

Caracterización de Mediciones al Femtosegundo en el Análisis de Patrones Atómicos

Solís Betancur, Raúl Fernando

CENAMEP AIP

Ciudad de Panamá, Panamá

ORCID 0000-0003-1043-4294

Abstract

Time and frequency references are fundamental to synchronization in telecommunications systems, electrical power generation and transmission, testing and calibration laboratories, and for maintaining the time based on Coordinated Universal Time (UTC). These systems exhibit variability of a couple of picoseconds per month. Therefore, it is crucial to perform measurements below these ranges to ensure accurate information on the performance of these systems. Our main objective is to demonstrate the progress that CENAMEP has made in improving its femtosecond-level measurement capabilities to adequately characterize atomic clocks and the time transfer systems used in remote calibrations employing GPS locally. For this purpose, the methodology includes presenting the laboratory work that has developed in terms of improving measurement capabilities, using time interval measurement systems and phase difference measurement systems by the double-mixing method, with their associated uncertainties, including characterization of cable delay, the accuracy of the measurement systems used, and the reference signals employed. As a result, we show the measurements made in the characterizations of the atomic clocks and the GPS receivers, with which we conclude that we have measurement capabilities with uncertainties inherent to the measurement system in the femtoseconds.

Keywords: UTC(CNMP), calibration, atomic clocks, metrology, uncertainty.

Resumen

Las referencias de tiempo y frecuencia son fundamentales en la sincronización en sistemas de telecomunicaciones, en la producción y transmisión de la energía eléctrica, en los laboratorios de ensayo y calibración y para el mantenimiento de la hora basada en el Tiempo Universal Coordinado (UTC). Estos sistemas tienen variabilidades un par de picosegundos al mes. Por ello es de suma importancia realizar mediciones por debajo de esos rangos, para asegurar la correcta información del desenvolvimiento de estos sistemas. Por ello,

nuestro objetivo principal es mostrar los avances que ha tenido el CENAMEP en mejorar sus capacidades de medición al nivel del femtosegundo para poder caracterizar adecuadamente relojes atómicos de manera local y los sistemas de transferencia de tiempo empleados en la realización de calibraciones remotas empleando GPS. Para ello, la metodología incluye la realización de los trabajos que el laboratorio desarrolló en términos de mejoras en las capacidades de medición, empleando sistemas de medición de intervalos de tiempo y sistemas de medición de diferencia de fase por el método de doble mezclado, con sus incertidumbres asociadas, incluyendo caracterización de retraso de los cables, la exactitud de los sistemas de medida empleados y las señales de referencia utilizadas. Como resultado mostramos las mediciones realizadas en las caracterizaciones de los relojes atómicos y el receptor GPS, con la cual concluimos tener capacidades de medición con incertidumbres propias del sistema de medición en los femtosegundos.

Palabras claves: UTC(CNMP), calibración, relojes atómicos, metrología, incertidumbre.

1. INTRODUCCIÓN

Las referencias de tiempo y frecuencia vienen de distinto origen (cuarzo, rubidio, cesio y hasta ópticos) y tienen dispersiones muy variadas, en las cuales algunas van desde $\pm 1E-9$ Hz/Hz hasta valores de $\pm 1E-14$ Hz/Hz, lo que se traduce en variaciones de tiempo de nanosegundos por día hasta décimas de picosegundo al mes. Por ello, para una buena caracterización del desempeño de estas referencias, es de suma importancia realizar mediciones por debajo de esos rangos y con sus ventanas de observación empleadas, para obtener la correcta información del desenvolvimiento de estos sistemas, que son los corazones de nuestra tecnología actual.

Por ello, y como parte del deber del Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP) de ser el custodio de los patrones nacionales de medida, se desarrolló una serie de trabajos por el Laboratorio Primario de Tiempo y Frecuencia (LPTF), encargado de la realización y el mantenimiento del UTC(CNMP), para mejorar sus capacidades de medición al nivel del femtosegundo, con el propósito de poder caracterizar adecuadamente referencias de tiempo y frecuencia de manera local y caracterizar sistemas de transferencia de tiempo empleando GPS adecuadamente, que son también empleados en la realización de calibraciones remotas. También se busca con las actividades desarrolladas robustecer las capacidades técnicas y abrir el espacio de nuevas Capacidades de Medición y Calibración [1] para cuando la industria y los entes de regulación lo necesiten.

2. MÉTODO

El proceso de caracterizar sistemas de referencia en Metrología de Tiempo y Frecuencia (MTF) conlleva a analizar cada uno de los sistemas involucrados para identificar sus errores sistemáticos y sus variabilidades, en diferentes ventanas de observación. Por ello se debe analizar los equipos que miden como los equipos de referencia, con aproximaciones parecidas (mediciones de tiempo o de frecuencia) pero tomando en cuenta los elementos fundamentales de cada sistema analizado.

A. Análisis del equipamiento involucrado

Los sistemas empleados para validar que las mediciones son correctas, son los que se ha conocido sus variaciones (tanto en su repetibilidad como en su reproducibilidad) en corto, mediano y largo plazo. Estos equipos de referencia son los siguientes:

- Reloj Atómico (RA, Microchip 5071A): Es un Patrón Atómico de Tiempo y Frecuencia de Cesio 133 de desempeño estándar bien caracterizado (más de 10 años de mediciones).
- Generador de Desvíos de Fase (GDF, SpectraDynamics HROG-10RM): Este es un sistema que, en base a la señal de referencia de un Reloj Atómico, genera señales de igual estabilidad que el Reloj Atómico de referencia, pero que puede modificarse sus salidas de frecuencia y fase sin afectar la estabilidad o predictibilidad del Reloj Atómico (según fabricante: ajustes de fase de $24E-17$ s y de frecuencia de $5E-19$ Hz/Hz).
- Oscilador Disciplinado por GPS (GPSDO, Microchip S650): Es una referencia de tiempo y frecuencia que su exactitud depende del arreglo de oscilador interno y las señales GPS.

El conjunto del RA y el GDF generan el UTC(CNMP) que tienen estabilidades de $\pm 6E-14$ Hz/Hz por día hasta $\pm 2E-14$ Hz/Hz en 5 días. Los equipamientos de medición por lo regular son de muy buena exactitud, pero elementos generales como: conexiones, cables, condiciones ambientales, manipulación y método de medición pueden afectar su desempeño. Por ello, se caracterizará los sistemas empleados para realizar las mediciones los cuales son:

- MMS (Multichannel Measurement System, Timing Solutions TSC 12030-110): Sistema que usa la técnica de doble mezclador de frecuencia para obtener la diferencia de tiempo entre señales senoidales.
- MTC (Multichannel Time Counter, PikTime MTC108): Sistema que emplea un contador de intervalos de tiempo para obtener la diferencia de tiempo entre señales pulsantes.

El MMS emplea dos señales de 10 MHz para aplicar la técnica de doble mezclador de señales (la de referencia y la bajo caracterización), con la que se pueden conseguir resoluciones con un valor de $1E-15$ Hz/Hz desde ventanas de observación de 1 segundo. Mientras que el MTC emplea un sistema de medición de diferencia de tiempo mediante un contador de

retrasos de cables con dispersiones de aproximadamente $\pm 3E-15$ s, todo esto tomando un dato cada 300 segundos y tomando 10 datos por cada cable. Estos resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores resultantes de la caracterización de los cables empleados para realizar las mediciones.

Cable	Tipo de conector	Cantidad	Retraso (ns)
Empleados para conectar los RA y el MMS y el MTC	SMA – SMA	5	10,034 325
Empleado para conectar el GDF al MMS y MTC	SMA – SMA	1	54,627 394
Empleado para conectar el RA al GDF	SMA – SMA	1	7,500 189
Empleado para conectar el GPSDO	BNC – BNC	1	19,106 894

Una vez se tenía los cables caracterizados, se procede a encontrar los valores de exactitud encontrados para cada equipo, el cual se obtiene al combinarlos cuadráticamente con los valores de dispersión del análisis de los retrasos de los cables empleando un factor de cobertura de $k = 2$. Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores resultantes de la caracterización del MMS y el MTC, los cuales son empleados como valores de referencia para realizar los procesos de medición y caracterización de los RA y el GPSDO.

Ventana de observación (s)	Valor de exactitud del MMS (s)	Valor de exactitud del MTC (s)
1	1,6E-12	2,3E-11
10	1,4E-13	2,3E-12
60	2,5E-14	3,9E-13
100	1,5E-14	2,4E-13
300	7,7E-15	7,8E-14
600	6,5E-15	4,0E-14
900	6,2E-15	2,8E-14
1 000	6,2E-15	2,4E-14
1 200	6,1E-15	2,0E-14
1 800	6,1E-15	1,5E-14
3 600	6,0E-15	8,8E-15
7 200	6,0E-15	7,1E-15
10 800	6,0E-15	6,5E-15
36 000	6,0E-15	6,0E-15
86 400	6,0E-15	6,0E-15
432 000	6,0E-15	6,0E-15
2 592 000	6,0E-15	6,0E-15

Se encontró que los procesos de ruido dominantes para ambos equipos son el Flicker Phase Modulation y el White Phase Modulation, ambos ruidos se asocian a los mecanismos de resonancia tanto de los RA como del GDF, lo que es básicamente la forma en cómo se realizan los ajustes de diferencia de tiempo en la escala de tiempo UTC(CNMP) y su influencia en las mediciones. En la Figura 2 muestra que los valores reales del RA están por debajo de lo indicado por el fabricante. También ocurre para el GPSDO que sus valores son mejores que lo declarado, ya que el fabricante indica exactitud menor a la de $1\text{E}-12$ s al día y no más de ± 15 ns RMS con respecto a UTC.

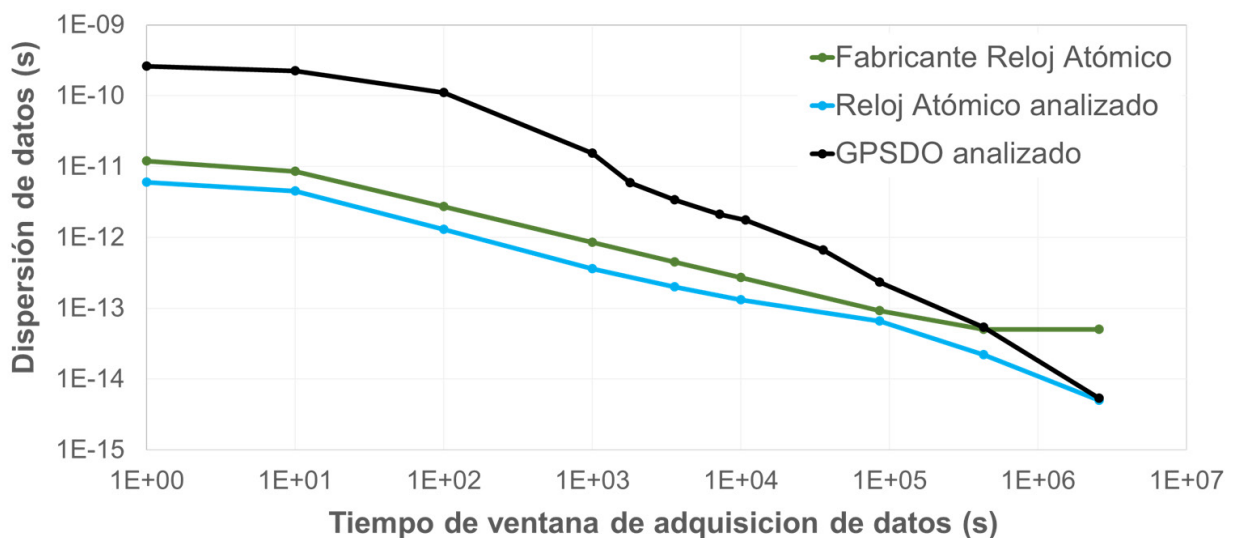


Figura 2. Valores de la caracterización del RA, lo indicado por el fabricante y el GPSDO.

Con el resultado de la validación nos permite realizar una transferencia de exactitud a los servicios, siendo el más beneficiado el servicio de Calibración de Osciladores, pasando de una incertidumbre ($k = 2$, publicada en el Buró Internacional de Pesas y Medidas) desde $\pm 6\text{E}-13$ Hz/Hz hasta $\pm 2\text{E}-13$ Hz/Hz, con ventanas de observación de 86 400 segundos (un día), representando una mejora del 300 por ciento, sin cambiar los equipos actualmente empleados.

4. CONCLUSIONES

Esta caracterización comprobó que tanto el MMS como el MTC pueden realizar mediciones con exactitudes al nivel del femtosegundo, pero deben tomarse en cuenta elementos como las condiciones ambientales, la exactitud de los Patrones Atómicos y la ventana de observación empleada para realizar una toma de datos adecuada. A nivel de aplicación, se comprueba que se pueden realizar calibraciones de Patrones Atómicos y Osciladores

Disciplinados por GPS con el equipamiento actual, pero hasta ventanas de observación de 5 días (432 000 segundos). También se muestra todavía hay espacio para mejoras en las cualidades de la escala de tiempo UTC(CNMP) si se mejora la exactitud de los PA y el algoritmo de predicción y control del GDF, para así optimizar el UTC(CNMP).

Referencias

- [1] R. F. Solís Betancur, Propuestas de Nuevas Capacidades de Medición y Calibración en Tiempo y Frecuencia, APANAC, pp. 141-147, sep. 2023.
- [2] J. E. Gray and D. W. Allan, "A Method for Estimating the Frequency Stability of an Individual Oscillator," Proceedings of the 1974 Frequency Control Symposium, pp. 243-246, May 1974.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC 2025 a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC 2025 ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.