

Red de Comparación de Relojes Atómicos de Cesio en Telmex

L. Hernández-Huerta, ^a J. M. López-Romero, ^b S. López-López, ^b E. de Carlos-López, ^b F. Jiménez-Tapia ^b

^a Teléfonos de México, S. A. de C. V.
Parque Vía 198, Col. Cuauhtémoc, 06599, Distrito Federal, México.

^b Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
mauricio.lopez@cenam.mx

RESUMEN

El Centro Nacional de Metrología (CENAM) y el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) han desarrollado una red de comparación de tiempo y frecuencia para relojes atómicos que operan en TELMEX. La red de comparación tiene por propósito medir el desempeño de los relojes atómicos que operan en la red de sincronía de TELMEX ofreciendo además trazabilidad hacia los patrones nacionales mantenidos en el CENAM. Con la red de comparación en TELMEX es posible medir niveles de sincronía con incertidumbres de medición de unos cuantos nanosegundos y medir diferencias fraccionales de frecuencia de hasta partes en 10^{15} . La red utiliza el método de vista común del sistema GPS para realizar las comparaciones entre pares de relojes e incorpora un esquema de intercambio de mediciones en tiempo real que permite conocer los resultados de la comparación en tiempo real. La red de comparación ofrece información valiosa para la toma de decisiones sobre la operación de la red de sincronía de TELMEX.

1. INTRODUCTION

El desempeño de las redes de comunicación está íntimamente ligado a la capacidad de sincronía en la misma [1]. El manejo de la información que circula en las redes de comunicación se facilita en la medida que el nivel de sincronía mejora entre los diferentes sistemas que intervienen en éstas. Parámetros como estabilidad y exactitud en los osciladores que operan en las redes de comunicación son de la mayor importancia ya que éstos establecen los límites fundamentales para la explotación de la red. Por la excelente estabilidad y exactitud que presentan los relojes atómicos de Cesio, la utilización de éstos como referencias primarias en redes de comunicación, para mantener la sincronía en la red en el mediano y largo plazo, son una elección adecuada. Con el objeto de explotar de la manera más eficiente posible los relojes de Cesio en redes de comunicación, es necesario mantener un seguimiento metrológico de los mismos. Como resultado de la comparación, es posible cuantificar el nivel de exactitud y estabilidad de estas referencias primarias, lo que a su vez permite realizar acciones tendientes a mejorar el desempeño de los relojes y en consecuencia hacer una mejor explotación de los mismos. Acciones como la corrección de la frecuencia de los relojes de cesio al nivel de partes en 10^{13} o menores o el reemplazo de los mismos por razones de una operación insatisfactoria pueden ser realizadas como resultado de un programa de seguimiento metrológico de los relojes de Cesio. Sin embargo,

debido a que los relojes de Cesio son instrumentos de muy alta exactitud, la caracterización de los mismos es una acción no trivial que implica la utilización de referencias de mejor desempeño metrológico, así como técnicas de medición adecuadas.

En este artículo se presenta el desarrollo de una red de comparación que ha sido desarrollada por el Centro Nacional de Metrología, CENAM, con la colaboración del *National Institute of Standards and Technology*, NIST, con el propósito de medir el desempeño metrológico de las referencias primarias de tiempo y frecuencia de TELMEX. En la sección 2 se presentan los fundamentos de la técnica utilizada. En la sección 3 se presentan las características de los equipos desarrollados, mientras que en la sección 4 se describen algunos aspectos relevantes en el establecimiento y operación de la red, y finalmente en la sección 5 se presenta una discusión de los resultados obtenidos en la operación de la misma.

2. TÉCNICA DE VISTA COMÚN DEL SISTEMA GPS

Es posible realizar la comparación entre pares de osciladores remotos sin necesidad de contar con un medio físico para el transporte de las señales de frecuencia que ellos generan. Señales de frecuencia comunes en ambos sitios pueden ser usadas como referencia para realizar la comparación entre los osciladores. Señales de televisión, radio, satélites, u

otras referencias, pueden ser usadas para este propósito [2]. Particularmente las señales del Sistema de Posicionamiento Global, GPS, presentan características excelentes para realizar comparaciones entre osciladores remotos utilizando la técnica denominada "Vista Común" [3].

2.1. El Sistema GPS

El sistema GPS, operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica, es diseñado y operado con el propósito primario de proveer un método de posicionamiento de muy alta exactitud en cuatro dimensiones (las tres dimensiones espaciales y la temporal). El sistema GPS opera bajo principios de sincronía, para lo cual cuenta con una constelación de más de 24 satélites (al momento de escritura de este artículo el sistema GPS cuenta con 30 satélites en operación), con órbitas de 20200 kilómetros de altitud, cada satélite cuenta con osciladores de muy alta exactitud (típicamente relojes atómicos de cesio). Las órbitas satelitales del sistema GPS tienen una inclinación de 55° respecto al plano ecuatorial. En cada órbita son colocados 4 satélites igualmente espaciados. El sistema está diseñado para que en cualquier punto de la superficie terrestre, en cualquier momento y bajo cualquier condición climática, estén presentes las señales de por lo menos 4 satélites del sistema. El segmento de control del sistema GPS determina la posición de los satélites con muy alta exactitud así como otros parámetros de operación del sistema. El mensaje de navegación de cada satélite incluye, entre otra información, la posición del satélite, la diferencia de tiempo entre el reloj a bordo y la escala de tiempo GPS-time, así como el estado general de operación del satélite. Los mensajes de cada satélite se distinguen unos de otros por que éstos están montados en un código pseudo aleatorio denominado PRN (*pseudo random noise*) el cual es único para cada satélite. Los satélites del sistema GPS transmiten en dos portadoras L1 y L1 en la banda L a las frecuencias 1,575 42 GHz y 1,227 6 GHz, respectivamente. La información que envía cada satélite GPS incluye el GPS-time el cual constituye una escala de tiempo de muy alta exactitud y estabilidad. Por todas estas características el sistema GPS constituye una referencia de tiempo y frecuencia de características metrológicas de alto nivel, por lo cual puede ser usado como una excelente referencia de tiempo para mantener la sincronía entre osciladores en redes de comunicación al nivel de un microsegundo o un poco mejor. Sin embargo, cabe indicar que para aplicaciones en donde se requieren niveles de sincronía al nivel de los nanosegundos, el método

de transferencia de tiempo en una sola vía con el sistema GPS presenta limitaciones, por lo que es necesario utilizar la técnica de vista común del sistema GPS, la cual se discute brevemente en la siguiente sección.

2.2. Diferencia de Tiempo entre un Oscilador Local y el GPS-Time

Si $\Delta t_{1N}(t)$ es la diferencia de tiempo entre el reloj R_1 y la escala de tiempo GPS-time de acuerdo al satélite N del sistema GPS al instante t , entonces es posible escribir la relación:

$$\Delta t_{1N} = t_{R1} - t_{GPS,N} + t_{ref} - t_{Rx} - t_{prop,N} \pm \varepsilon, \quad (1)$$

donde t_{R1} es el tiempo del reloj R_1 , $t_{GPS,N}$ es el valor del GPS-time de acuerdo al satélite N , t_{ref} es el tiempo de propagación de la señal del reloj R_1 para viajar desde el reloj hasta el sistema de medición, t_{Rx} es el tiempo de propagación que ocupa la señal del satélite N para viajar de la antena del receptor GPS hasta el sistema de medición, $t_{prop,N}$ es el tiempo que le toma a la señal del satélite N para viajar del satélite hasta la antena del receptor GPS, ε es la incertidumbre de medición.

Experimentalmente es posible medir directamente la diferencia Δt_{1N} , de manera que la diferencia $t_{R1} - t_{GPS,N}$ puede ser determinada si se conocen los tiempos de propagación de cada una de las señales que intervienen en la medición. Los tiempos de propagación t_{ref} y t_{Rx} pueden ser determinados a partir de un proceso de calibración de los equipos utilizados. El tiempo de propagación $t_{prop,N}$ es determinado a partir de la posición del satélite N y de la posición de la antena del receptor GPS. Cabe indicar que la posición del satélite está incluida en el mensaje del mismo, mientras que la posición de la antena debe ser medida con la menor incertidumbre posible (típicamente menor a un metro). La mayor componente a la incertidumbre ε se deriva de la incertidumbre en la determinación del tiempo de propagación $t_{prop,N}$ el cual a su vez depende de la posición de la antena, la posición del satélite N , así como de la densidad de carga en la ionosfera. En algunos casos también puede haber una contribución importante a la incertidumbre debido a multi-trayectorias de la señal del satélite N reflejada en

objetos cercanos a la antena del receptor GPS. Una buena determinación de estos tiempos de propagación hace que la incertidumbre esté alrededor de 5 ns.

2.3. Determinación de la Diferencia de Tiempo entre Dos Osciladores por el Método de Vista Común del Sistema GPS

Dos relojes R_1 y R_2 comparados con el mismo satélite N del sistema GPS al mismo instante t , esto es, con un satélite en vista común, cumplen con la respectiva relación indicada en la Ec. (1). La diferencia de tiempo $\Delta t_{21} = t_{R2} - t_{R1}$ entre ambos relojes puede ser determinada mediante la substracción de las mediciones indicadas en la Ec. (1) para el mismo satélite y para el mismo tiempo t . A este método de medición de la diferencia de tiempo entre dos relojes se le llama comparación por vista común del sistema GPS. Con estas condiciones es posible escribir lo siguiente:

$$\Delta t_{21} = \Delta t_{2N} - \Delta t_{1N} + (t_{ref2} - t_{ref1}) - (t_{Rx2} - t_{Rx1}) - (t_{prop,N1} - t_{prop,N1}) \pm \zeta_N \quad (2)$$

Es importante observar en la Ec. (2) que la contribución del sistema GPS se cancela en el proceso de substracción (salvo una ligera contribución presente en el término de incertidumbre ζ_N). De esta manera, la diferencia de tiempo entre los relojes $R1$ y $R2$ puede ser determinada mediante mediciones que pueden ser realizadas localmente en cada uno de los dos sitios. Debido a la cancelación de la contribución del sistema GPS, la comparación de relojes mediante la técnica de vista común es muy robusta ante degradaciones, intencionadas o naturales, en la calidad de la señal del sistema GPS. La determinación de la diferencia de tiempo entre dos relojes mediante la técnica de vista común depende, al nivel de un par de nanosegundos, del satélite que es usado como referencia. Dicha dependencia está indicada en la relación (2) por medio del subíndice N . Lo anterior es así debido a que la señal del reloj a bordo del satélite N es usada, a su vez, como intermediaria para medir respecto al GPS-time. De hecho, la diferencia de tiempo entre el reloj del satélite y el GPS-time está indicada en el mensaje del mismo. Dicha diferencia cambia de acuerdo al comportamiento del propio reloj del satélite. Esta diferencia es determinada al nivel de 1 o 2 nanosegundos. De manera que la diferencia Δt_{21} tiene una ligera dependencia del satélite usado en el proceso de medición. Además, dado que la posición

de diferentes satélites es diferente, las condiciones ionosféricas en el trayecto de las señales también son diferentes y el factor de incertidumbre indicado en la Ec. (2) depende por lo tanto del satélite utilizado en la comparación. Una forma de disminuir el nivel de incertidumbre en la comparación de relojes por medio de la técnica de vista común del sistema GPS es utilizar simultáneamente más de un satélite en el proceso de comparación. El número de satélites utilizados depende evidentemente de la capacidad del receptor para la recepción de las señales. Típicamente se utilizan receptores de hasta 8 canales, esto es, con capacidad de recepción simultánea de las señales de 8 satélites) aunque también los hay de 12 canales.

3. RECEPTORES GPS-RT

El Centro Nacional de Metrología, CENAM, con la colaboración del *National Institute of Standards and Technology*, NIST, ha desarrollado una red de comparación para las referencias primarias de TELMEX utilizando la técnica de vista común del sistema GPS con receptores de 8 canales. En esta sección describimos el funcionamiento del sistema formado por los receptores GPS de 8 canales y del sistema de medición, al cual nos referiremos en su conjunto como GPS-RT. En la Fig. 1 se muestra un diagrama a bloques del receptor GPS-RT. El receptor de 8 canales genera una señal de 1 pulso por segundo la cual es una reproducción local del GPS-time. Dicha señal es comparada con la señal de un pulso por segundo de la referencia local. La comparación es realizada utilizando un contador de intervalos de tiempo con una resolución de 25 ps. El sistema de adquisición y manejo de datos (ver Fig. 1) se encarga de recibir del receptor GPS toda la información relevante para la aplicación de la Ec. (1), así como de realizar las correcciones pertinentes debido a los tiempos de propagación t_{Rx} y t_{Ref} . Los resultados de la medición de la diferencia de tiempo Δt_{1N} son guardados en memoria no volátil.

El receptor GPS-RT está equipado con una tarjeta de red con el propósito de enviar a través de la red de datos los resultados de las mediciones Δt_{1N} a un servidor, al cual nos referiremos también como servidor de la red de comparación, o simplemente como servidor de la red. El envío de datos se realiza de manera automática cada diez minutos. El servidor recibe la información enviada por todos los receptores GPS-RT de la red y almacena la información en memoria permanente. Así mismo,

el servidor de la red de comparación se encarga de procesar las mediciones en vista común con el propósito de determinar las diferencias de tiempo Δt_{21} por medio de la Ec. (2). Las diferencias Δt_{21} son calculadas por el servidor en el momento en que un usuario realiza la petición. El servidor puede desplegar la información numérica y gráfica para un intervalo de tiempo de hasta doscientos días. Así mismo, el usuario tiene información de la estabilidad en frecuencia (desviación de Allan) y estabilidad en tiempo (desviación temporal) de las diferencias Δt_{21} , así como de las diferencias Δt_{1N} . Es importante mencionar que el servidor entrega también información gráfica y numérica de las diferencias de tiempo de cualquiera de los osciladores participantes respecto al GPS-time y respecto a cualquiera de los satélites del sistema GPS. El tiempo requerido por el servidor para realizar el cálculo es de unos cuantos segundos.

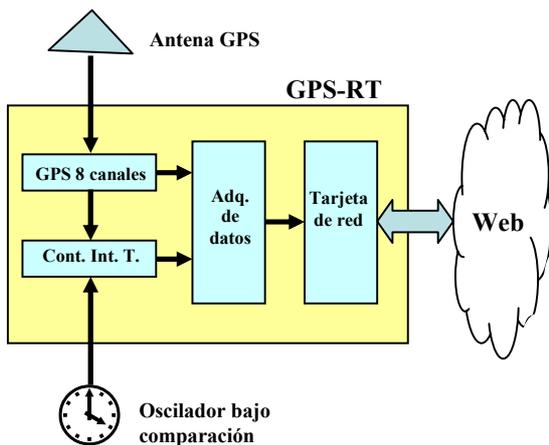


Fig.1. Diagrama a bloques del receptor GPS-RT.

4. RED DE COMPARACIÓN DE RELOJES PRIMARIOS DE TELMEX

En cada uno de los nodos de la red de referencias primarias de TELMEX se ha instalado un receptor GPS-RT con el propósito de medir el desempeño de las referencias primarias de tiempo ubicadas en éstos. La red permite comparar las referencias (relojes de Cesio) en un esquema de todos-contra-todos, así mismo permite incorporar la escala de Tiempo Universal Coordinado del CENAM, UTC(CNM) [4], como la referencia maestra. Esto último con el propósito de obtener trazabilidad de las mediciones hacia la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades, el SI. La Fig. 2

ilustra el esquema de comparación que se obtiene con dicha red.

Los resultados de la comparación están disponibles en tiempo real a través de una página Web mantenida en el servidor de la red de comparación. El servidor despliega los resultados de acuerdo a la solicitud del usuario. La página Web del servidor muestra de manera permanente la diferencia de tiempo entre relojes, dicha información es actualizada automáticamente cada diez minutos. Las diferencias de tiempo de cada uno de los relojes de Cesio de TELMEX respecto al UTC(CNM) son de particular interés para obtener trazabilidad hacia la unidad de tiempo del SI.

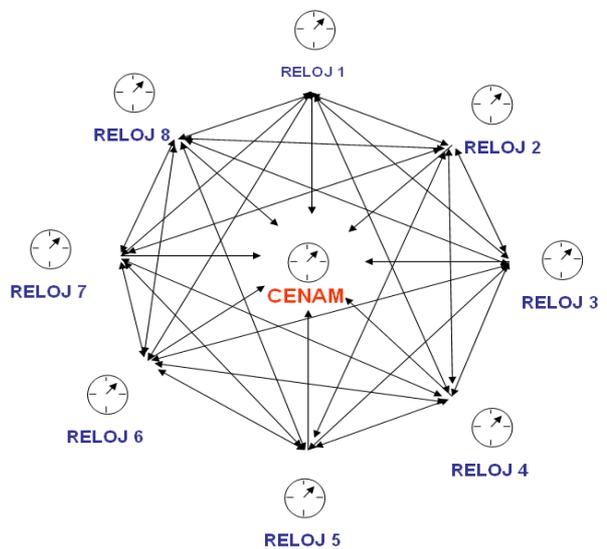


Fig. 2. Red de comparación de referencias primarias de TELMEX.

5. DESEMPEÑO DE LA RED DE COMPARACIÓN DE RELOJES PRIMARIOS DE TELMEX

Al momento de escritura de este reporte, la red de comparación de TELMEX cumple un año de operar de manera ininterrumpida. Durante este periodo de tiempo se han presentado en dos ocasiones anomalías por parte de dos de los receptores GPS-RT en el envío de datos al servidor de la red, consistiendo dicha anomalía en la suspensión del envío de mediciones al servidor, en tal caso, la problemática fue resuelta remotamente al apagar y encender los receptores GPS-RT. Cabe indicar que los receptores GPS-RT pueden ser operados remotamente teniendo control total del mismo, lo anterior con el objeto de supervisar su operación y,

en caso de ser requerido, corregir alguna falla en la operación de los mismos. Los receptores GPS-RT son conectados a una fuente de alimentación eléctrica ininterrumpible. Sin embargo, en caso de pérdida completa del suministro eléctrico, los receptores GPS-RT reinician su operación normal automáticamente una vez que el suministro eléctrico es restablecido. En caso de pérdida de conexión con el servidor por fallas en la red de datos, las mediciones realizadas por los receptores GPS-RT son enviadas al servidor una vez que se reestablece la comunicación con el mismo. Cabe indicar que los receptores guardan en memoria permanente el registro de las mediciones que éstos realizan, de manera que, en caso de ser necesario, dichas mediciones pueden ser leídas remotamente y enviadas a discreción al servidor de la red de comparación. A un año de operación, la red de comparación de TELMEX se muestra robusta. Las mediciones obtenidas a través de la misma son utilizadas para el aseguramiento metrológico de cada uno de los relojes de Cesio que operan en la red de sincronía de la empresa. Con la red es posible determinar diferencias fraccionales de frecuencia de las referencias de TELMEX respecto al UTC(CNM) al nivel de partes en 10^{15} para tiempos de integración de un día. Así mismo, con la red es posible mantener la sincronía entre los relojes con una incertidumbre menor a 10 ns. El mantenimiento de las diferencias fraccionales de frecuencia al nivel de partes en 10^{14} o mejor y de sincronía al nivel de 10 ns entre referencias primarias en redes de comunicación facilitan la explotación eficiente de la misma. El nivel de control metrológico de las referencias primarias de tiempo de TELMEX obtenido con la red de comparación desarrollada por el CENAM es mucho mejor que el que pudiera obtenerse utilizando el sistema GPS como referencia bajo el esquema de transferencia de tiempo en una sola vía.

6. CONCLUSIONES

El Centro Nacional de Metrología, CENAM, y el *National Institute of Standards and Technology*, NIST, han desarrollado una red de comparación de tiempo y frecuencia para relojes atómicos que operan en TELMEX y que ofrece resultados de comparación en tiempo real accesibles vía Web. La comparación se realiza con el método de vista común del sistema GPS utilizando receptores GPS de 8 canales acoplados a un sistema de medición de diferencia de fase entre señales de un pulso por segundo, los cuales son referidos como receptores GPS-RT. La red permite comparar los relojes

atómicos de Cesio de TELMEX continuamente en un esquema de todos-contra-todos con resultados disponibles en tiempo real a través de la red de datos de la misma empresa. La red de comparación permite incluir al Tiempo Universal Coordinado del CENAM, el UTC(CNM), como referencia maestra con el objeto de obtener trazabilidad hacia la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades, el SI. Así mismo, la red permite medir diferencias fraccionales de frecuencia de partes en 10^{15} para tiempos de integración de 1 día. Con los resultados de la comparación generados por la red es posible mantener la sincronía de los relojes de Cesio de TELMEX con una incertidumbre no mayor a 10 ns. La red de comparación de TELMEX muestra una operación robusta, los resultados de medición generados por ésta son utilizados para realizar un seguimiento metrológico continuo de las referencias primarias de tiempo de dicha empresa. Finalmente cabe indicar que la red de comparación de TELMEX presenta características similares a la red de comparación de tiempo y frecuencia del Sistema Interamericano de Metrología, SIM [5].

REFERENCIAS

- [1] Smith R. and Millott L.J., *Synchronization and slip performance in a digital network*, BT Engineering Vol 3, July 1984.
- [2] Pesic, M.T.; Arsic, M.Z., *Calibration of high precision oscillators using the TV linefrequency as a frequency standard*, 4th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, Vol. 1, 1999.
- [3] Dick O. Davis, Marc Weiss, Alvin C. Clements, and David W. Allan *Remote syntonization within a few nanoseconds by simultaneous viewing of the 1.575 GHz GPS satellite signals*, IEEE CPEM 1982 Conference Digest, pp. N15 – N17. M. A. Weiss, G. Petit and Z. Jiang, *A Comparison of GPS Common-View Time Transfer to All-in-View*, Proc. 2005 Joint Mtg. IEEE Intl. Freq. Cont. Symp. and PTTI.
- [4] F. Jiménez Tapia et al, "Evaluación de desempeño del UTC(CNM)", memorias de esta conferencia.
- [5] J. M. Lopez R., M. A. Lombardi, A. N. Novick, J.-S. Boulanger, R. de Carvalho, R. Solis, and F. Jimenez, *The SIM Network: Improved Time Coordination for North, Central, and South America*, European Frequency and Time Forum (EFTF) 2008, 23 – 25 April, Toulouse, France.