

Análisis de estabilidad en relojes atómicos por medio de la técnica Vista Común GPS

Analysis of atomic clocks stability using the GPS Common-View technique

D. A. Luna^{*a}, D.N. Pérez^a, F. Palacios^b, A. Cifuentes^c.

a. INTI-Física y Metrología – Unidad Técnica Electricidad – Laboratorio de Tiempo y Frecuencia

Av. Gral. Paz 5445. San Martín. Buenos Aires – Argentina

b. Instituto Geográfico Nacional, Av. Cabildo 391, C1426, C.A.B.A. - Argentina

c. Observatorio Naval de Buenos Aires, Av. España 2099, 1107, C.A.B.A. - Argentina

Recibido: 28/10/2015; aceptado: 02/06/2016

Este trabajo presenta una evaluación de la estabilidad de tres relojes de cesio mantenidos por distintas instituciones argentinas: INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), ONBA (Observatorio Naval de Buenos Aires), e IGN (Instituto Geográfico Nacional). Dado que los tres relojes no se encuentran en un mismo lugar, se utilizó la técnica de Vista Común GPS para comparar las señales generadas por los osciladores. Paralelamente, INTI e IGN reportan sus mediciones al BIPM (International Bureau of Weights and Measures), el organismo encargado de la realización del Tiempo Universal Coordinado (hora UTC y su versión rápida: UTCr). Gracias a esto, los resultados obtenidos se pudieron contrastar con cálculos independientes (informes semanales del BIPM sobre UTCr), obteniéndose valores consistentes. El principal aporte del método desarrollado es la posibilidad de obtener información sobre estabilidad a tiempos del orden de dos horas.

Palabras clave: relojes atómicos, vista común GPS, varianza de Allan.

This paper presents a stability evaluation of three cesium clocks maintained by various Argentine institutions: INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), ONBA (Observatorio Naval de Buenos Aires), and IGN (Instituto Geográfico Nacional). Given the fact that the three clocks are not located in the same place, the GPS Common View technique was used to compare the signals generated by the three oscillators. INTI and IGN report their measurements to the BIPM (International Bureau of Weights and Measures), the organization in charge of computing the Coordinated Universal Time (UTC time scale and its rapid realization: UTCr). As a consequence of this, it was possible to compare the results with independent calculations (BIPM weekly report of UTCr), obtaining consistent values. The main feature of the developed method is the possibility of extracting information about stability at averaging times of about two hours.

Keywords: atomic clocks, GPS-Common view, Allan variance

I. INTRODUCCIÓN

Los relojes atómicos (de cesio, rubidio, etc) son utilizados en campos de la tecnología y la ciencia muy diversos: desde las observaciones en geodesia y radioastronomía, hasta aplicaciones de impacto en la vida diaria como el seguimiento de la distribución eléctrica y el sincronismo de las redes de telecomunicaciones^{1,2}. Por estos motivos, es imprescindible poseer herramientas para caracterizar el desempeño de este tipo de osciladores.

En el caso de contar con varios relojes localizados en un mismo lugar, la cuantificación de la estabilidad individual se realiza mediante la técnica conocida como Three-Cornered-Hat: a partir de la varianza de Allan tomada entre pares, es posible calcular la varianza de cada reloj. Dado que en el presente caso los tres relojes analizados se encuentran en diferentes locaciones, se implementó la técnica de Vista Común GPS para comparar cada uno de los osciladores remotamente.

Escalas de Tiempo e institutos involucrados

El Tiempo Universal Coordinado (UTC) es la escala de tiempo mantenida por el International Bureau of Weights and Measures (BIPM). Para su realización se utilizan datos de una red mundial de laboratorios. Cada participante reporta las diferencias de tiempo entre su referencia local (UTC(lab)) y el tiempo GPS, medido mediante un algoritmo definido por el BIPM. Los satélites GPS son usados solamente como elementos de transferencia. Los resultados de los cálculos para la generación de UTC se informan mensualmente en la Circular T del BIPM, con datos a intervalos de 5 días. En el 2011, el BIPM propuso la generación de UTCr, una nueva realización de UTC informada con una demora reducida³. Luego de una prueba piloto en 2012, UTCr se convirtió en un producto generado en forma regular por el BIPM: UTCr se informa semanalmente con reportes diarios de diferencias (UTCr – UTC(lab)).

* luna@inti.gob.ar

La escala de tiempo SIM (SIMT) es otro ejemplo de escala de tiempo⁴. Se realiza con aportes de laboratorios del continente americano. SIMT fue diseñada para ser accesible al instante, y se utiliza para análisis del comportamiento de relojes atómicos en el corto, mediano y largo plazo. La información utilizada para la generación de SIMT se encuentra disponible en la red *SIM Time Network*.

El Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) es el Instituto Nacional de Metrología de la Argentina. Es el responsable del mantenimiento de los patrones de tiempo y frecuencia argentinos INTI contribuye a las escalas de tiempo UTC, UTCr y SIMT. La referencia actual de tiempo y frecuencia de INTI consta de un reloj de cesio Symmetricom 5071A (standard performance) y un receptor de GPS de 12 canales modelo NIST TAI RECEIVER.

El *Instituto Geográfico Nacional* (IGNA) mantiene un reloj atómico, el cual es utilizado en investigaciones geodésicas. Contribuye a UTC y UTCr.

El *Observatorio Naval de Buenos Aires* (ONBA) es el ente encargado de la hora oficial en la Argentina. Genera además diversos productos astronómicos, meteorológicos y oceanográficos. Contribuye a la generación de UTC mediante un reloj de cesio Symmetricom 5071A.

La cercanía geográfica de estas tres instituciones proporciona un marco particularmente favorable para la aplicación de la técnica de vista común, ya que las líneas de base (separación entre relojes) no superan los 20 km.

Vista común GPS

El servicio de posicionamiento GPS incluye una constelación de 32 satélites orbitando la Tierra a 20200 km, con un período de aproximadamente 12 horas.

Cada satélite emite señales con lo que se conoce como *mensaje de navegación*. Esta mensaje incluye: efemérides del satélite (coordenadas del satélite), información sobre el sincronismo del reloj de abord, correcciones por delay ionosférico y troposférico, más otra información sobre el estado del satélite en observación. Con toda esta información, el receptor mide la diferencia de tiempo entre la referencia local y el reloj a bordo de cada satélite. Observando diversos satélites en forma simultánea, es posible calcular la posición del receptor con exactitudes del orden de algunos metros.

Más allá del servicio de posicionamiento, la red GPS se utiliza en el ámbito de la metrología de tiempo y frecuencia como método de comparación remota de relojes. Para este fin existen receptores especialmente diseñados que aceptan señales de reloj externas de un pulso por segundo y una referencia de frecuencia de 10 MHz.

El método de Vista Común^{5, 6} GPS (CV) fue propuesto por D. W. Allan a comienzos de los 80. El principio de esta técnica se muestra en la figura 1: las estaciones 1 y 2 reciben simultáneamente la señal de sincronización de alguno de los satélites *j*, *k*, *l*, etc. Luego se mide la diferencia de tiempo entre la señal recibida y la generada por un reloj local. A partir de las diferencias de tiempos medidas, por ejemplo, con el satélite *k*:

$\delta t_1^k = t_1 - t_k$ y $\delta t_2^k = t_2 - t_k$ es posible obtener la diferencia de fases entre los relojes 1 y 2 (Ec. 1).

$$\delta t_{12} = (t_1 - t_k) - (t_2 - t_k) = t_1 - t_2 \quad (1)$$

Las fluctuaciones en los retrasos entre el emisor y los dos receptores debidas a la propagación de las señales en la atmósfera, se cancelan bajo la condición de que estén completamente correlacionadas. Esta situación ideal no sucede en la realidad, pero el método funciona correctamente incluso si las distancias de estaciones a satélites no son exactamente iguales.

Un factor importante es el algoritmo de implementación de la técnica. Principalmente, el filtrado de mediciones espurias (filtro de outliers).

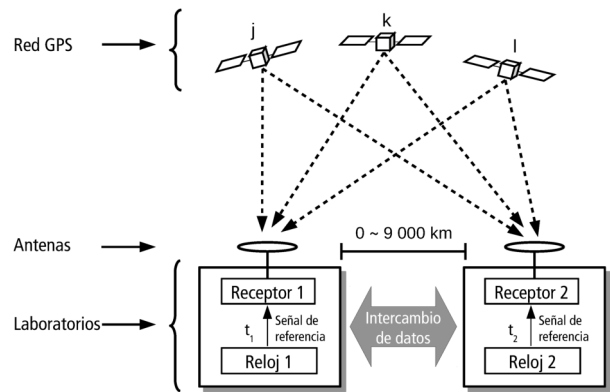


Figura 1. Esquema de una medición mediante la técnica de vista común GPS.

El método Three-Cornered-Hat

La técnica conocida como Three-Cornered-Hat (TCH) se utiliza^{7,8} en la comparación de osciladores de desempeños similares. La idea central es comparar las estabilidades entre los pares de relojes involucrados. A partir de esta información, es posible calcular la estabilidad propia de cada oscilador. Un esquema de la técnica se muestra en la figura 2.

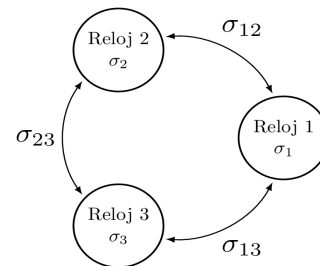


Figura 2: Comparación de tres osciladores mediante la técnica Three-Cornered-Hat

Las varianzas medidas entre pares de osciladores (σ_{12} , σ_{13} , y σ_{23}) se modelan como la suma cuadrática de las varianzas individuales (Ec. 2a, 2b y 2c).

$$\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (2a)$$

$$\sigma_{13}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 \quad (2b)$$

$$\sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (2c)$$

Para postular estas relaciones, se deben cumplir dos condiciones: las fluctuaciones de los osciladores deben ser independientes, y no debe existir (o debe removerse) cualquier deriva lineal en frecuencia. A partir de las ecuaciones (2) es posible calcular las varianzas individuales (σ_1 , σ_2 y σ_3) (Ec. 3a, 3b y 3c)

$$\sigma_1^2 = (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2) / 2 \quad (3a)$$

$$\sigma_2^2 = (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{13}^2) / 2 \quad (3b)$$

$$\sigma_3^2 = (\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{12}^2) / 2 \quad (3c)$$

Varianza de Allan

El uso del desvío estándar como estimador no está recomendado para el estudio de estabilidad en frecuencia. Esto se debe, entre otros motivos, a que no es convergente para cierto tipo de ruidos, comúnmente presentes en patrones de frecuencia^{9,10}. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 3. Allí se presentan las mediciones de la frecuencia de un oscilador de cuarzo estabilizado por horno, perteneciente a la base de tiempo de un contador universal.

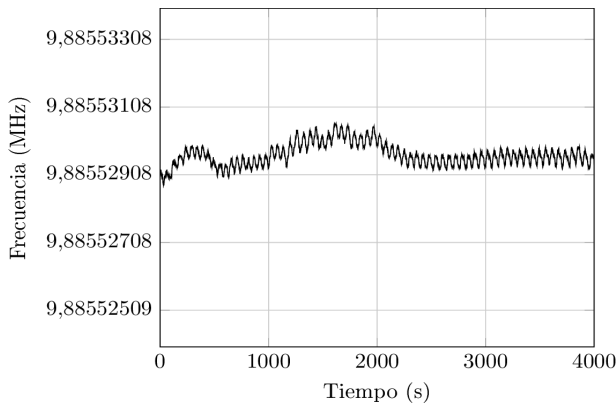


Figura 3: Frecuencia generada por un oscilador de cuarzo

En este caso, tomar sólo el promedio y el desvío estándar de los resultados de medición como estimadores, resultaría en una pérdida de información sobre el comportamiento de la frecuencia a lo largo del tiempo. Para realizar una estimación acertada del proceso estadístico en presencia de correlaciones (como en la figura 3) se utiliza la denominada *varianza de Allan*:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} [y_{i+1} - y_i]^2 \quad (4)$$

donde $y(t)$ es el i -ésimo desvío fraccional en frecuencia de los N totales, promediado en el intervalo de tiempo τ . En la figura 4 se esquematiza la idea detrás del promediado a diferentes tiempos τ . A partir de las mediciones originales (línea de puntos) se obtienen promedios temporales con distintas ventanas de muestreo (círculos celestes).

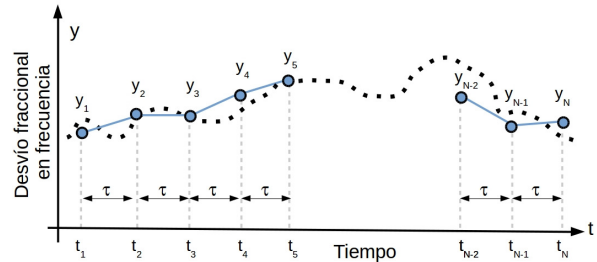


Figura 4: Promediado durante un intervalo temporal τ de frecuencias medidas.

Alternativamente, si se conoce la fase del oscilador bajo prueba respecto de un oscilador de referencia, la varianza de Allan puede escribirse como:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{M-2} [x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i]^2 \quad (5)$$

siendo $x(t)$ la i -ésima de las $M = N + 1$ fases medidas entre intervalos de tiempo τ .

Usualmente se trabaja con el desvío de Allan:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)} \quad (6)$$

Adicionalmente, a partir del estudio de $\sigma(\tau)$ vs τ puede conocerse la dependencia espectral del ruido presente en los osciladores. La determinación de las densidades espectrales $S_y(f)$ del ruido presente en osciladores puede modelarse según la superposición de cinco procesos independientes, los cuales siguen leyes de potencias con exponentes $-2 \leq \alpha \leq 2$:

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^{\alpha=2} h_\alpha f^\alpha \quad (7)$$

Cada contribución se manifiesta en diferentes pendientes en un gráfico doble-logarítmico $\sigma(\tau)$ vs τ . (Figura 5).

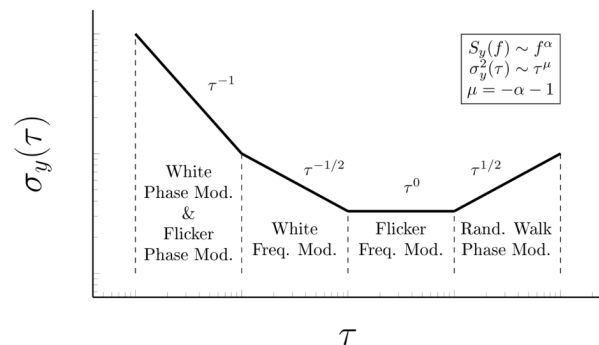


Figura 5: Dependencia de la varianza de Allan según la composición espectral del ruido presente.

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron datos de mediciones de CV durante dos meses (días 56877 a 56937, Fecha Juliana Modificada). Los relojes involucrados fueron los pertenecientes a los tres laboratorios descritos en la Introducción.

El algoritmo implementado¹¹ es una adaptación del utilizado por el Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris". En la figura 6 pueden verse la cantidad de satélites en CV, entre pares de relojes durante 16 días. Cada punto corresponde al número total de mediciones en CV durante 2,4 horas. Existe una merma en el número de satélites en CV en los días 56879 y 56886. En el primer caso, la disminución corresponde a una falla en el sistema del INTI, ya que no existe una baja análoga entre IGN y ONBA. En el segundo caso, la disminución no corresponde a problemas en alguno de los receptores, dado que la disminución afecta simultáneamente a los tres institutos.

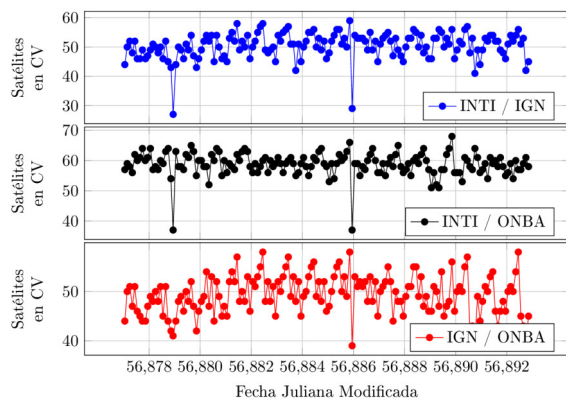


Figura 6: Satélites en CV entre pares de relojes, durante 16 días. Cada punto corresponde al número de total de mediciones de CV durante 2,4 horas.

En la figura 7 se muestran los resultados de las mediciones en CV entre INTI e IGN (se removió previamente una tendencia lineal en los valores de IGN). También se detallan a modo comparativo los resultados informados por el BIPM, según el producto “Rapid UTC” (UTC_r, cuadrados azules^a). Cada círculo corresponde al promedio durante 2,4 horas de las diferencias de tiempos entre relojes. En gris claro se señalan los intervalos generados por los desvíos estándar de los promedios. Puede apreciarse que los valores reportados por el BIPM y los calculados en este trabajo se solapan en todos los casos.

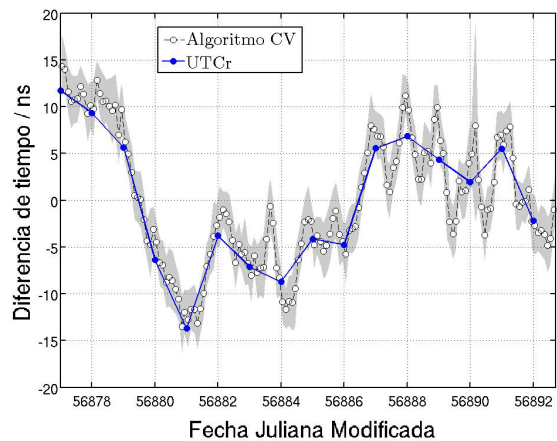


Figura 7: Diferencias de tiempo entre INTI e IGN, según análisis de CV y reporte UTC_r. Cada círculo de CV corresponde al promedio durante 2,4 horas. El sombreado gris corresponde al intervalo generado por el desvío estándar de las mediciones en cada punto.

Los valores cada 2,4 horas calculados permiten apreciar las oscilaciones diarias. Esta característica no es visible en los promedios diarios de UTC_r.

En la figura 8 se muestran los resultados de los desvíos de Allan obtenidos para el reloj mantenido en ONBA. Los valores se obtuvieron a partir del método TCH descrito en la introducción, aplicado a los relojes de los tres institutos involucrados.

Los valores con la leyenda “Especificación” corresponden a los valores máximos especificados por el fabricante del reloj. Los resultados obtenidos a través del presente trabajo confirman la tolerancia declarada por el fabricante. Como referencia, se agregaron segmentos con pendientes correspondientes a dependencias $\tau^{-1/2}$ y τ^{-1} . (Ver figura 5 y sección Varianza de Allan).

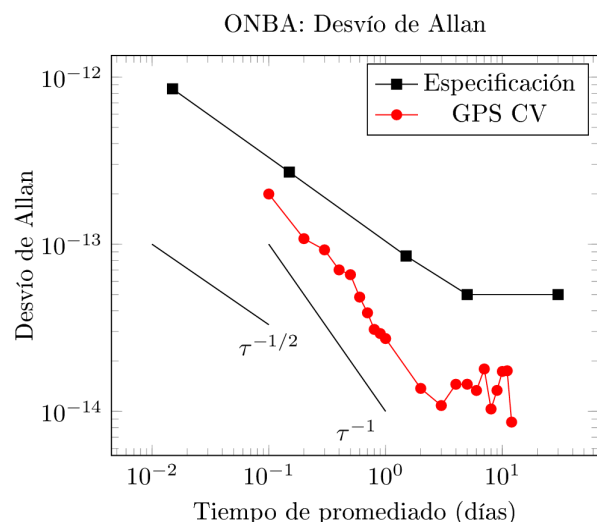


Figura 8: Desvíos de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo de promediado τ correspondientes al reloj ONBA según especificaciones del fabricante y resultados de CV.

^a Datos disponibles en <http://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/rapid-utc.html>

En el caso del IGN (figura 9), dado que el laboratorio contribuye a la realización de UTCr, es posible además comparar las varianzas obtenidas mediante CV con las obtenidas según la información provista por UTCr. Los resultados de ambos cálculos también son consistentes. Sin embargo, entre los 3 y 9 días de promediado, existen valores de desvío de Allan que arrojan resultados sin sentido físico (valores negativos). Este problema sucede cuando la cantidad de mediciones es insuficiente, las estabilidades de los osciladores comparados son muy diferentes o las mediciones presentan correlaciones¹⁰ (no es este el caso). Es común que este tipo de limitaciones de la técnica se presenten en los tiempos de promediación más altos.

Las varianzas calculadas para el reloj INTI se muestran

en la figura 10. En este último caso se incluyen, además de los datos según las especificaciones, UTCr y GPS CV, los valores informados por la red SIM Time Network^b. De acuerdo con este último reporte, para tiempos de promediación menores a 0,5 días, los valores de desvío de Allan superan levemente a los especificados por el fabricante.

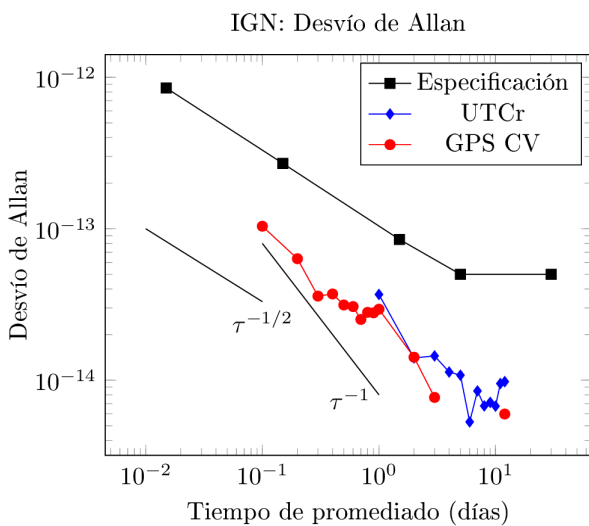


Figura 9: Desvíos de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo de promediado τ correspondientes al reloj IGN según distintos reportes.

Esta particularidad puede deberse a que los receptores GPS utilizados en la generación de la escala SIMT, sólo aplican correcciones ionosféricas modeladas según la información recibida por los satélites¹². Es decir, no se aplican correcciones post-procesadas como en el caso de la generación de UTC.

INTI: Desvío de Allan

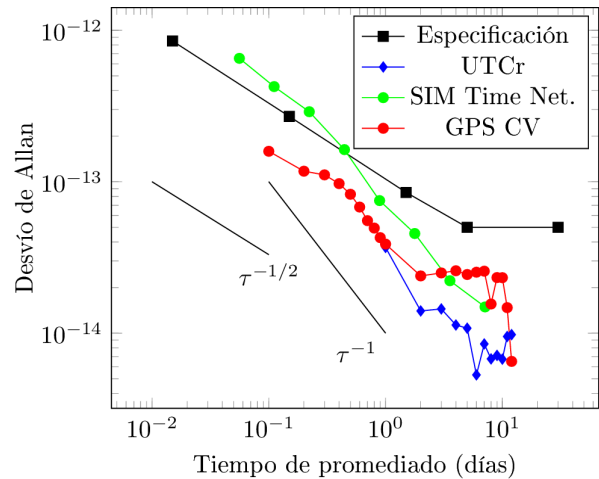


Figura 10: Desvíos de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo de promediado τ correspondientes al reloj INTI según distintos reportes.

De aquí que puedan presentarse oscilaciones con períodos de alrededor de 12 horas en los resultados, compatibles con las oscilaciones de la ionósfera entre día y noche.

El máximo desvío de Allan se produce para tiempos de promediado de 10 minutos, donde se obtiene un valor de $6 \cdot 10^{-13}$ según SIM Time Network, frente a $4 \cdot 10^{-13}$ especificado por el fabricante.

III. CONCLUSIONES

Se efectuaron mediciones de estabilidad combinando las técnicas de Vista Común y Three-Cornered-Hat. Los resultados son consistentes con los obtenidos a través de los informes del BIPM. El método desarrollado permitió evaluar las estabilidades de los relojes involucrados, a tiempos de promediado de 2,4 horas. Esta caracterización resulta particularmente valiosa para el del reloj mantenido en el ONBA, dado que al no participar de UTCr, la única información que se posee es a través de UTC (con un valor promedio por semana). Los tres relojes analizados presentan valores de estabilidad compatibles con sus especificaciones, excepto el reloj de INTI a tiempos menores a 12 horas de promediación (según la estimación del SIM Time Network).

Como continuación del presente trabajo se propone analizar los ruidos presentes en los relojes (flicker, random walk, etc.) y evaluar las incertidumbres correspondientes a los desvíos de Allan calculados.

IV. REFERENCIAS

- 1 - Bauch, A. *Measurement Science and Technology*, **14**, 1159-1173 (2003).
- 2 - Vig, J.R. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* **40**, 522-527 (1993).
- 3 - Petit, G., Arias, F., Harmegnies, A., Panfilo, G., and Tisserand, L. *Metrologia*, **51**, 33-39 (2014).

^b Datos disponibles en <http://tf.nist.gov/sim/>

- 4 - López-Romero, J. M., Lombardi, M., Diaz-Muñoz, N., and de Carlos-Lopez, E. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **62**, 3343-3350 (2013).
- 5 - Allan, D. W., and Weiss, M. A. Proc. 34th Ann. Freq. Control Symposium 334-346 (1980)
- 6 – Defraigne, P. and Baire, Q., *Adv. Space Res.* **47**, 265-275 (2011).
- 7 - Gunn, L. J., et al. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **63** 889-895 (2014)
- 8- Verlotte, F., Addouche, M., Delporte, J., and Brunet, M. *Frequency Control Symposium and Exposition, 2004.* 482-488 (2004)
- 9 - Allan, D. W. Proceedings of the IEEE, **54(2)**, 221-230.(1966)
- 10 - Riley, W. J. *Handbook of frequency stability analysis.* Gaithersburg, MD: US Dep. of Commerce, NIST. (2008)
- 11 - Costa, R., et al. "GPS Common view data processing algorithm." *IEN Technical Repport* (2004).
- 12 – Lombardi, M., et. al. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, **116**, 557-572 (2011)