

Desarrollo del Tiempo Universal Coordinado en Panamá

Raúl F. Solís B.

*Centro Nacional de Metrología de Panamá AIP.
Laboratorio de Tiempo y Frecuencia
rsolis@cenamep.org.pa*

Resumen- *La metrología es la ciencia de las mediciones que intervienen directamente en la calidad y competencia de los productos y servicios y, por ello, como parte de una estrategia de lograr el reconocimiento internacional desde el punto de vista metroológico, el Centro Nacional de Metrología de Panamá, adquirió dos patrones atómicos de tiempo de Cesio 133, lo cuales se han comparado con otros relojes atómicos de igual o mejor nivel mediante la red de posicionamiento global desde el año 2003. La realización local del tiempo universal coordinado es comparada cada segundo por los 365 días del año de manera ininterrumpida con los más de 70 laboratorios de tiempo y frecuencia alrededor del mundo, y es coordinada por el Buró Internacional de Pesas y Medidas, y de manera regional el Sistema Interamericano de Metrología.*

El objetivo de este trabajo es el establecimiento de una referencia primaria de tiempo a nivel nacional con la cual se establecieron las bases para el desarrollo de investigaciones y servicios de calibración que requiriesen patrones de alto nivel para una economía de servicios. Los resultados muestran como en los últimos años se ha logrado reconocimiento tanto a nivel nacional como a nivel internacional y se ha comenzado a generar un marco regulatorio de las actividades basadas en el uso de la hora universal coordinada. Finalmente este artículo muestra el trabajo continuo que se ha realizado en los últimos años en el desarrollo del laboratorio y el cómo nos ha permitido establecer las bases para desarrollar nuevas áreas de trabajo y cooperación científica, industrial y legal tanto nacional como internacional.

Palabras Claves - *CENAMEP, frecuencia, metrología, tiempo, reloj atómico, UTC (CNMP), Tiempo Universal Coordinado.*

Abstract - *Metrology is the science of measurement that is directly involved in the quality and competence of the products and services and for this as a part of the strategy to achieve international recognition in the metrological field, the National Metrology Center of Panama, acquired two Cesium 133 atomic time standards, which have been compared with another atomic clocks of the same or better level through the global positioning system since 2003. The local realization of the Universal Time Coordinated is compared every second for the 365 days in the year without interruption with the another 70 laboratories of time and frequency around the world, and is coordinated by the International Bureau of Weights and Measures, and the regionally Inter-American Metrology System.*

The objective of this work is the establishment of a national primary time reference which establish the basis for research and the development of calibration services that required high-level standards for an economy based in services. The results show that

in recent years has been obtaining national and international recognition and has begun to create a regulatory framework for the activities that use the universal time coordinated. Finally, this paper shows the continuing work that has been made in recent years in the developing of the laboratory and how has allowed us to establish the basis for new areas of work and cooperation in the scientific, industrial and law area, both nationally and internationally.

Key words - *Atomic clock, CENAMEP, frequency, metrology, time, UTC(CNMP), Universal Time Coordinated.*

Tipo de Artículo: *Original*

Fecha de Recepción: *19 de agosto de 2011*

Fecha de Aceptación: *12 de enero de 2012*

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1970, llegó la era atómica del tiempo con la definición del segundo en base a la transición atómica del átomo de Cesio 133 [1]. Con esta nueva definición del segundo, se establece el Tiempo Universal Coordinado o UTC, el cual es coordinado por el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) mediante la implementación de una escala de tiempo ponderada sostenida por los cerca de 70 laboratorios de tiempo y frecuencia alrededor del mundo (En la Figura 1 se muestran las localizaciones de los laboratorios participantes), y los datos de las comparaciones son obtenidos mediante el método de comparación por vía vista común (Figura 2) de las señales de tiempo de los distintos laboratorios participantes suscritos al Acuerdo de Reconocimiento Mutuo [2] los cuales se denominan como UTC(k), y reportando los datos de la comparación en el Día Juliano Modificado (MJD) terminado en 4 ó 9.

En Panamá, la realización y el mantenimiento del tiempo atómico se introdujo en septiembre del año 2003, bajo la administración de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, la cual pensando que la introducción de una referencia de tiempo de alta estabilidad sería de fundamental importancia estratégica para un país basado en los servicios, adquirió dos patrones atómicos de Cesio 133 de bajo desempeño.

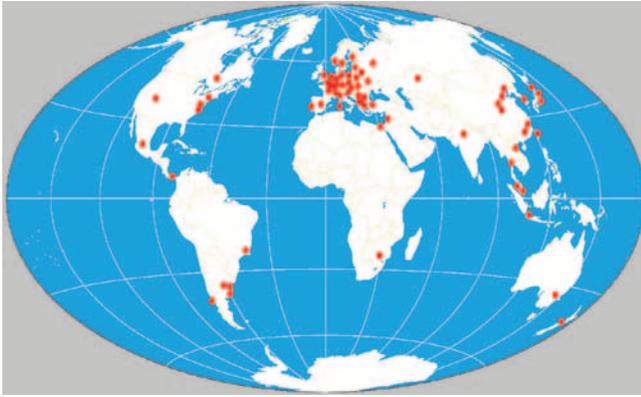


Figura 1. Ubicación de los relojes participantes en el desarrollo de UTC.

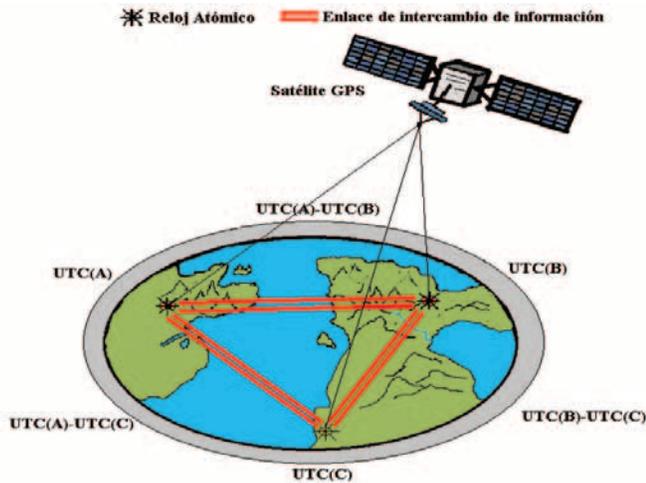


Figura 2. Esquema de la comparación por vista común.

En octubre de 2003, se designó a unos de los dos relojes atómicos como el reloj maestro y el segundo reloj como el testigo, y se procedió a enviar datos a la sección de tiempo del BIPM sobre las comparaciones realizadas [3] mediante el Time Transfer System versión 2 (TTS-2). Por la falta de experiencia en el manejo de relojes atómicos, estas comparaciones se basaron en mantener la estabilidad del reloj maestro y no su exactitud ya que el resultado de este tipo de comparaciones se obtenían una vez al mes mediante la Circular T, y esto requería de un trabajo de predicción del comportamiento de la señal bastante avanzado, por lo que se acumularon hasta noviembre de 2006 aproximadamente 6 000 ns (Figura 3).

Por el hecho de tener comparaciones con el BIPM (las cuales solo se puede participar con patrones atómicos de Cesio o de mejor estabilidad), y además de ser el primer laboratorio del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) en el área de tiempo y frecuencia en

publicar sus capacidades de medición y calibración [4], hizo que Canadá, Estados Unidos y México, donaran a Panamá un nuevo sistema receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global por sus siglas en inglés) multi-canal, lo que resultó en que fuimos el cuarto país en incorporarse al proyecto de un nuevo sistema de comparaciones por vista común con procesamiento de datos en tiempo real, que permitiría sincronizar los patrones de tiempo y frecuencia de todo el continente americano [5], sin importar su naturaleza (pudiendo incorporar patrones atómicos de rubidio) dentro del proyecto llamado SIM Time and Frequency Network (SIMTFN) [6].

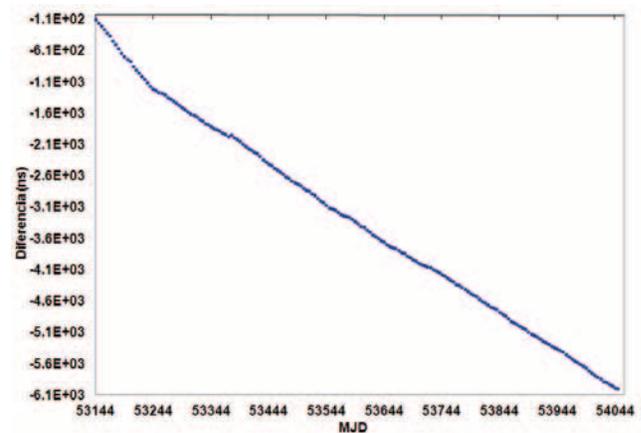


Figura 3. Comportamiento entre las fechas 52914 y 54049.

Con este nuevo sistema, se podía obtener la diferencia de tiempo entre nuestro reloj maestro con los laboratorios de la red con en tan solo 10 minutos, a diferencia del mes que había que esperar para obtener los resultados en la Circular T. Esto incorporó la ventaja de que se pueda conocer en corto plazo la estabilidad y exactitud, lo que permite realizar correcciones en la frecuencia del reloj maestro mejorando los niveles de exactitud, pero llegando a sacrificar la estabilidad si la corrección es muy grande o se realizan en repetidas ocasiones en cortos plazos de tiempo.

Al poseer los dos sistemas de comparaciones y un historial de mediciones equivalente entre ambos sistemas [7], se pudo llegar al empleo de lo mejor de ambos sistemas de comparaciones. Utilizando el TTS-2 se realizan comparaciones con los laboratorios alrededor del mundo, con lo que se obtienen mejores lecturas de estabilidad a largo plazo, y al utilizar el SIMTFN se puede seguir el comportamiento del reloj maestro para

mejorar los niveles de exactitud a corto plazo usando la metodología de una red de comparación redundante.

Esto mejora la participación de los laboratorios latinoamericanos que no tienen mucha experiencia en el área del mantenimiento del tiempo [8] de manera pública o civil. En noviembre de 2006 se procedería a realizar la primera corrección en la frecuencia del reloj maestro para lograr reducir la diferencia y cumplir con lo recomendado por el BIPM de mantener una diferencia de tiempo menor a ± 100 ns [9].

Gracias al trabajo técnico desarrollado por el laboratorio, se logró obtener la confianza de la capacidad en el desarrollo de la hora, por lo que el Ministerio de Comercio e Industrias declaró a los relojes atómicos como los Patrones Nacionales de Tiempo y Frecuencia [10]. Con la base legal en que CENAMEP poseía los patrones de tiempo y frecuencia de mayor jerarquía en el país, la Autoridad Nacional para la Innovación Gubernamental establecía que la hora sostenida por los relojes sería la Hora Oficial para el Gobierno Nacional [11].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la definición local del segundo, es necesario contar con un oscilador de Cesio 133 para que se cumpla la definición teórica y un sistema de recepción GPS para realizar comparaciones por vista común para comparar la definición local del segundo. Como elementos auxiliares se requieren cables caracterizados, distribuidores de frecuencia y de tiempo, sistemas de acondicionamiento de aire, computadora para comunicarse con los servidores de datos fuera del país y un buen respaldo energético para los patrones de tiempo. Los equipos que posee el CENAMEP para realizar y mantener el segundo de manera local son los siguientes:

- **Patrón Atómico de Tiempo:** Son dos relojes atómicos de Cesio 133 de bajo desempeño, cuyo tubo tiene una vida útil no menor a 10 años, según lo declarado por el fabricante. Su exactitud inicial es de $\pm 1E-12$ Hz/Hz y tiene un ruido piso en 5 días de 5E-14Hz/Hz. Estos son realmente patrones duales ya que poseen una referencia de tiempo en la señal de 1 Pulso Por Segundo (PPS) y una referencia de frecuencia de 10 MHz.
- **TTS-2:** Sistema de recepción GPS de 8 canales, que compara la señal de 1 PPS proveniente del reloj maestro con la señal de 1 PPS que proviene de cada

satélite visto, y los datos los guarda bajo el formato establecido por el BIPM. Los datos se extraen manualmente cada 7 días a partir de cada lunes a las 0 horas UTC y son enviados antes de tres días al servidor en Francia. Su resolución es de 0,1 ns.

- **SIMTFN:** Sistema de recepción GPS de 8 canales, que compara la señal de 1 PPS proveniente del reloj maestro con la señal de 1 PPS que proviene de cada satélite visto, y los datos los guarda bajo el formato establecido el grupo de tiempo y frecuencia del Sistema Interamericano de metrología. Los datos se extraen automáticamente cada 10 minutos y posteriormente son enviados a servidores en Estados Unidos, México y Canadá. Su resolución es de 0,01 ns.
- **Distribuidor de frecuencia:** sistema que toma la señal de 10 MHz provenientes del patrón atómico y multiplica las salidas mediante amplificadores de muy bajo ruido y poca distorsión. Con ello se protege la salida del patrón frente a corto circuitos y se obtienen más salidas de 10 MHz para conectarlas a otros equipos que requieran esta señal de frecuencia.
- **Distribuidor de tiempo:** sistema que toma la señal de 1 PPS provenientes del patrón atómico y multiplica las salidas mediante amplificadores de muy bajo ruido y poca distorsión. Con ello se protege la salida del patrón frente a corto circuitos y se obtienen más salidas de 1 PPS para conectarlas a otros equipos que requieran esta señal de tiempo.
- **Respaldo energético:** Es un arreglo de baterías de bajo mantenimiento y un sistema de alimentación ininterrumpida con la tecnología de doble conversión que filtra la señal AC de la línea. Entre las baterías y el respaldo se tienen cerca de 3 días para los patrones atómicos.
- **Cables:** tanto los cables para conectar los receptores con las antenas, como los cables que se emplean para distribuir las señales de 10 MHz y de 1 PPS están caracterizados en su retraso para poder realizar las correcciones pertinentes. Se utilizan actualmente los cables RG-58C y el LM-600.
- **Computadora:** es una computadora conectada a internet en la cual se guardan los datos provenientes del TTS-2. También tiene un cliente de servidor de red para enviar los datos a Francia.
Primero se conectaron los sistemas de respaldo y se verificó su funcionamiento. Después se procedió a

conectar las baterías a los relojes atómicos y a los sistemas de alimentación ininterrumpida. También se conectaron a los sistemas de alimentación ininterrumpida al TTS-2 y a los distribuidores. A continuación se procedió a conectar la señal de 1 PPS y de 10 MHz provenientes de los distribuidores a l TTS-2 y después se procedió a conectar la señal de 1 PPS y de 10 MHz provenientes del reloj maestro a los distribuidores de tiempo y de frecuencia. Una vez todo conectado se procedió a encender los equipos y ver como se comportaba el sistema conectado en todo su conjunto.

Antes de iniciar los procesos de comparaciones, se procedió a establecer las coordenadas geográficas mediante un sistema de posicionamiento geodésico por GPS (con una incertidumbre relativa de ±0,2 m en mediciones realizadas por 48 horas). Estas fueron las coordenadas resultantes:

- Latitud: 9° 0' 13,3087" Norte.
- Longitud: 280° 24' 56,4097" Este.
- Altura: 36,09 m.

Una vez establecidas las coordenadas geográficas e instalando las antenas, se procedió a configurar los receptores con respecto a las coordenadas obtenidas (un error de 1 metro representa un error de 3,34 ns en la medición teórica en el vacío), se procedió a corregir los datos de la medición con respecto a la calibración de los sistemas, del cual el TTS-2 [12] es el principal mecanismo para obtener trazabilidad y el SIMTFN entraría como una fuente secundaria para la trazabilidad. Los valores de la configuración están mostrados según la Tabla 1:

Tabla 1. Fuentes de retraso obtenidas de la calibración para el sistema TTS-2 y el SIMTFN.

Fuente	TTS-2	SIMTFN
Antena activa y su cable	205,1 ns	39,2 ns
Cable de referencia	27,8 ns	27,8 ns
Procesamiento	9,3 ns	7,5 ns

Después de configurar el TTS-2 se procedió a sincronizar al reloj maestro con la señal de tiempo proveniente de un generador de tiempo y frecuencia disciplinado por GPS, cuya incertidumbre total (incluyendo antena, cables y procesamiento de la señal) era de ±110 ns. Una vez sincronizado el reloj maestro se procedió con su señal de 1 PPS a sincronizar el reloj testigo.

Cuando ya se tenían el reloj maestro y el reloj testigo disciplinado, se procedió a empezar a realizar las comparaciones mediante el TTS-2. Los datos de las comparaciones con los satélites GPS se obtienen cada 7 días, y cuyos datos son analizados antes de enviarlos al servidor de archivos de la oficina de tiempo en el BIPM. De esta manera Panamá obtenía trazabilidad en tiempo y frecuencia para la realización primaria del segundo de manera local, con una diferencia de tiempo con respecto a UTC de manera acumulativa cercana a -10 ns/día con una incertidumbre de tiempo de 16,4 ns con un intervalo de confianza al 95%. Con esto se reconocía oficialmente la realización de UTC(CNMP) y su contribución con UTC y el Tiempo Atómico Internacional (TAI) frente al BIPM por parte de la República de Panamá.

Al haber establecido las capacidades de medición y calibración del laboratorio de tiempo y frecuencia frente al BIPM, se procedió a utilizar el sistema SIMTFN para establecer la forma en que se realizaban las correcciones directamente en la frecuencia del reloj maestro, que permite correcciones de frecuencia con pasos de ±6,3E-15 Hz/Hz. Antes de realizar la corrección se sincroniza nuevamente el reloj testigo para poder rescatar la diferencia de tiempo en caso de algún contrat tiempo. Esta corrección se estableció la primera vez para disminuir la diferencia de 5736,65 ns a un valor aproximado a 0 ns en un periodo de 30 días (Figura 4). El valor utilizado para realizar dicha corrección se calculó utilizando el desvío fraccional de frecuencia mostrado en la siguiente relación:

$$\frac{\Delta f}{f} = - \frac{\Delta t}{t} \tag{1}$$

$\frac{\Delta f}{f}$ Es el desvío fraccional de la frecuencia del oscilador.

$\frac{\Delta t}{t}$ Es el desvío fraccional del tiempo o la fase del oscilador.

El resultado del valor de la pendiente fue de 197,5 ns/día estableciéndose en el MJD 54052. En el MJD 54084 nuevamente se utilizó (1) para estimar el desvío de la frecuencia del oscilador atómico, y se le ingresó una pendiente de -6,7

ns/día para estabilizar diferencia de tiempo que mantenía y así estar dentro de la recomendación para el mantenimiento de UTC (Figura 4). Todas estas correcciones se le informaron a la oficina de tiempo del BIPM como parte de la responsabilidad del laboratorio frente al mantenimiento de las escalas de tiempo UTC y el TAI.

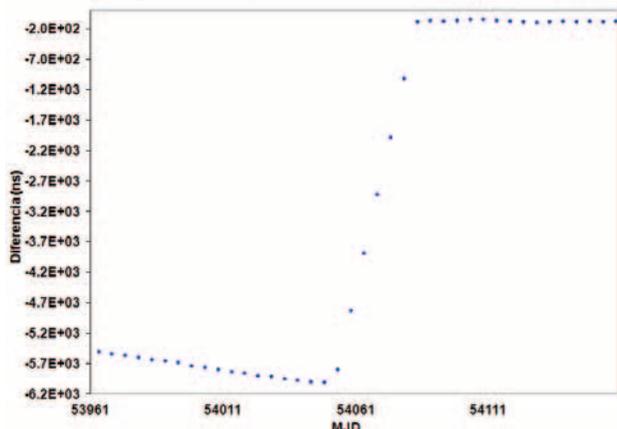


Figura 4. Comportamiento entre las fechas 53961 y 54160.

Esta variación de frecuencia hizo que la estabilidad del reloj maestro frente al BIPM cayera (la predictibilidad del reloj desapareció). Esto es porque el algoritmo que calcula UTC es afectado por variaciones de tiempo tan grandes por lo que se le bajaba el peso para evitar causar alteraciones en la estimación de UTC.

Con la diferencia de tiempo llevada a niveles aceptables, y después de corregir el error sistemático se procedió a establecer nuevamente la forma que se establecería las correcciones, las cuales serían llevadas para lograr la mayor relación entre la exactitud y la estabilidad del patrón para sostener la realización de UTC(CNMP). Estas correcciones se realizarían con la pendiente que mantuviera la diferencia de tiempo en un periodo de 20 días, cuando la diferencia de tiempo alcanzara los ± 90 ns con respecto a UTC.

En el momento que se llegara a la diferencia de tiempo establecida, se procedería a realizar la corrección siempre reportando a la oficina de tiempo sobre cualquier cambio, y siempre tratando que el valor no sobrepase el valor de $\pm 3,46$ ns/día (variación de frecuencia cercana a $\pm 4E-14$ Hz/Hz), empleando (1). Con la implementación de este mecanismo se pretende solo realizar correcciones

cada cuatro a cinco meses y así lograr disminuir el nivel de incertidumbre de la realización de UTC(CNMP).

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x)^2 \quad (2)$$

Donde:

- $\sigma_y^2(\tau)$: representa la varianza de Allan de la fase de la señal analizada en el tiempo de observación τ .
- N : representa el número de muestras utilizadas
- m : representa el factor de integración en el tiempo
- x_i : representa la muestra de fase en la i -ésima posición

$$TVAR^2(\tau) = \frac{\tau^2}{3} MOD\sigma_x^2(\tau) \quad (3)$$

Donde:

- $TVAR^2(\tau)$: representa la varianza de tiempo de la fase de la señal analizada en el tiempo de observación τ .
- $MOD\sigma_y^2(\tau)$: representa la varianza de Allan Modificada de la fase de la señal analizada en el tiempo de observación τ .

Como la varianza de Allan y la varianza de Allan modificada difieren solamente por el promedio de los puntos m adyacentes, esto hace que cuando $m=1$ la varianza modificada de Allan coincida con la varianza de Allan [13]. La evaluación de los resultados se realiza mediante (2), la cual brinda información sobre la estabilidad del reloj maestro, y (3) nos permite obtener la predictibilidad de UTC(CNMP).

Paralelamente a estas acciones, también se lleva a cabo un programa de verificaciones y registros mensuales de todos los componentes que actúan en la realización de UTC(CNMP) como es el caso de comportamiento electrónico de los patrones, receptores GPS, distribuidores de señales, cables y conectores, programas de captura y análisis de los datos y también el respaldo de

energía de los equipos, ya que una interrupción (caídas de voltajes, cables rotos, falsos contactos, pérdida de los datos de medición, etc.) en la continuidad de los datos, afecta la estabilidad de su desarrollo. Al realizar todas estas tareas, buscamos mejorar la estabilidad de ambos patrones atómicos para incrementar nuestra capacidad de predecir su comportamiento a largo plazo y la exactitud sería manejada por el corrector de fase.

3. RESULTADOS

Al aplicar las correcciones, se pudo apreciar mejoras en el desempeño del reloj maestro, y por consiguiente en la realización de UTC(CNMP). También se pudo lograr una disminución notable en la diferencia de tiempo $|\text{UTC}-\text{UTC}(\text{CNMP})|$, lo que permitió determinar nuevas fuentes de ruido en la señal (variaciones en la temperatura y humedad del laboratorio, posicionamiento de la antena GPS, interferencias de equipos de medición dentro del mismo gabinete que los equipos de generación de señales) las cuales se procedieron a minimizar (se instaló un nuevo sistema de aire acondicionado y se adquirió un nuevo gabinete para los equipos de medición y otro para los de generación).

Tabla 2. Estado de la diferencia de tiempo y el desvío de frecuencia.

Año	Diferencia (ns)	Valor (Hz/Hz)
2006	-4795,91	-7,0E-14
2007	84,32	1,8E-14
2008	206,87	1,3E-14
2009	-20,47	-5,9E-15
2010	-15,43	-1,2E-14

Después de realizar las correcciones de la señal y las correcciones en la infraestructura, se pudo apreciar que la exactitud de la señal y su estabilidad a corto plazo mejoraban, aunque su estabilidad a largo plazo quedó comprometida con las correcciones que se le realicen al reloj maestro. Los resultados de estos análisis se muestran en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, las cuales están referenciadas a la misma fecha en un periodo de 200 días hacia atrás a partir de la fecha señalada (29 de junio).

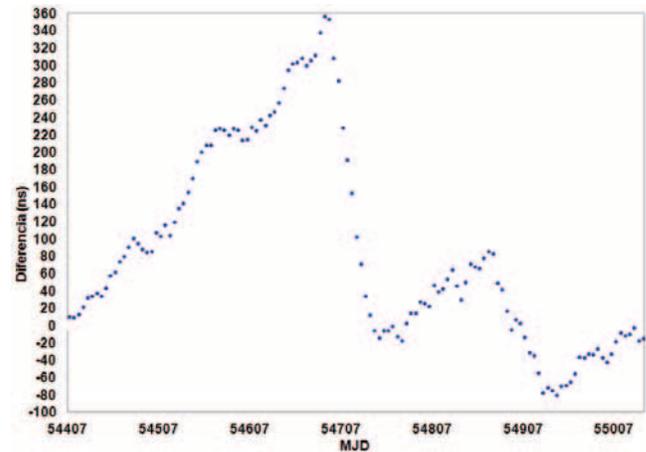


Figura 5. Comportamiento entre las fechas 54407 y 55040.

Tabla 3. Estabilidad de la señal de tiempo.

Tau	Desviación de Tiempo (ns)				
	2006	2007	2008	2009	2010
600	5,6	1,3	0,7	0,8	0,9
1200	4,2	1,1	0,8	0,8	0,9
2400	3,3	1,1	1,0	0,9	1,0
4800	3,1	1,4	1,3	1,3	1,4
9600	3,4	1,9	1,9	1,9	2,1
19200	4,0	2,6	2,4	2,4	3,0
38400	5,1	3,5	2,9	3,0	3,8
76800	4,4	2,1	2,2	2,3	2,4
153600	5,4	2,9	2,7	2,9	2,7
307200	5,7	4,3	3,4	4,2	3,5
614400	6,8	4,1	4,4	6,4	4,2
1228800	5,1	8,2	6,4	10,3	7,1
2457600	7,8	9,0	14,2	16,3	12,5

Tabla 4. Estabilidad de la frecuencia

Tau	Desviación de Allan (1E-12 Hz/Hz)				
	2006	2007	2008	2009	2010
600	16	3,7	2,5	2,3	2,7
1200	8,5	2,2	1,5	1,5	1,6
2400	4,4	1,2	9,9	9,7	1,0
4800	2,3	0,78	0,68	0,67	0,72
9600	1,3	0,51	0,49	0,49	0,53
19200	0,72	0,34	0,32	0,32	0,37
38400	0,44	0,24	0,21	0,21	0,26
76800	0,20	0,091	0,091	0,094	0,098
153600	0,12	0,059	0,057	0,059	0,061
307200	0,069	0,043	0,036	0,039	0,041
614400	0,038	0,021	0,019	0,025	0,019
1228800	0,017	0,015	0,013	0,018	0,013
2457600	0,0089	0,0098	0,010	0,012	0,0095

En la Figura 6 se puede apreciar el desempeño de UTC(CNMP) desde el inicio de sus comparaciones el 2 de octubre de 2003 hasta el 28 de mayo de 2011 los cuales suman 2795 días de trabajo continuo en el laboratorio.

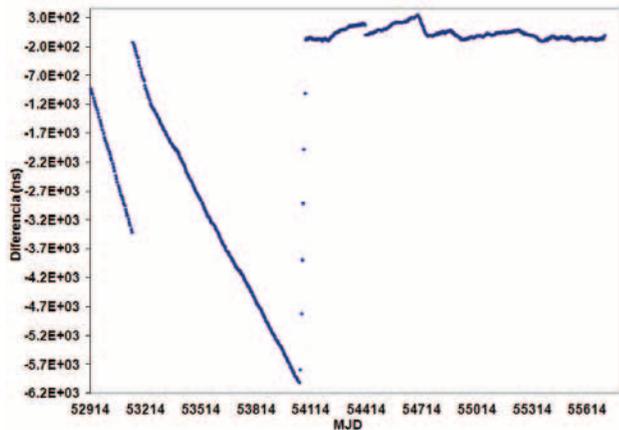


Figura 6. Comportamiento entre las fechas 52914 y 55709.

Además del trabajo del laboratorio de mantener el UTC(CNMP) dentro de lo recomendado, se debe implementar el segundo intercalar, el cual es un instrumento utilizado para hacer acorde la hora UTC con la hora solar, mejor conocida como el Greenwich Mean Time. Este instrumento consiste en la adición o sustracción de un segundo a la cuenta final de UTC (minutos de 61 ó 59 segundos respectivamente) ocurridos en el día 30 de junio o el día 31 de diciembre a las 0 horas UTC, y es la responsabilidad del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) en conjunto con el BIPM mediante la publicaciones de notas y boletines (Boletín C), el dictaminar en el momento que tenga que ser utilizada. Para hacer uniforme el uso del segundo intercalar, se debe aplicar a las 00:00:00 horas UTC, de los días indicados por el IERS y es empleada de la siguiente manera:

- 31 de diciembre del 2008, 23 h 59 m 59 s
- 31 de diciembre del 2008, 23 h 59 m 60 s
- 01 de enero del 2009, 00 h 00 m 00 s

En Panamá, que está ubicado en la zona horaria de UTC-5, el segundo intercalar se aplicaría a las 19:00:00 del día designado para la ocurrencia del evento, y es la responsabilidad del CENAMEP la generación y disseminación de la unidad de tiempo generada por los relojes. Debido a que los equipos y sistemas que dependen de la hora no pueden

ser modificados automáticamente por lo impredecible que puede llegar a ser el segundo intercalar (por eso hay satélites GPS que tienen hasta 15 segundos de atraso), la corrección se realiza horas antes de lo estipulado de manera manual, para que la población no se percate de lo sucedido y pueda realizar sus actividades sin inconvenientes.

4. DISCUSIÓN

4.1. Son necesarios altos niveles de conocimiento en la realización y el mantenimiento de la hora

A pesar de que el laboratorio se considera que está sobre nivel del mar y sin demasiadas fuentes de perturbaciones en la gravedad (no hay grandes macizos montañosos cerca) las variaciones de temperatura y humedad afectan el desempeño de las mediciones a corto y largo plazo, tanto de los instrumentos dentro del laboratorio como de los que están expuestos a la intemperie. También las vibraciones mecánicas llegan a afectar la estabilidad (internamente los relojes atómicos mantienen cuarzos disciplinados en su interior) de la señal por lo que el control del acceso del reloj maestro siempre pudiese estar restringido a personal competente en su manejo y en cantidades de veces que se pueda acceder. En la Figura 7 se puede apreciar la vista actual del laboratorio de Tiempo y Frecuencia.



Figura 7. Vista del laboratorio.

Hasta que se comenzaron a realizar estancias profesionales de varias semanas en laboratorios de primer nivel, se pudo adquirir el conocimiento necesario para realizar el manejo adecuado de los relojes y los equipos que intervienen en la realización de UTC(CNMP). Este conocimiento adquirido permitió elevar el nivel del laboratorio mejorando el nivel y la profundidad necesaria que

requiere el mantenimiento de patrones atómicos y de los servicios que dependen de ellos. Esto quedó en evidencia cuando una de las señales de frecuencia de uno de los patrones comenzó a mostrar anomalías, lo que permitió tomar las acciones pertinentes para mantener la realización de UTC(CNMP) al cambiar de reloj maestro sin que existiesen problemas frente al BIPM.

El constante entrenamiento y comunicación con los pares en la región SIM [14], así como con las distintas regiones (incluyendo al BIPM) es necesaria para perfeccionar los conocimientos y generar nuevas soluciones a los problemas que se presentan, ya que por ser realizaciones primarias de la unidad, el nivel de conocimientos requeridos para el mantenimiento del tiempo es elevado, por lo que el estudio continuo es recomendado y si es posible, adquirir nuevos conocimientos más profundos en estudios doctorales.

4.2. Supervisión continua es necesaria

Por la naturaleza de las mediciones realizadas (cada segundo las 24 horas del día, los 365 días del año) es necesaria una completa supervisión de todos los componentes involucrados. La automatización de todos los procesos debe darse para disminuir la incidencia de errores humanos, y darle una autonomía plena a los sistemas para así optimizar su desempeño. Estas automatizaciones son realizadas de manera progresiva, modular y siempre validándolas, de tal manera que se complementen todos los elementos en un completo sistema de realización, supervisión y mantenimiento de manera óptima e integral.

En la actualidad se han desarrollado dos programas para la supervisión y respaldo de los datos de comparación. Uno se encarga de supervisar el estado de operación del sistema TTS-2 (datos recibidos cada 16 minutos, alertas por correo electrónico, comparación de las diferencias de tiempo entre el promedio de señales GPS y la realización UTC(CNMP)) y el otro supervisa el estado operacional del comparador de fase (datos generados cada segundo, estima la diferencia que hay entre cada canal, reportes de funcionamiento por correo electrónico).

Ambos programas están desarrollados para generar los datos necesarios en un formato útil para el establecimiento de un programa que controle automáticamente el corrector de fase en base a la

información suministrada y, así se logre establecer la escala de tiempo local, el TA(CNMP), la cual mejoraría el desempeño de UTC(CNMP) al hacerla menos vulnerable a los fallos y variaciones del sistema por vista común (que a pesar de su amplia utilización para fines comerciales es una tecnología de naturaleza militar y que es susceptible a variaciones espaciales como tormentas solares, basura espacial, variaciones en la ionósfera y contaminación por ruido de bandas de comunicación cercanas).

4.3. Relojes atómicos a óptimo desempeño

Los relojes atómicos de Cesio comerciales, tienen una exactitud declarada por el fabricante de $\pm 1E-12$ Hz/Hz, pero con los cuidados y el mantenimiento realizado en el laboratorio, hemos tenido que su exactitud siempre es menor al valor de $\pm 7E-14$ Hz/Hz y, para asegurarnos que siempre estemos en los niveles más óptimos de estabilidad y exactitud, el desvío fraccional de frecuencia no podrá ser más allá de $\pm 4E-14$ Hz/Hz. Esta mejora en la exactitud y estabilidad se observa en el peso asignado a los relojes por parte del BIPM para estimar UTC, los cuales han pasado de números cercanos a 0,001 hasta valores próximos a 0,230 referenciados a un máximo valor de 1,000.

4.4. La escala de tiempo es el siguiente paso

Por lo visto y analizado, el paso más lógico que se debe implementar para mejorar el desempeño de la realización de UTC(CNMP) son las escalas de tiempo locales. Con ellas se pueden mejorar significativamente los parámetros de estabilidad, exactitud e incertidumbre de UTC(CNMP), ya que el nivel actual de mantenimiento y realización mantiene un piso que no puede ser superado sin excluir al componente humano, y sin el conocimiento de las estabilidades absolutas de cada patrón no se podrá lograr escoger cual realmente tiene mejor estabilidades a corto y largo plazo. Por ello implementando una escala de tiempo, se procederá a generar un reloj atómico virtual, que será sostenido por un algoritmo especializado que lo generará en base a los pesos ponderados de los relojes que en el momento estén en el laboratorio. Esto dará permanencia al UTC(CNMP) sin importar cual reloj atómico sea declarado como reloj maestro.

4.5. Diseminación la hora en Panamá

Con toda esta información recopilada, se han podido desarrollar proyectos paralelos para disemi-

nar la hora, como es el caso del reloj Web, la sincronización mediante el protocolo NTP y el Servidor de Tiempo por Voz (desarrollado en colaboración por el Centro Nacional de Metrología, en México). De estos servicios de diseminación del tiempo se puede apreciar que han tenido un incremento significativo en su utilización ya que desde el año 2009 (cuyo alcance va desde marzo hasta diciembre y siendo el año en que se comenzaron a incorporar los servicios de diseminación de la hora), y comparándolos con los datos obtenidos solamente en el primer semestre de 2010, se ha tenido una evolución muy favorable del uso de estos servicios y que puede traducirse en un mayor impacto del laboratorio de tiempo y frecuencia en la sociedad y, por lo tanto, en la economía del país.

Esto trae como resultado la necesidad de mejorar las capacidades de mediciones y calibraciones del laboratorio de tiempo y frecuencia, mejorando los servicios actuales e incorporando nuevos servicios de calibración y pensando en nuevas maneras de lograr un mejor alcance en la diseminación de la Hora Oficial de Panamá.

5. CONCLUSIÓN

Tras la primera corrección realizada en el año 2006, el laboratorio de tiempo y frecuencia ha logrado mantener el UTC(CNMP) cada vez más dentro de lo recomendado. Estas diferencias estuvieron primero en rangos de ± 400 ns y posteriormente dentro del rango de ± 100 ns. También se logró disminuir la incertidumbre de UTC(CNMP) de 16,4 ns a 12,0 ns (ambas incertidumbres con un factor de cobertura del 95%) y se logró obtener reconocimiento internacional en el área de tiempo y frecuencia, como uno de los países latinoamericanos que más han aportado al desarrollo del nuevo sistema de comparaciones por vista común (por ello fue el cuarto país en ingresar a la red de comparaciones del SIM). Desde la primera corrección se estableció un programa de mantenimiento preventivo que permite disminuir la posibilidad de fallas en el sistema permitiendo que sea más fácil establecer nacional e internacionalmente la confianza que se tiene en los mecanismos de diseminación de la hora.

Cabe destacar que todo este trabajo es de gran

ayuda a la comunidad internacional en la definición del segundo, ya que al mejorar la realización de la definición local y al estar dentro del margen de los ± 100 ns, permite mejorar el desempeño del algoritmo ALGOS [15], el cual estima el UTC. Esto es que al contar con más laboratorios que tengan sistemas estables y predecibles, el algoritmo ALGOS es mucho más robusto. También hay que destacar que existen pocos relojes atómicos con estas características en latitudes cercanas al ecuador (ver Figura 1), lo que permite que funcionen como enlaces para comparaciones cuando los laboratorios en el hemisferio norte y el hemisferio sur no puedan ver los mismos satélites GPS y así evitar que la comparación empleando la diferencias entre relojes con otros laboratorios en latitudes diferentes incremente la incertidumbre de la comparación al tener una sola diferencia entre laboratorios y no una diferencia sucesiva de varios laboratorios.

En el futuro se plantea relocalizar las antenas receptoras (así se disminuiría las inestabilidades debido a los rebotes de las señales y mejorar la visibilidad de los satélites) y la incorporación de un corrector de fase que pueda realizar correcciones por debajo de $1E-15$ Hz/Hz. Además se plantea poner en marcha un comparador de fase por doble mezclado (resolución de $1E-15$ s) con lo que se mejorará la relación entre la exactitud y la estabilidad de UTC(CNMP) al conocer localmente las diferencias de tiempo entre relojes y así lograr disminuir la incertidumbre de la realización local del segundo al conocer otros procesos de ruido sin la necesidad de incorporar las comparaciones por GPS. Con todo esto se pretende una futura creación de una escala de tiempo local conocida como el Tiempo Atómico de Panamá, lo que permitirá abrir la oferta de servicios a la industria, el sector educativo y gubernamental, y al público en general al poseer una definición local que no sea dependiente de las redes de comparación por GPS.

6. AGRADECIMIENTO

Se le agradece al Dr. José Mauricio López R. jefe de la División de Tiempo y Frecuencia del Centro Nacional de Metrología, en México por su

valiosa ayuda para el desarrollo de este documento. También se agradece al Ing. Luis Mojica O. por su ayuda en los trabajos dentro del laboratorio de tiempo y frecuencia del CENAMEP AIP.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bureau International des Poids et Mesures, 13vo Comité General de Pesas y Medidas, Por el cual se acoge la nueva definición del segundo, Resolución 1 del CGPM, 1967/68.
- [2] Bureau International des Poids et Mesures key comparison database, “CCTF-K001.UTC: Calculation of the reference time scale UTC (Coordinated Universal Time)”, *o n g o i n g*, <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/>, [Consulta: 9 de junio de 2011].
- [3] Bureau International des Poids et Mesures, Circular T, monthly report, ISSN 1143-1393, acceso electrónico de la base de datos, <http://www.bipm.org/en/scientific/tfg/>, [Consulta: 9 de junio de 2011].
- [4] M. A. Lombardi, “The SIM Time Network and its Contributions to Metrology in the Americas,” *Metrologist: NCSLI Worldwide News*, pp. 16-21, April 2009.
- [5] J. M. López-Romero, M. A. Lombardi, A. N. Novick, J-S. Boulanger, R. de Carvalho, R. Solis, 2008, “The SIM Network: Improved Time Coordination for North, Central, and South America”, *Proceedings of the 22nd European Frequency and Time Forum (EFTF)*, April 2008.
- [6] M.A. Lombardi, A.N. Novick, J.M. López-Romero, F. Jimenez, J.S. Boulanger, R. Pelletier, R. de Carvalho, R. Solis, C. Donado, H. Sanchez, C.A. Quevedo, G. Pascoe, and D. Perez, “The SIM Time and Frequency Network”, *INFOSIM*, pp. 15-25, December 2008., “The SIM Time and Frequency Network”, *INFOSIM*, pp. 15-25, December 2008.
- [7] Michael A. Lombardi, Andrew N. Novick, J. Mauricio Lopez R, Francisco Jimenez, Eduardo de Carlos Lopez, Jean-Simon Boulanger and Raymond Pelletier, Ricardo J. de Carvalho, Raul Solis, Harold Sanchez, Carlos Andres Quevedo, Gregory Pascoe, Daniel Perez, Eduardo Bances, Leonardo Trigo, Victor Masi, Henry Postigo, Anthony Questelles, Anselm Gittens, “The SIM Time Network”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 116, pp. 557-572 (2011), December 2008.
- [8] Arias E.F., “The Iberoamerican contribution to international time keeping”, *Revista Mexicana de Astronomía. (Ser. Conf.)*, 2006, pp. 21-23.
- [9] Bureau International des Poids et Mesures, Need to improve world-wide time co-ordination to UTC recommendation S5, Report of the Comité Consultatif pour la définition de la second (12th meeting-1993) to the Comité International des Poids et Mesures, 1993.
- [10] Ministerio de Comercio e Industrias, Decreto Ejecutivo No.10 del 26 de enero de 2009 "Por el cual se declaran los patrones nacionales de la República de Panamá", *Gaceta Oficial N° 26219*, Ciudad de Panamá.
- [11] Autoridad Nacional para la Innovación Gubernamental, Resolución No.7 del 31 de mayo de 2010 “Por medio de la cual se adopta la Hora Nacional de Panamá, según definición del CENAMEP AIP, como la Hora Oficial para todas las Entidades del Estado”, *Gaceta Oficial No.26547-A*, Ciudad de Panamá.
- [12] Lewandowski W. y Tisserand L., Determination of the differential time corrections for GPS time equipment located at the OP, TCC, ONBA, IGMA and CNMP, Rapport BIPM-2008/03, France.
- [13] Bregni S., *Synchronization of Digital Telecommunications Networks*, John Wiley & Son, LTD. 2002, pp. 234-236.
- [14] Time and Frequency Metrology Working Group home page, [En línea] <http://tf.nist.gov/sim/> [Consulta: 13 de junio de 2011].
- [15] Arias E.F, Panfilo G. y Petit G., “Timescales at the BIPM”, *Metrologia*, vol. 48, pp. 145-153, Julio 2011.