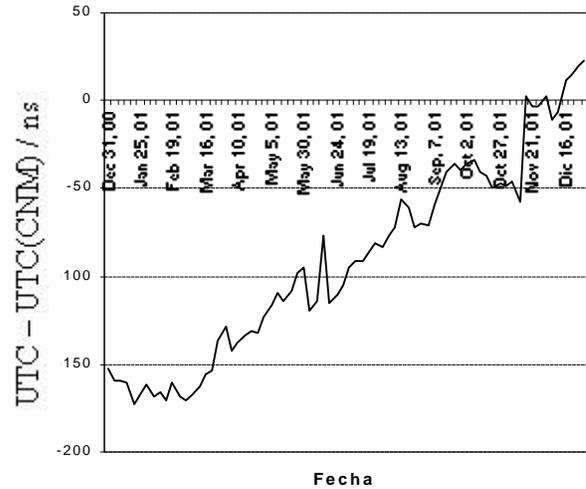
Es decir, la contribución del GPS se cancela (al nivel de los nanosegundos) y permanecen las diferencias de tiempo entre los laboratorios A y B. Los retardos  $D_A$  y  $D_B$  son función de la posición de los satélites al momento de la comparación, así como de la posición de los laboratorios (de las antenas) y de los retardos internos de cada receptor GPS. Con esta técnica es posible hacer comparaciones de escalas de tiempo entre pares de laboratorios con exactitudes del orden de los nanosegundos.

El itinerario del BIPM para las observaciones del sistema GPS con el objeto de realizar comparaciones por la técnica de Vista común es publicado por ese organismo. Los resultados de las mediciones del CENAM respecto al sistema GPS (ecuación 3) son públicos y pueden ser consultados en la página Web del CENAM [5].

## RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN INTERNACIONAL DEL UTC (CNM)

Usando la técnica de vista común del sistema GPS, el UTC(CNM) se ha mantenido en comparación internacional ininterrumpida con otros 45 laboratorios desde marzo de 1996 hasta la fecha. Los resultados de la comparación internacional son públicos y pueden consultarse en la circular T del BIPM o en la referencia [6] para un análisis de los resultados hasta 1997, mientras que en la referencia [7] puede encontrarse una discusión del desempeño del UTC(CNM) hasta el año 2000. En este trabajo se muestran y discuten los resultados de la comparación internacional para el periodo enero-diciembre del 2001. En la figura 1 se muestran los resultados de la comparación del UTC(CNM) con el

UTC tal como aparecen en la circular T del BIPM durante el periodo enero – diciembre del 2001 [7].

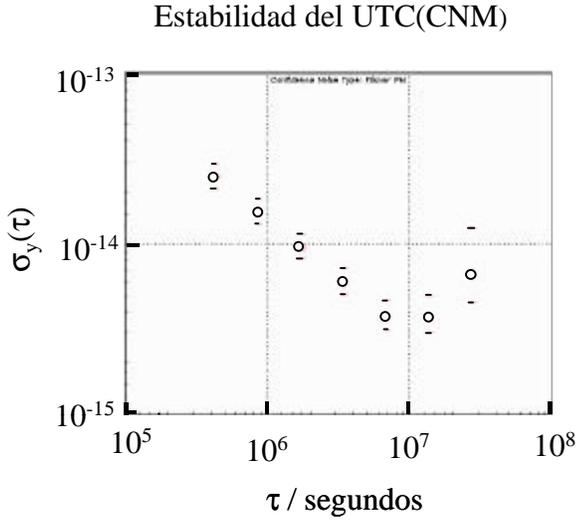


**Fig. 1** Diferencias de tiempo entre el UTC y el UTC(CNM) publicados en la circular T del BIPM para el periodo enero-diciembre del 2001.

Ajustando una recta a los resultados mostrados en la figura 1 se obtiene una pendiente  $m$  igual a  $+6 \times 10^{-15}$ . Por otro lado, es fácil demostrar que los cambios fraccionales de frecuencia  $\frac{\Delta u}{u}$  en un oscilador que opera como reloj están relacionados con las diferencias fraccionales de tiempo  $\frac{\Delta t}{t}$  que produce ese reloj por la siguiente ecuación:

$$m = -\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta t}{t} \quad (6)$$

En el caso particular de las mediciones mostradas en la figura 1, la diferencia fraccional de frecuencia promedio entre el reloj maestro del CENAM y la frecuencia asociada al UTC es de 7 partes en  $10^{15}$  durante el año 2001. En un análisis mucho más completo basado en la estimación de la estabilidad del UTC(CNM) durante ese mismo año usando como estimador la desviación de Allan [8], se obtienen los resultados mostrados en la figura 2.



**Fig. 2** Estabilidad en frecuencia del UTC(CNM).

La estabilidad en frecuencia del UTC(CNM) es de  $3 \times 10^{-14}$  para tiempos de promediación de cinco días ( $\tau = 4.32 \times 10^5$  segundos) y mejora hasta  $3 \times 10^{-15}$  para tiempos de promediación cercanos a 4 meses ( $\tau = 10^7$  segundos), más aún, en el intervalo  $4.32 \times 10^5 \text{ s} < \tau < 10^7 \text{ s}$  la desviación de Allan  $\sigma_y(\tau)$  puede ser aproximada por:

$$s_y(t) \approx \frac{1.5 \times 10^{-11}}{t^{1/2}}. \quad (7)$$

Mientras que en el intervalo  $10^7 \text{ s} < \tau < 3 \times 10^7 \text{ s}$  la desviación de Allan se puede escribir de manera aproximada como:

$$s_y(t) \approx 3 \times 10^{-22} t. \quad (8)$$

## PERSPECTIVAS DE MEJORA

Hasta la fecha el UTC(CNM) ha sido generado con la contribución de un sólo reloj atómico (Reloj Maestro) mientras que un conjunto de  $N$  ( $2 \leq N \leq 6$ ) relojes atómicos ha servido como "rueda de inercia" (*fligh wheel*) con el objeto de asegurar la continuidad del UTC(CNM) en caso de falla del reloj Maestro. Este esquema en la generación del UTC(CNM) ha cumplido su cometido

manteniendo la continuidad y calidad metrológica del UTC(CNM). Sin embargo, se trabaja en un nuevo esquema para la generación del UTC(CNM) con el objeto de mejorar la estabilidad en frecuencia así como mejorar los impactos sobre el desempeño de la escala de tiempo por eventuales fallas en el Reloj Maestro, este nuevo esquema contempla la generación del UTC(CNM) por medio de un algoritmo que combina de manera óptima las características metrológicas de los  $N$  relojes atómicos que operan en el CENAM el cual es similar al discutido en la referencia [9]. Se espera que una escala de tiempo promediada tenga mayor fiabilidad, mayor estabilidad y exactitud en frecuencia que cualquiera de los relojes participantes en la generación de dicha escala. El algoritmo usado en el CENAM es de alguna manera una aproximación a éste ideal.

El algoritmo, que al momento de escritura de este artículo, se encuentra en etapa de pruebas opera de la siguiente manera.

Denotemos por  $x_i(t)$  a la diferencia de tiempo medida entre el reloj  $i$ -ésimo y la escala promediada al tiempo  $t$ . De esta manera, la diferencia de tiempo entre el reloj  $i$ -ésimo y la escala al tiempo  $t + \tau$  puede predecirse por medio de la ecuación

$$\bar{x}_i(t + \mathbf{t}) = x_i(t) + \left( y_i(t) + \frac{Dt_i}{2} \right) \mathbf{t} \quad (9)$$

donde  $y_i(t)$  y  $D_i$  son la frecuencia y la desviación en frecuencia del reloj  $i$ -ésimo respectivamente, calculada en la iteración al tiempo  $t$ . La corrección  $x_i(t + \mathbf{t})$  a la predicción  $\bar{x}_i(t + \mathbf{t})$  puede hacerse al momento en que están disponibles las mediciones  $x_{ij}(t + \mathbf{t})$  de diferencia de tiempos entre el reloj  $i$  y el reloj  $j$  al tiempo  $t + \tau$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$x_i(t + \mathbf{t}) = \sum_{j=1}^N w_j [\bar{x}_j(t + \mathbf{t}) - x_{ji}(t + \mathbf{t})] \quad (10)$$

Donde  $w_j$  es el peso estadístico asociado al reloj  $j$ -ésimo. La asignación de pesos a cada uno de los relojes del ensamble puede hacerse de acuerdo a la ecuación:

$$w_i \propto \frac{1}{s_y(t)} \quad (11)$$

donde  $\alpha$  indica proporcionalidad. Esto es, los pesos pueden ser asignados de manera que se privilegie aquellos relojes que tienen mejor estabilidad sobre los de menor estabilidad. En la metrología de tiempo y frecuencia se da el caso de osciladores con muy buena estabilidad a corto plazo pero mala estabilidad a largo tiempo (como los relojes atómicos de rubidio) o relojes que tienen excelente estabilidad a largos plazos pero a cortos plazos pueden ser superados por otro tipo de relojes (este es el caso de los relojes atómicos de Cesio). El factor de normalización para los pesos puede definirse de manera que:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^N w_j}{s_y(t)} \quad (12)$$

Las mediciones de diferencia de tiempo en las dos últimas iteraciones pueden ser usadas para definir la frecuencia promedio del reloj  $i$ -ésimo en el intervalo  $t$  y  $t+\tau$  como:

$$\bar{y}_i(t+\tau) = \frac{x_i(t+\tau) - x_i(t)}{\tau} \quad (13)$$

la corrección  $y_i(t+\tau)$  a la estimación  $\bar{y}_i(t+\tau)$  puede ser hecha usando la corrección de la iteración anterior  $y_i(t)$  en un filtro exponencial de acuerdo a la siguiente expresión

$$y_i(t+\tau) = \frac{\bar{y}_i(t+\tau) + m_i y_i(t)}{1 + m_i}, \quad (14)$$

donde la constante  $m_i$  es calculada de los parámetros de ruido del reloj  $i$ -ésimo.

## CONCLUSIONES

Se han presentado en este trabajo los resultados de la comparación internacional del UTC(CNM) mantenida durante el año 2001 con el UTC utilizando la técnica de vista común de los satélites GPS. Se ha presentado un análisis de la estabilidad relativa entre el UTC(CNM) y el UTC, encontrando que la estabilidad del UTC(CNM) es mejor que 3 partes en  $10^{14}$  para tiempos de promediación mayores de 5 días y menores que un año, mientras que la mejor estabilidad, la cual es de 3 partes en  $10^{15}$ , se tiene para tiempos de promediación cercanos a 4 meses. Se han esbozado hasta aquí las principales relaciones que definen el algoritmo

que el CENAM emplea para probar las cualidades metrológicas de una nueva escala de tiempo promediada para definir el UTC(CNM). En una publicación posterior se abordará exclusivamente el algoritmo aquí esbozado y las propiedades metrológicas de la escala de tiempo así generada.

## REFERENCIAS

- [1] J. Vanier, C. Audoin, "The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards", Ed. Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1994.
- [2] H. Montague Smith, "International Time and Frequency Coordination", Proc. of the IEEE, Vol. 60, No. 5, May 1972.  
Un interesante artículo que discute las escalas de tiempo astronómico es: Jean Kovalevsky, "Astronomical Time", Metrologia, Vol 1, No. 4, 1965.
- [3] S. R. Staain, "Frequency and Time – Their Measurement and Characterization", Precision Frequency Control, Vol 2, Ed. E.A. Gerber and A. Ballato, Academic Press, New York, 1985.
- [4] Una guía general introductoria al sistema GPS puede encontrarse en: "Guide to GPS Positioning", Editado por la Canadian GPS Associates, 1986.  
Una referencia para el uso del sistema GPS en transferencia de tiempo es: W. Lewandowski, C. Thomas, "GPS Time Transfere", Proc. Of the IEEE, Vol. 79. No. 7, Julio 1991.
- [5] [www.cenam.mx - /sitio/FTP/Semestral/2002/](http://www.cenam.mx - /sitio/FTP/Semestral/2002/)
- [6] J. M. López et al, "First year results of the international comparison of UTC(CNM)", Proc. ff the IEEE International Frequency Control Symposium, 1997, pp. 404-407.
- [7] J. M. López, F. Jiménez T. "Cinco años de comparación internacional UTC(CNM) Vs UTC: Asegurando la generación de una escala de tiempo de clase mundial para México", Memorias Simposio de Metrología 2001, pp. B1-1 – B1-5.
- [8] D. W. Allan, "Statistics of atomic frequency standards", Proc IEEE, Vol. 54, Feb. 1966, pp.221-230
- [9] M. Weiss, T Weissert, "AT2, A new time scale algorithm: AT1 plus frequency variance", Metrologia 1991, Vol. 28, pp. 65-74.