

# Application of SIMT and UTCr timescales for the maintenance of the Universal Time Coordinated in Panama

R. F. Solís, *Member, IEEE* and L. M. Mojica

**Abstract**—The time is a physical magnitude with a major influence in the advances in our society, so that technologies in areas like science, logistic, telecommunication, trade and security are influenced by it. Therefore, the establishment of reliable time and his subsequent dissemination is critical in our highly connected civilization. In Panama, through the Centro Nacional de Metrología de Panama, resources are invested in the maintaining of the Time and Frequency National Standards, which are the reference of the magnitudes of time interval and frequency, to making them available to the country for his use. This work shows the latest improvements using, in the best way possible by the laboratory, the available tools to keep and improve our local definition of the Universal Time Coordinated, the UTC(CNMP), and thus increase the confidence using this time as national and regional reference.

**Index Terms**—Atomic clocks, metrology in Panama, timescales, Time and Frequency laboratory.

## I. INTRODUCCIÓN

EL Tiempo Universal Coordinado (UTC) se estima mediante un algoritmo que incluye alrededor de 460 patrones atómicos, aglutinados en más de 70 laboratorios de tiempo y frecuencia dentro de Institutos Nacionales de Metrología y organizaciones gubernamentales o privadas alrededor del mundo, siendo todo coordinado por el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) [1]. El resultado de esta comparación clave es la referencia empleada para que los laboratorios ajusten sus definiciones locales y sean lo más comparables entre ellos, para brindar trazabilidad a la unidad de intervalos de tiempo del Sistema Internacional de Unidades: el segundo [2]. Las realizaciones locales del UTC se denominan UTC(k) [3], siendo el UTC(CNMP) la denominación de esta realización en el Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP), laboratorio designado

Manuscrito recibido Junio 30, 2014. Versión actualizada Octubre 18, 2014. Recomendado para publicación por miembros evaluadores del Programa Técnico del CONCAPAN 2014.

Raúl Fernando Solís B. está en la Coordinación de Magnitudes Electromagnéticas, Centro Nacional de Metrología de Panamá, 0843-01353 Panamá, República de Panamá (teléfono: 517-3100, fax: 517-3200, e-mail: rsolis@cenamep.org.pa).

Luis Manuel Mojica O. está en la Coordinación de Magnitudes Electromagnéticas, Centro Nacional de Metrología de Panamá, 0843-01353 Panamá, República de Panamá (teléfono: 517-3100, fax: 517-3200, e-mail: lmojica@cenamep.org.pa).

para ser el custodio de los patrones nacionales de medida, en los cuales se incluyen los patrones atómicos de Cesio 133 con los que se logra la definición del segundo.

El UTC es según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [4], la referencia de señales de tiempo y frecuencia con la cual se busca lograr la interoperabilidad de los equipos y sistemas que requieran señales de referencia para sincronización y sintonización. Siendo estas aplicadas por organismos supervisores y administradores a nivel mundial de las telecomunicaciones para lograr la compatibilidad entre las redes de comunicaciones nacionales e internacionales. Por ello es muy importante que los valores de los UTC(k) sean lo más próximo posible al valor de UTC para poder cumplir con esta tarea.

La realización del UTC(CNMP) [5] se hace mediante un generador de corrimiento de frecuencia (GCF), que modifica la señal de salida de 10 MHz de uno de los relojes atómicos que posee el CENAMEP, denominado reloj maestro, mientras que los otros relojes funcionan como testigos de los eventos suscitados. Las comparaciones por vista común se dan mediante dos receptores satelitales multicanales exclusivos para este tipo de comparaciones, y siempre tratando de no sobrepase los límites de  $\pm 100$  ns [6], tomando en cuenta la incertidumbre de la realización.

## II. ESCALAS DE TIEMPO COMO REFERENCIA

### A. Escalas de tiempo

La metodología para estimar el UTC es emplear el método de comparación por vista común, como se muestra en la Fig. 1, que permite comparar realizaciones UTC(k) en grandes distancias de manera continua y así establecer la escala de tiempo internacional. Se toman los datos de las diferencias de tiempo empleando una ventana de tiempo de 5 días en los días terminados en 4 y 9 del Día Juliano Modificado (MJD), por espacio de un mes y los resultados de la diferencia de tiempo UTC-UTC(CNMP) se entregan casi una semana después del último punto tomado, mediante un documento llamado Circular T.

El Sistema Interamericano de Metrología desarrolló la escala de tiempo denominada SIMT [7], conformada por cerca de 20 laboratorios de tiempo de los cuales solo 11 aportan con relojes de Cesio.

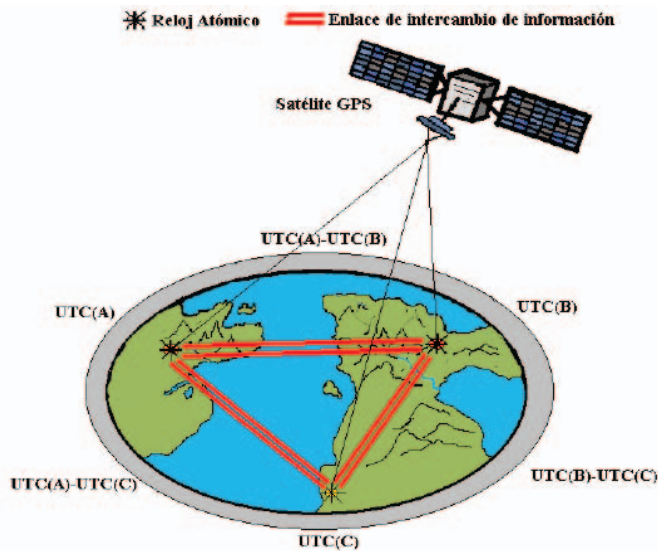


Fig. 1. Esquema de comparación por vista común. Para una misma huella satelital, varios laboratorios pueden realizar comparaciones entre la marca de tiempo local y la marca de tiempo satelital, permitiendo realizar comparaciones entre las marcas de tiempo locales de distintos laboratorios.

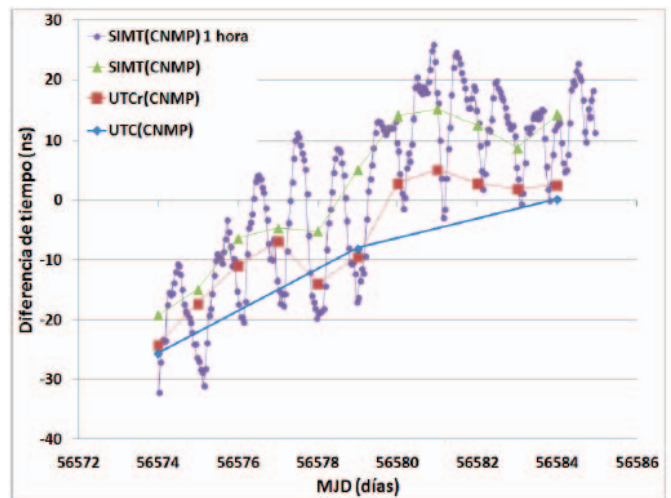
A diferencia de la escala del UTC, la ventana de observación es cada una hora, permitiendo darle seguimiento a los resultados de las realizaciones locales de manera más rápida, pero con el problema de que es susceptible al ruido que se incluye en las señales de navegación satelital y a que al poseer menos patrones atómicos la hacen vulnerable a fallas de algunos de los miembros de mayor peso en el aporte.

El UTC rápido (UTCr) [8], fue un experimento piloto implementado a partir de enero de 2012 buscando disminuir el periodo del reporte de la Circular T, a un periodo semanal con ventanas de observación de un día. A partir del 1 de julio de 2013 se estableció como una referencia válida no oficial que permite a los laboratorios mejorar sus mecanismos de supervisión y, como está conformada por 42 laboratorios que aglutinan cerca de 400 relojes atómicos, sus resultados están bastante cercana al UTC.

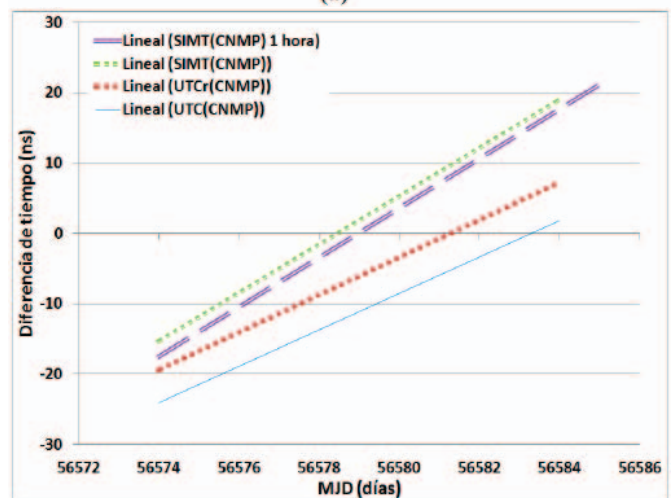
### B. Análisis de las escalas de tiempo

Como las escalas de tiempo del SIMT y el UTCr han demostrado su confiabilidad, se ideó emplearlas como herramientas para seguir y realizar las correcciones del UTC(CNMP). Esto es debido a que primariamente los resultados del UTC(CNMP) se obtienen cada mes, mientras los datos del SIMT(CNMP) y del UTCr(CNMP) se consiguen en espacios de horas hasta una semana de diferencia.

El empleo del SIMT(CNMP) es una muy buena opción para conocer a corto plazo el comportamiento del UTC(CNMP) debido a que se reporta nuevos valores cada hora, pero al ser una escala que posee menos relojes atómicos y que la ventana de observación es corta, está más expuesta al desempeño de sus participantes y a las variabilidades atmosféricas incrementando el ruido a corto plazo. El UTCr es otra gran opción a corto plazo ya que al tener la ventana de observación de un día, disminuye el ruido causado por las variaciones



(a)



(b)

Fig. 2. Comparación de los comportamientos (a) y las proyecciones (b) que tienen UTCr(CNMP) y del SIMT(CNMP) con respecto del UTC(CNMP) para las fechas del MJD 56574 al MJD 56584 donde se muestra que las tendencias entre las distintas escalas no difieren en  $\pm 1$  ns.

atmosféricas que afectan al SIMT y al poseer más participantes disminuye su dependencia del desempeño de sus participantes, pero como su reporte es entregado cada 7 días se restringe al análisis a un periodo de cada 7 días.

A pesar de ser escalas de tiempo diferentes, sus comportamientos eran muy parecidos, como se muestra en la Fig. 2(a), por lo que sus pendientes también lo eran como se muestra en la Fig. 2(b). Este análisis se realizó durante 85 días entre las fechas MJD 56479 y MJD 56564. Por ello se decidió emplear el SIMT y el UTCr para analizar las tendencias a corto plazo y así mejorar el desempeño de los datos que se reportan para el UTC, que es la escala oficial de referencia y principal fuente de trazabilidad de los laboratorios de metrología de tiempo y frecuencia a nivel mundial.

### C. La decisión de emplear escalas como referencia

Como el Laboratorio Primario de Tiempo y Frecuencia del CENAMEP, carece de un algoritmo para escalas de tiempo para la realización del UTC(CNMP), dependía del resultado

mensual para asegurar el desempeño del UTC(CNMP), haciendo que las correcciones a la pendiente que llevaba tuviera cambios bruscos, afectando la estabilidad a largo plazo. Por ello la incorporación del SIMT y del UTCr como herramientas de análisis y control de la definición del UTC(CNMP) era necesaria para lograr mejoras su mantenimiento, esperando mejorar la estabilidad mediante la aplicación de correcciones más suaves debido a que ya era posible el conocer con mayor precisión las diferencias de tiempo.

### III. PREDICCIÓN

Debido al comportamiento lineal de los relojes de Cesio [9], la aplicación de un modelo lineal es factible para conocer la tendencia del UTC(CNMP), estableciendo la pendiente de la señal para realizar la predicción a futuro. Hay que tener en cuenta que esta predicción no es perfecta debido a la variabilidad causada por la inestabilidad de los patrones, el ruido en la medición de los sistemas de vista común y el GCF, los cuales influyen en el resultado de la predicción. La proyección de la recta y su inestabilidad la modelamos mediante:

$$y = m \cdot x + b + \sigma \quad (1)$$

En nuestro caso adaptamos en (1) la pendiente  $m$ , la intercepción con el eje  $b$ , el resultado  $y$ , el dato del eje independiente  $x$  y la estabilidad  $\sigma$  para que las letras no se confundan con la nomenclatura empleada en metrología de tiempo y frecuencia:

$$x_p(d) = p \cdot d + i + \sigma_x(\tau) \quad (2)$$

Donde en (2) la variable  $x_p$  indica la diferencia de tiempo predicha para la  $d$  fecha MJD proyectada. La variable  $p$  es la pendiente estimada para ese periodo de análisis y su posterior proyección, la variable  $i$  es la intercepción de los ejes y la variable  $\sigma_x(\tau)$  es el parámetro de estabilidad del oscilador asociado a la ventana de observación. Para generar la predicción se calcula la pendiente y la intercepción de los ejes para (2) empleando los datos obtenidos:

$$p = \frac{\sum_{k=1}^N (d_k - \langle d \rangle) \cdot (x(\tau)_k - \langle x(\tau) \rangle)}{\sum_{k=1}^N (d_k - \langle d \rangle)^2} \quad (3)$$

$$i = \langle x(\tau) \rangle - p \cdot \langle d \rangle \quad (4)$$

Mientras que la estabilidad del oscilador de referencia que brinda la estabilidad de la señal, es evaluada en términos del Desvío de Allan Modificado, ModADEV o  $\text{Mod}\sigma_y(\tau)$ , y del Desvío de Tiempo, TDEV o  $\sigma_x(\tau)$ , con el cual determinamos la estabilidad temporal que va a tener nuestra predicción con los datos actuales de estabilidad de la señal [10]:

$$\sigma_x(\tau) = \sqrt{\frac{\tau^2}{3} \cdot \text{Mod}\sigma_y^2(\tau)} \quad (5)$$

Donde  $\tau$  denota la ventana de observación empleada para determinar la predicción,  $\langle \rangle$  denota el promedio de los datos y  $N$  denota la cantidad de datos empleados para determinar el ajuste de la recta y la estabilidad del oscilador.

### IV. PROCESO

Inicialmente se toman los datos reportados del SIMT(CNMP) para conocer la tendencia empleando (3) y (4), y su estabilidad se obtiene empleando a (5). El intervalo de observación es escogido de manera tal que permita realizar una predicción que cubra el mismo intervalo de tiempo que fue empleado para el análisis (se tomaron 7 días de datos y se proyectan 7 días a partir el último dato empleado para realizar el análisis) generando 168 datos para realizar el análisis (siendo  $N = 168$  para este caso). Con ello se analiza con la predicción si la posible diferencia UTC-UTC(CNMP) supera los límites permitidos. Una vez que llegan los datos del UTCr(CNMP) se valida la predicción realizada del SIMT(CNMP) y ahora empleando nuevamente a (3), (4) y (5), se toman los 7 días reportados que deben generar 7 datos (siendo  $N = 7$  para este caso), se estima la tendencia y la estabilidad del UTCr(CNMP). Estos resultados se comparan con los resultados obtenidos del SIMT(CNMP) para detectar errores, posibles problemas u oportunidades de mejora.

Cuando se tienen los datos del UTCr(CNMP), se realiza una predicción empleando (3), (4) y (5) y, a la par se genera una predicción empleando los datos del SIMT(CNMP). Ambas predicciones deben cubrir hasta la llegada de los resultados del nuevo periodo del UTCr(CNMP). Todo este proceso se repite hasta que se recibe la Circular T, con la que se realiza oficialmente el análisis de la tendencia con respecto del UTC(CNMP) empleando nuevamente a (3), (4) y (5) y generando 7 datos (el primer dato de la nueva Circular T es el último dato de la Circular T anterior) para generar el análisis (siendo  $N = 7$  para este caso). Se verifican los resultados obtenidos con respecto a las predicciones del SIMT(CNMP) y

TABLA I  
COMPARACIÓN DE LOS DATOS GENERADOS POR LAS ESCALAS DE TIEMPO

Escala de Tiempo	SIMT	UTCr	UTC
Ventana de observación	1 hora	1 día	5 días
Periodo de observación	1 hora	7 días	30 días
Datos adquiridos por reporte	1	7	6
Publicación de resultados	≈MJD + 0.042	MJD + 7	MJD + 30



del UTCr(CNMP) como mecanismo de aseguramiento de los datos, y ahora con los datos de la Circular T se realiza una predicción que cubra hasta la nueva entrega de la siguiente Circular T. Este proceso de realizar predicciones y comparar los datos entre SIMTC(NMP) y UTCrC(NMP) ocurre cerca de 4 veces al mes mientras que este mismo proceso de comparar contra el UTC(CNMP) ocurre una vez al mes.

V. CORRECCIÓN DEL UTC(CNMP)

Empleando los procesos de predicciones y comparaciones, se puede determinar las causas de ciertas variabilidades y su influencia en la tendencia siempre y cuando sean lineales. Si se determina que para controlar estas variabilidades o tendencias se debe realizar una corrección a la señal del GCF antes de la llegada de la nueva Circular T, se procede a realizar la estimación del desvío fraccional de frecuencia para corregir la tendencia del UTC(CNMP):

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta t}{T} \tag{6}$$

Donde en la ecuación (6) la expresión  $\Delta f/f$  es el desvío fraccional de frecuencia, y la expresión  $\Delta t/T$  es la tasa de cambio de tiempo, la cual es igual a la pendiente del análisis de la recta. En metrología de tiempo y frecuencia se acepta que en (6) si se incrementa la frecuencia con respecto a la referencia, la fase del oscilador bajo análisis se atrasa. Para realizar la corrección se toma el valor de la tendencia actual y se le resta el mismo valor de la pendiente para neutralizarla, después se aplica un valor del desvío fraccional de frecuencia que se considere conveniente:

$$\frac{\Delta f}{f_{CORRECCIÓN}} = \frac{\Delta f}{f_{ACTUAL}} - \frac{\Delta f}{f_{ACTUAL}} + \frac{\Delta f}{f_{ESTIMADA}} \tag{7}$$

El resultado de (7) nunca debe sobrepasar al valor de  $\pm 4 \times 10^{-14}$  Hz/Hz al mes, ya que es el valor máximo permitido empleado como fuente de incertidumbre en la declaración de las Capacidades de Medición y Calibración dentro del BIPM. Para realizar la corrección en el GCF, se toma el valor actual que posee el sistema y se le suma el valor de la corrección:

$$\frac{\Delta f}{f_{NUEVO}} = \frac{\Delta f}{f_{ANTERIOR}} + \frac{\Delta f}{f_{CORRECCIÓN}} \tag{8}$$

El resultado de (8) es el valor que se le aplica directamente al GCF, y una vez aplicada la nueva tendencia, se procede a esperar los siguientes días para confirmar los resultados obtenidos. Se hace constar que al aplicar una corrección toda predicción para fechas posteriores queda invalidada y el proceso de acumular datos para realizar la predicción empieza

nuevamente desde cero.

VI. RESULTADOS

Después de aplicar las escalas de tiempo SIMT y UTCr dentro de la metodología de darle seguimiento y mantenimiento al UTC(CNMP), se logró una mejora en los valores con que se brinda la trazabilidad en la magnitud de intervalos de tiempo y la magnitud frecuencia, y cuyos resultados están mostrados en la Fig. 3(a) y Fig. 3(b). Esto se ve reflejado en una mejora en del rendimiento de la realización del segundo, la cual puede ser observada en la Fig. 4 desde la fecha MJD 56624 hasta la fecha MJD 56804.

Un resultado valioso fue la mejora del SIMT(CNMP), al lograr determinar una diferencia sistemática de -10.2 ns y así lograr disminuirla a 1.4 ns, haciendo que sus resultados sean más comparables, como se muestra en la Fig. 5. También se disminuyó las máximas tasas de cambio al día, como se muestra en la Tabla II. La disminución del valor de este parámetro es muy importante debido a que es una característica que nos permite a la hora de establecer nuevos

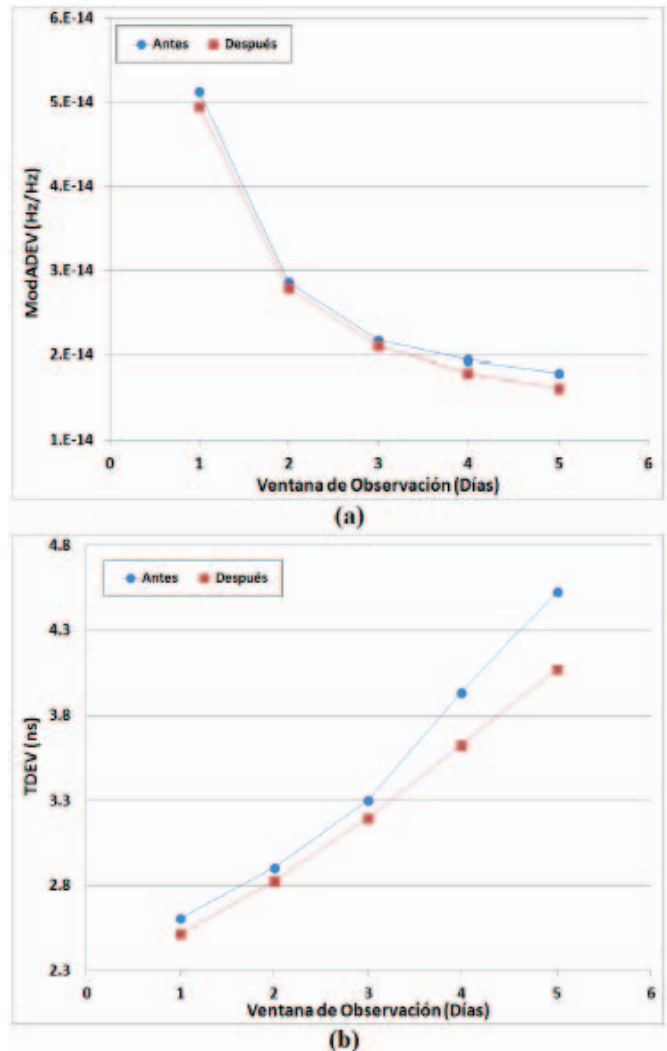


Fig. 3. Comparación de la estabilidad del UTC(CNMP) antes y después de aplicar las correcciones mediante las escalas de tiempo externas para la estabilidad en frecuencia mediante la ModADEV (a) y la estabilidad en tiempo mediante la TDEV (b).

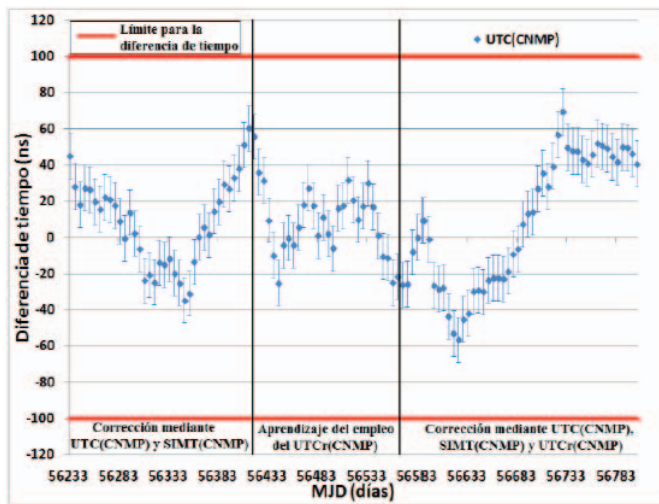


Fig. 4. Comportamiento del UTC(CNMP) desde el MJD 56234 (2012-11-03) hasta el MJD 56804 (2014-05-27). Las barras indican la incertidumbre del sistema que no superan los 15 ns en un intervalo de confianza del 95%.

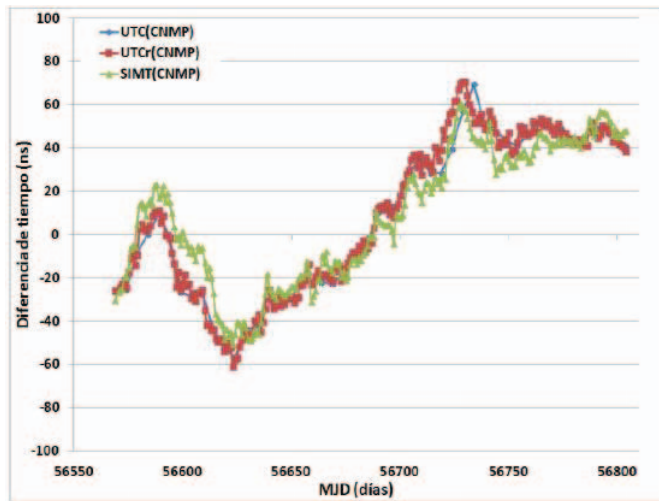


Fig. 5. Comportamiento del UTC, UTCr y el SIMT desarrollado por el CENAMEP en las fechas. A pesar que no tienen exactamente los mismos resultados, los datos de las tendencias y estabildades están dentro de lo esperado para una incertidumbre de 15 ns en un intervalo de confianza del 95% en las definiciones locales del SIMT, UTCr y el UTC.

TABLA II

VALORES DE LOS DESVÍOS FRACCIONALES DE FRECUENCIA ANTES Y DESPUÉS DEL EMPLEO DE LAS ESCALAS DE TIEMPO

	Máximo valor (Hz/Hz)	Mínimo valor (Hz/Hz)
Referencia	$4.00 \times 10^{-14}$	$-4.00 \times 10^{-14}$
Antes	$1.79 \times 10^{-14}$	$-9.24 \times 10^{-15}$
Después	$2.78 \times 10^{-15}$	$-2.92 \times 10^{-15}$

servicios de calibración o mejorar los que se poseen actualmente, y así declarar estas nuevas Capacidades de Medición y Calibración frente al BIPM después de una rigurosa evaluación internacional.

## VII. CONCLUSIONES

La implementación de las escalas de tiempo del SIMT y el UTCr demostraron ser una buena herramienta para el seguimiento de la generación del UTC(CNMP) día a día, permitiendo realizar modificaciones y darles seguimiento sobre cómo afecta su desempeño a corto y mediano plazo, sin generar consecuencias indeseables imprevistas que solo podían verse al momento de que se recibiera la Circular T. Esto permitió disminuir el nivel de correcciones aplicadas haciendo al UTC(CNMP) más estable, pero manteniendo un espacio para mejorar su desempeño cuando se logre implementar un algoritmo de escalas de tiempo local. Con la experiencia adquirida, es posible aplicar este conocimiento como una herramienta de supervisión y mantenimiento de las referencias de frecuencia de las empresas de telecomunicaciones, para comprobar o demostrar sus niveles de sincronización frente a los organismos u autoridades de regulación.

## REFERENCIAS

- [1] E F Arias, G Panfilo and G Petit, "Timescales at the BIPM," *Metrologia* 48 (2011) S145–S153.
- [2] T. Quinn, "Time, the SI, and the metre convention," *Metrologia*, vol. 48, no. 4, pp. S121–S124, Aug. 2011.
- [3] P. B. Whibberley, J. A. Davis and S. L. Shemar, "Local representations of UTC in national laboratories," *Metrologia* 48 (2011) S154–S164.
- [4] R. L. Beard, "Role of the ITU-R in time scale definition and dissemination," *Metrologia* 48 (2011) S125–S131.
- [5] R. F. Solís, "Desarrollo del Tiempo Universal Coordinado en Panamá," *RIDTEC*, vol. 8, no. 1, pp. 16-25, Julio 2012.
- [6] Comité Consultatif pour la définition de la seconde, "Need to improve world-wide time co-ordination to UTC recommendation S5 (1993)," Report of the 12th meeting to the Comité International des Poids et Mesures, France, 1993.
- [7] J. M. López-Romero, M. A. Lombardi, N. Díaz-Muñoz, and E. de Carlos-Lopez, "SIM Time Scale," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 12, pp. 3343-3350, December 2013.
- [8] F. Arias, A. Harmegnies, Z. Jiang, H. Konaté, W. Lewandowski, G. Panfilo, G. Petit, and L. Tisserand, "UTCr: A rapid realization of UTC," in *Proc. EFTF*, pp. 24–27, Apr. 2012.
- [9] Panfilo, P. Tavella, "Preliminary test on the steering algorithm for keeping a time scale synchronized to UTC," in *Proc. of the 2003 IEEE International*, Tampa, pp. 301-305, 2003.
- [10] W. J. Riley, *Handbook of Frequency Stability Analysis*. Gaithersburg, MD, USA: NIST, 2008.

**Raúl Fernando Solís B.** (M'02) nació en la Ciudad de Chitré, Panamá en 1982. Se graduó en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, en la Universidad de Panamá, en 2006. Desde el año 2006 trabaja en el CENAMEP y ha trabajado en las áreas de metrología dimensional, metrología de aceleración, acústica y ultrasonido. Actualmente se desempeña en las áreas de metrología eléctrica, metrología de radiofrecuencias y microondas y metrología de tiempo y frecuencia. Sus intereses actuales en investigación son las áreas de análisis de señales, osciladores de referencia, transferencia de tiempo, escalas de tiempo y mediciones de frecuencia y potencia en el espectro de las radiofrecuencias y microondas.

**Luis Manuel Mojica O.** nació en la Ciudad de Panamá, Panamá en 1985. Se graduó en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, en la Universidad de Panamá, en 2008. Desde el año 2008 trabaja en el CENAMEP y ha trabajado en las áreas aceleración, acústica y ultrasonido. Actualmente se desempeña en las áreas de metrología eléctrica, metrología de radiofrecuencias y microondas y metrología de tiempo y frecuencia.