

Técnica de Common View para GNSS con osciladores de bajo coste

Jaime Lozano¹, Javier Díaz¹, Eduardo Ros¹, Héctor Esteban² y Carmen Vélez²

Resumen— Una gran variedad de sectores, como telecomunicaciones, finanzas y distribución de energía requieren de una sincronización precisa. Cuando se trata de sincronización de alta precisión entre puntos lejanos (>1000 km) se emplean habitualmente técnicas de transferencia de tiempo mediante satélites de geonavegación.

Dentro de estas técnicas, la empleada mayoritariamente se conoce como *Common View* y consiste en el empleo de receptores especializados y relojes atómicos de elevado coste.

En esta investigación se ha desarrollado un sistema embebido con capacidad para realizar common view empleando un oscilador de coste medio y una alta frecuencia de correcciones. Esto reduce en dos órdenes de magnitud el coste de la sincronización, aumentando así el número de posibles usuarios y abriendo un abanico de aplicaciones.

Palabras clave— Sincronización, transferencia de tiempo, GNSS, medida de tiempo, common view, CCGTTS, RINEX.

I. INTRODUCCIÓN

EL despliegue de las redes 5G requiere de una mayor precisión en la sincronización [1]. Esto supone un empuje en la búsqueda de alternativas para telecomunicaciones.

En el trading de alta frecuencia, se conoce como deslizamiento a la diferencia de precio entre el momento en el que se coloca una orden y su ejecución. Este efecto disminuye reduciendo la latencia y aumentando la granularidad. Actualmente, NASDAQ registra las operaciones con una precisión de nanosegundos [2].

En las redes de distribución de energía, es necesaria una sincronización precisa para realizar diversas tareas relacionadas con la operación y seguridad [3].

Para la obtención de imágenes del espacio mediante la técnica de interferometría, es necesario determinar con exactitud cuando se tomó la imagen. Esta sincronización permite mantener la coherencia durante la observación y las comunicaciones[4].

Todos estos ejemplos ilustran la necesidad de desarrollar sistemas de sincronización más precisos o económicos. En definitiva, que mejor se ajusten a los requisitos.

Los sistemas de posicionamiento por satélite, como GPS, permiten obtener una señal de sincronismo. Esto permite alcanzar un elevado nivel de precisión con una alta disponibilidad, a bajo coste y de forma global.

Esta técnica da solución a varios de los problemas comentados anteriormente. Sin embargo, pre-

senta ciertos riesgos frente a posibles interferencias o ataques debido a la poca potencia de recepción en tierra. Existen receptores que incorporan tecnologías para detectar estas interferencias, pero no pueden mantenerse en operación más allá de informar de que la señal no es confiable.

Por tanto, parámetros como la robustez frente a interferencias, la precisión alcanzada y el coste asociado, son importantes a la hora de implementar un sistema de sincronización mediante satélites de geonavegación.

En este estudio no solo se han abordado esas cuestiones, sino que se ha desarrollado un sistema de alta precisión, con las técnicas y equipos empleados habitualmente por los institutos nacionales de metrología; y otro de bajo coste. Permitiendo así encontrar solución a un amplio rango de usuarios.

II. ¿QUÉ ES LA SINCRONIZACIÓN POR SATÉLITE?

La sincronización por satélite comprende a las diferentes técnicas que emplean satélites para la distribución de tiempo y frecuencia. Estas técnicas se pueden clasificar en función del tipo de órbita empleada, con lo que tendríamos satélites en órbita baja (LEO), satélites en órbita media (MEO) y satélites en órbita geoestacionaria (GEO).

Todos estos sistemas tratan de seguir a UTC, Tiempo Universal Coordinado, que es la referencia de tiempo establecida con la contribución de 70 laboratorios distribuidos por todo el mundo. Desde los centros de control de cada uno de los respectivos sistemas, se envían correcciones a los satélites y estos envían el tiempo a los usuarios finales.

A. Satélites en órbita baja

En los satélites en órbita baja para sincronización se encuentra la constelación Iridium. Desarrollada en principio como un sistema de telefonía ubicuo, también permite obtener posicionamiento, navegación y tiempo.

Debido a la baja altura de la órbita, 850 km, la potencia de recepción es elevada por lo que permite la sincronización en interiores [5]. La precisión garantizada es de 500ns, aunque la precisión alcanzada es generalmente superior, alcanzando su máximo de 100ns. Por este motivo, Iridium, en lo que a timing se refiere, suele plantearse como un respaldo ante posibles fallos en la recepción de GNSS en aplicaciones críticas [6].

B. Satélites en órbita media

En órbita media se encuentran las constelaciones de geonavegación satelital, como GPS, GLONASS,

¹Dpto. de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Universidad de Granada, e-mail: jaimelozano@ugr.es.

²Departamento de Tiempo, Real Instituto y Observatorio de la Armada, Cádiz

Galileo y Beidou. Estos satélites orbitan a una altura de unos 20000 km y la potencia de recepción es unas 1000 veces inferior a Iridium por lo que no es posible el posicionamiento en interiores [7]. A menudo, los receptores permiten emplear varias constelaciones a la vez, aumentando así la visibilidad de satélites. La precisión alcanzable mediante estos sistemas es de 1 a 10ns.

En la actualidad, el 93 % de las telecomunicaciones emplean GNSS para su sincronización [8]. Los requerimientos, cada vez más elevados con la aparición del 5G, y el bajo coste de adquisición de un receptor, hacen de los sistemas GNSS una solución atractiva.

Para aquellas aplicaciones en las que el nivel de precisión alcanzado por GNSS no es suficiente o en las que es necesario tener trazabilidad del tiempo recibido por el receptor con respecto a otra referencia de tiempo (como es el caso de los Institutos de Metrología Nacionales), se emplean técnicas como la desarrollada en este proyecto, denominada Common View.

C. Satélites geoestacionarios

En órbita geoestacionaria resulta más sencillo realizar la transferencia de tiempo, sin embargo, es necesaria una comunicación bidireccional. Esta técnica se conoce como two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT, y permite una sincronización sub-nanosegundo [9]. Su uso es más exclusivo ya que precisa de equipos específicos.

En las aplicaciones más restrictivas, como la determinación de UTC, se emplea esta técnica junto a common view para mejorar la solución de timing.

D. Common View

Common view es una técnica de transferencia de tiempo que emplea un oscilador de altas prestaciones y satélites de geonavegación para mejorar el tiempo obtenido directamente de éstos.

Imaginemos que queremos sincronizar dos relojes que distan 300 km. Si empleásemos la señal recibida directamente de GNSS, el error introducido por las imprecisiones en la órbita, los errores en los relojes, la ionosfera y la troposfera, sería de unos 5 ns.

Con la técnica de common view, cada receptor calcula la diferencia de tiempo que existe entre su oscilador y la hora recibida del satélite. Estas diferencias se guardan en un fichero que luego se envía a aquel usuario que quiere sincronizarse y éste calcula para cada instante de tiempo y cada satélite la diferencia. De este modo se cancelan todos los errores e imprecisiones comentados anteriormente, quedando únicamente, la variación entre los osciladores. Este procedimiento se muestra en la figura 1.

Esta técnica encuentra dos limitaciones. En primer lugar, el mismo satélite debe estar visible para ambos receptores. Los satélites en elevaciones pequeñas a menudo producen errores por lo que se suele emplear una máscara de 10° . Esto reduce notablemente el número de satélites disponibles. En segundo lugar,

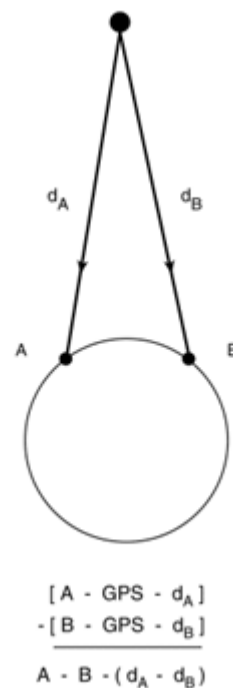


Fig. 1: Técnica de Common View [10].

la ionosfera varía a medida que la distancia entre los receptores se hace mayor, por lo que esta técnica solo puede emplearse para distancia entre receptores de unos pocos miles de kilómetros [11].

Una mejora a esta técnica es el método all-in-view, que consiste en calcular las diferencias de tiempo entre el oscilador y la hora recibida de todos los satélites (no solo los visibles por ambos receptores como se haría en common view). Para obtener el dato de aquellos satélites en los que no se compartía visibilidad en ese instante, se interpola a partir de los datos obtenidos en instantes diferentes. Este método mejora la precisión de common view [12].

E. Osciladores

El oscilador es una parte fundamental del setup experimental ya que proporciona la señal sobre la que se van a aplicar las correcciones para seguir a UTC. Una de las medidas más interesantes para caracterizar los osciladores es la desviación de Allan (ADEV), que mide la dispersión en frecuencia frente al número de muestras promediadas. Se pueden clasificar en tres gamas:

- Bajas prestaciones: son los osciladores de cuarzo presentes en la mayoría de los dispositivos electrónicos. Están compuestos de una lámina de cuarzo que resuena a una frecuencia característica. Esta frecuencia varía con la tensión de alimentación y con la temperatura, por lo que su uso como frecuencia de referencia no es fiable.
- Prestaciones medias: emplean osciladores de cuarzo sobre los que se realiza un control de la tensión o la temperatura para mantener estable la frecuencia. Comúnmente denominados TCXO o OCXO, por sus siglas en inglés Temperature/Oven Compensated Crystal Oscillator. Su es-

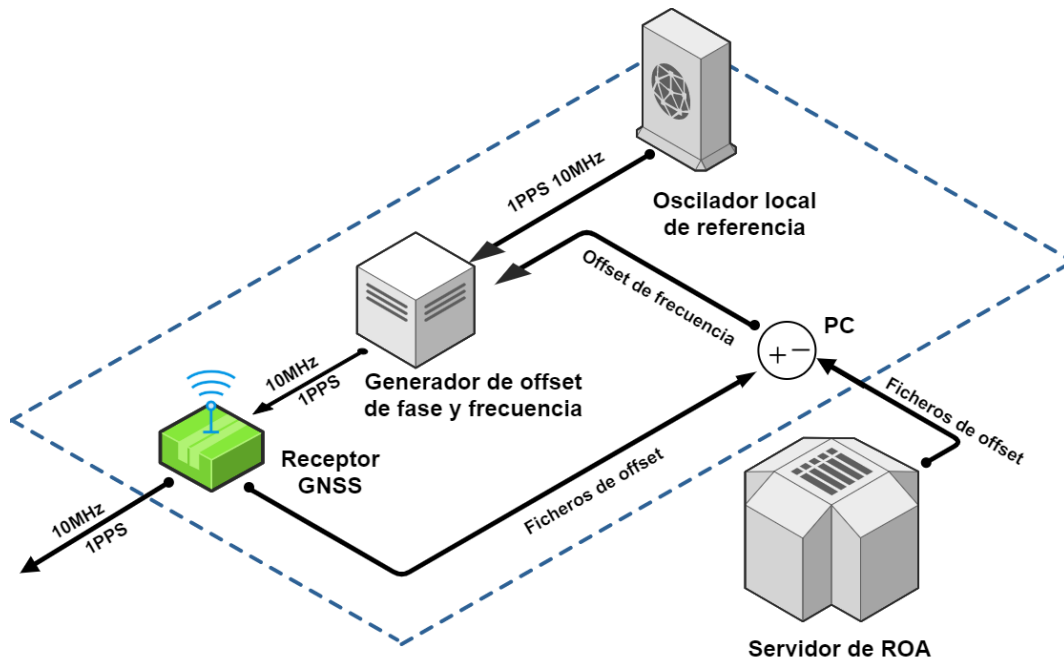


Fig. 2: Common View empleando un oscilador local de referencia. El PC obtiene los ficheros de offset del receptor local y el laboratorio remoto, aplica el algoritmo de Common View y envía la corrección de frecuencia al generador de offset.

tabilidad en un segundo es $< 1.5E-13$.

- Altas prestaciones: emplean la frecuencia de resonancia de un elemento contenido en una lámpara de descarga. Se denominan relojes atómicos y los materiales que emplean son rubidio, cesio e hidrógeno. La estabilidad alcanzada es de $8E-14$ en un segundo. Tienen un coste elevado por lo que su empleo suele restringirse a uso militar, telecomunicaciones, finanzas, metrología y ciencia. Los satélites de geonavegación están equipados con este tipo de oscilador.

En la figura 3 se puede observar la estabilidad para diferentes tipos de relojes. El reloj empleado en esta aplicación, OCXO (en verde), presenta mayor estabilidad que el reloj atómico de rubidio para tiempos de integración menores a décimas de segundos.

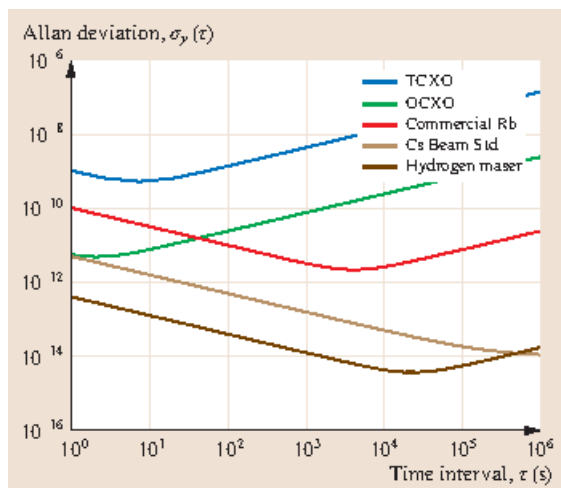


Fig. 3: Estabilidad de diferentes tipos de relojes [11]

F. Algoritmos de control para aplicaciones de timing

El control puede realizarse de dos maneras. Empleando la señal de error, que en este caso se podría determinar como el offset o la frecuencia, y aplicar métodos clásicos de control en bucle cerrado, con un controlador PID [13]. O bien, determinar la función de transferencia de la planta y realizar un control en bucle abierto.

Tras estudiar las técnicas de disciplinado de relojes y consultar las prácticas de ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada), se ha decidido realizar un control en bucle cerrado con control proporcional e integral. La parte proporcional permite corregir rápidamente el error mientras que la parte integral elimina el error en estado estacionario.

Para el control es importante tener en cuenta la frecuencia de muestreo. Los institutos de metrología generan un dato cada 16min, este dato es muy ruidoso por lo que generalmente se realiza una corrección al día empleando una regresión lineal de todos los datos recogidos durante el día.

La configuración de este proyecto no debe confundirse con un GPSDO (GPS Disciplined Oscillator) [14]. Un GPSDO es un dispositivo compuesto por un oscilador que emplea un receptor GNSS para medir su error y variar su frecuencia. De esta forma obtiene una señal de sincronización de gran estabilidad en el largo plazo, pero ruido elevado en el corto plazo, debido a los errores comentados en el apartado Common View. En este setup se está realizando la técnica de Common View, cancelando por tanto los errores y obteniendo estabilidad en el largo plazo y bajo ruido en el corto plazo.

Por otro lado, en Common View, dado que se está disciplinando respecto a un laboratorio, lo que se está obteniendo es una realización de UTC (Tiempo Universal Coordinado). Esto permite replicar la

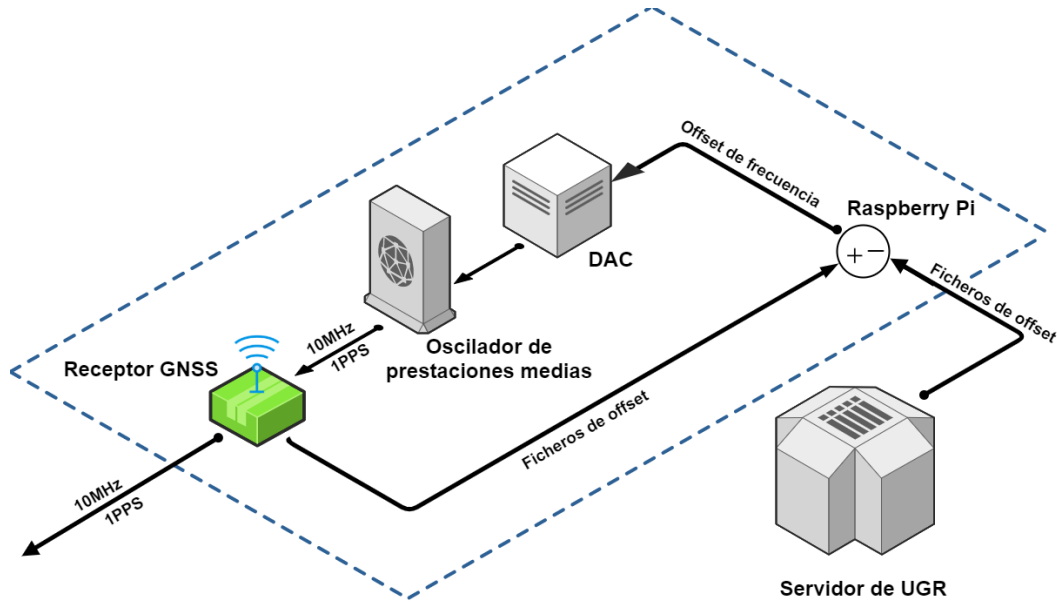


Fig. 4: Componentes y conexiones para la técnica de Common View de bajo coste implementada. El procedimiento es similar al mostrado en la Fig. 2, sin embargo, aquí se emplea una mayor tasa de correcciones.

hora de aquel laboratorio que se esté trazando. En este caso UTC(ROA). Por lo tanto, esta técnica puede emplearse para determinar que se cumple con la diferencia máxima respecto a UTC según la regulación requerida, como por ejemplo, en la regulación MIFID-II para el mundo financiero.

G. Calibración del sistema

En un montaje de altas prestaciones de tiempo que emplee GNSS es imprescindible realizar una buena calibración del sistema compuesto por la antena, el cable y el receptor.

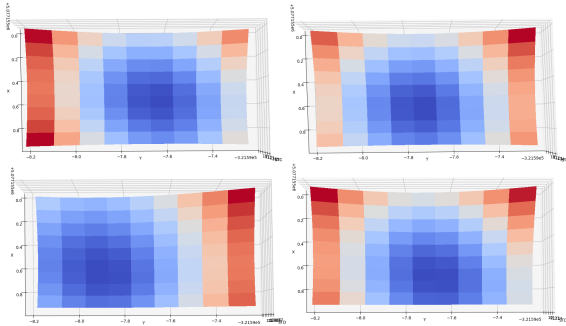


Fig. 5: Vista en planta de la posición óptima de la antena. En azul la posición óptima. Resultados de cuatro días distintos mostrados en una cuadrícula de 1x1m con una resolución de 10cm.

Por un lado, es preciso determinar con precisión la posición de referencia de la antena (ARP). Para ello se ha aplicado post-procesado de los datos empleando la técnica PPP (Precise Point Positioning) gracias a [15]. Una buena posición de la antena reduce la desviación estándar de los offsets obtenidos de los satélites. Con este principio se ha realizado un algo-

ritmo que, con la posición inicial en el centro, calcula las distintas desviaciones estándar en una cuadrícula de 1x1m. En la figura 5 se observa este cálculo para cuatro días diferentes. Mediante este método no se han observado mejoras significativas debido a que el punto óptimo medio es el obtenido con PPP y se desprende que la posición obtenida con PPP es la correcta.

Por otro lado, es necesario calcular los retrasos debidos a la antena, cable y receptor. El retraso debido a la antena y el cable se ha obtenido introduciendo un pulso en el cable y observando el tiempo de vuelta, luego se ha dividido entre dos para obtener el tiempo que tarda la señal en recorrer esa distancia. Este cálculo se observa en la figura 6 y se estima de $X_c = 315/2 = 157\text{ns}$.

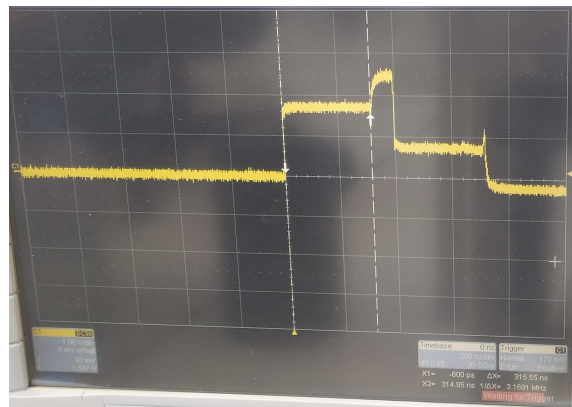


Fig. 6: Para la calibración del retraso introducido por el cable y la antena se introduce un pulso y se obtiene instantes después la señal reflejada.

El retraso debido al receptor se calcula y corrige automáticamente en el receptor empleado para el

Tabla I: Precios aproximados de los componentes.

Setup	Oscilador	Receptor GNSS	Modificador de frecuencia
Altas prestaciones	phMaser VCH-1008 (70 000€)	PolarX5-TR (10 000€)	HROG-10 (3 000€)
Bajo coste	MV341 (200 €)	Mosaic-T (800€)	AD5662 (2 €)

sistema de altas prestaciones.

III. DESCRIPCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

La configuración para realizar la técnica de common view está compuesta por dos elementos básicos: un receptor GNSS y un oscilador. Esta configuración básica permite ver la diferencia entre el oscilador y sistema GNSS de referencia, que puede ser GPS, GLONASS, Galileo. . . Todos estos sistemas siguen a Universal Time Coordinated (UTC) con unos pocos nanosegundos de diferencia. Adicionalmente, se emplea un generador de offset de fase y frecuencia para hacer el control en bucle cerrado y tomar este offset como señal de error. La función del PC es descargar los ficheros del receptor GNSS y el servidor, aplicar el control y enviar las correcciones al generador de offset de fase y frecuencia. Este proceso se ilustra en la figura 2.

La configuración física se muestra en la figura 7. Se puede observar el reloj atómico situado en la parte inferior con el generador de offset encima.

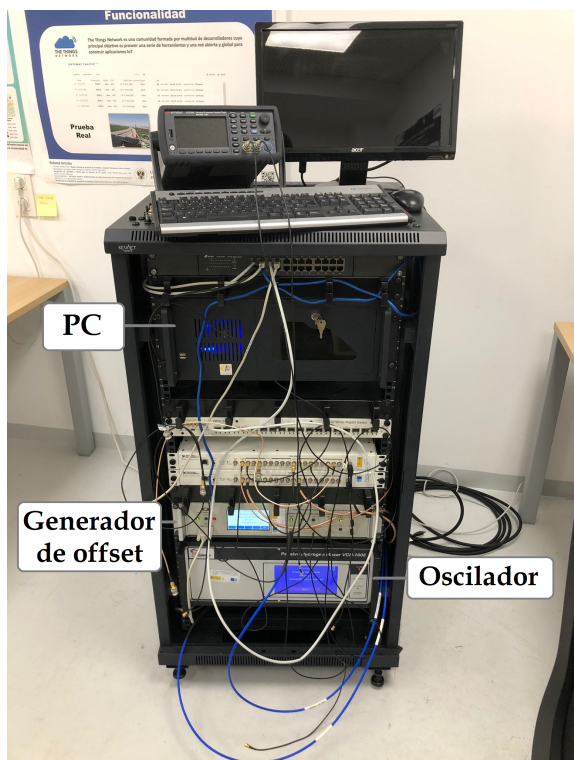


Fig. 7: Configuración física setup de altas prestaciones.

Se han implementado dos setups, uno de altas prestaciones y otro de bajo coste. En la tabla I se muestran los componentes empleados y el coste aproximado.

Ahora que se conoce el procedimiento de common view habitual se va a comentar el procedimiento de bajo coste desarrollado. Para ello se han empleado los siguientes materiales:

- Raspberry Pi 3b+
- Receptor GNSS Mosaic-T
- Oscilador OXCO MV341
- Circuito del oscilador con DAC AD5662

Su interconexión se muestra en la figura 4. Estas modificaciones suponen cambios sustanciales en el código debido a varios motivos que se especifican a continuación.

El receptor Mosaic-T, a diferencia del PolaRx5, no genera los ficheros de offset en formato CGGTTS [16] por lo que se ha configurado para generar los ficheros RINEX [17]. Éstos se descargan y posteriormente se llama al programa R2CGGTTS desarrollado en el ROB (Royal Observatory of Belgium), que permite generar los ficheros CGGTTS.

El circuito del oscilador está equipado con un DAC AD5662. El oscilador MV341 posee un pin para modificar la frecuencia variando la tensión, de esta forma es posible variar la frecuencia directamente del oscilador sin necesidad de un generador de offset. Ésta es la función del convertidor digital a analógico, que recibe por SPI el valor de tensión deseado y lo genera en su salida.

Mientras que en el procedimiento habitual de common view, las correcciones se realizan una vez al día, en este diseño se plantea realizar las correcciones varias veces al día.

Existe un compromiso entre la tasa de correcciones y el ruido inherente del sistema. La selección de la frecuencia de operación, calibración del sistema, filtrado de los datos y la selección del oscilador, afectan a la tasa de correcciones. Todavía no se ha definido esta tasa, sin embargo, se estima que será de entre 16min y 4h.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 8 se muestra el resultado del control realizado con el setup de altas prestaciones sincronizando su salida a la de GPS con una corrección cada 16min. Esta configuración corresponde a un GPSDO y se ha realizado simplemente para comprobar que se está realizando el control correctamente.

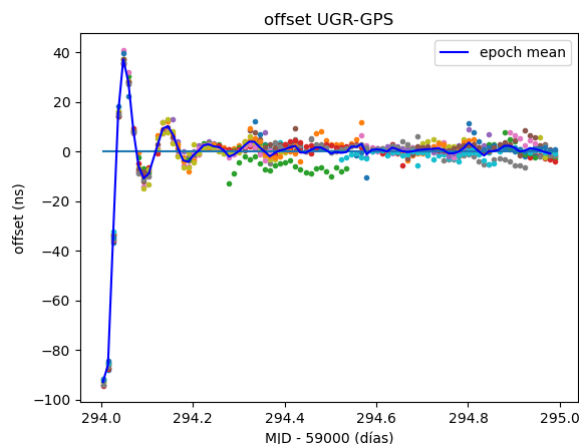


Fig. 8: Ensayo del controlador PI en el setup de altas prestaciones.

Los algoritmos desarrollados para el cálculo del Common View se han probado con los datos obtenidos de los institutos meteorológicos PTB y ROA. El resultado se muestra en la figura 9. Los puntos de colores corresponden a los offsets obtenidos para cada satélite. En azul, se muestra una media para cada

época. En naranja, una regresión lineal a lo largo de un día. Se puede observar que la diferencia entre PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) y ROA a lo largo de un día es de 0.24 ns.

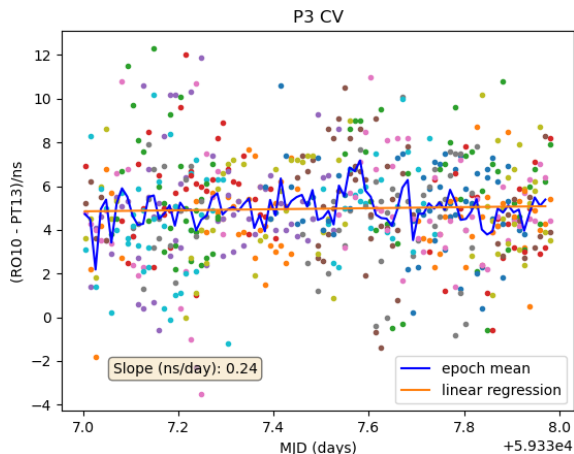


Fig. 9: Cálculo de Common View realizado con los datos obtenidos de los laboratorios metrológicos PTB y ROA.

En la figura 10 se muestra el resultado del control realizado con el setup de bajo coste sincronizando su salida a la de GPS con una corrección cada hora. Esta gráfica es preliminar y debe tomarse como una validación del diseño. Una mejor selección de las constantes deben mejorar la respuesta del sistema.

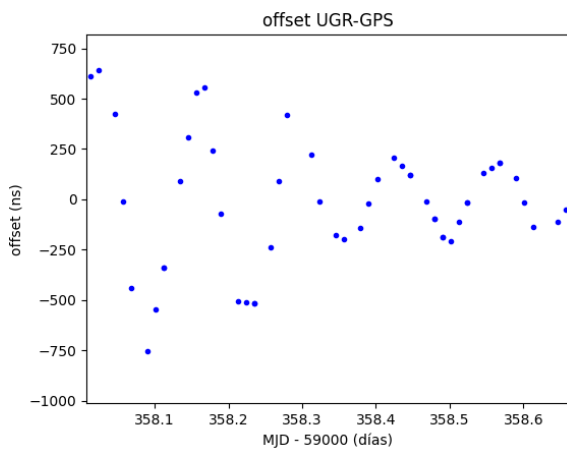


Fig. 10: Ensayo del controlador PID en el setup de bajo coste. Las constantes del ciclo de control no han sido optimizadas, sólo se ha utilizado para validar el ciclo de control.

V. CONCLUSIONES

En esta investigación se han revisado las distintas técnicas de sincronización por satélite, haciendo hincapié en los satélites de geonavegación en órbita media.

Se ha estudiado las limitaciones tales como imprecisiones en la órbita del satélite, los osciladores y el efecto de la ionosfera y cómo la técnica de common view permite cancelar estos efectos.

Finalmente, se ha implementado un sistema siguiendo las técnicas habituales y se ha diseñado e implementado un sistema de sincronización experimental empleando un oscilador de menor estabilidad con una mayor tasa de correcciones.

VI. TRABAJO FUTURO

El siguiente punto en el desarrollo de esta investigación corresponde a la optimización del control, empezando por una mejor selección de las constantes del controlador.

Por otro lado, se ha procesado los datos de GNSS y se ha demostrado que con una máscara de elevación mejora la precisión. Probablemente, un mejor filtrado de datos y la aplicación de predicción de series temporales puedan mejorar la precisión.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a ROA por su atención a las consultas y experiencia.

La presente investigación ha sido financiada mediante el Programa de Garantía Juvenil y el proyecto AMIGA-7.

REFERENCIAS

- [1] Ericsson, “5g is all in the timing,” <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/8/what-you-need-to-know-about-timing-and-sync-in-5g-transport-networks>.
- [2] Wei Li, “High frequency trading with speed hierarchies,” *Johns Hopkins University*, October 11, 2018.
- [3] Hao Guo and Peter Crossley, “Design of a time synchronization system based on gps and iee 1588 for transmission substations,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 2091–2100, 2017.
- [4] Raj Thilak Rajan, Mark Bentum, and Albert-Jan Boonsstra, “Synchronization for space based ultra low frequency interferometry,” in *2013 IEEE Aerospace Conference*, 2013, pp. 1–8.
- [5] *Report on Time & Synchronisation user needs and requirements*, European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2019.
- [6] Satelles, “Satelles white paper,” <https://satelles.com/wp-content/uploads/pdf/Satelles-White-Paper-2019.pdf>, 2019.
- [7] Orolia, “Frequently asked questions about stl,” <https://www.orolia.com/products/timing-sync/stl-faq>.
- [8] GSA Europe, “Timing & synchronisation,” <https://www.gsa.europa.eu/segment/timing-synchronisation-ts>.
- [9] NIST, “Two way time transfer,” <https://tf.nist.gov/time/twoway.htm>.
- [10] NIST, “Common view gps time transfer,” <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-services/common-view-gps-time-transfer>.
- [11] David Allan and Marc Weiss, “Accurate time and frequency transfer during common-view of a gps satellite,” 02 1980, pp. 334–346.
- [12] European Space Agency, “Navipedia,” https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Time_and_Frequency_Transfer_Techniques.
- [13] Antonio Visioli, *Practical PID Control*, Springer, London, 2006.
- [14] Michael A. Lombardi, “The use of gps disciplined oscillators as primary frequency standards for calibration and metrology laboratories,” *NCSLI Measure*, vol. 3, no. 3, pp. 56–65, 2008.
- [15] Natural Resources Canada, “Precise point positioning,” <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
- [16] Pascale Defraigne and Gerard Petit, “Cggtts-version 2e: an extended standard for gnss time transfer,” *Metrologia*, vol. 52, no. 6, pp. G1–G1, 2015.
- [17] Werner Gurtner and Lou Estey, “Rinex-the receiver independent exchange format-version 3.00,” *Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, Boulder, Colorado*, 2007.