

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Medición de la diferencia de fase de la señal de salida de osciladores atómicos mediante comparación satelital.

Trabajo de grado para optar el título de
Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

Claudia Fernanda Rodríguez Rodríguez

Director

Nelson Enrique Vera Parra. PhD.

Co-director

Nelson Bahamón Cortés. MSc.

Bogotá D. C. – Colombia

Abril de 2026

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 6

2. DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y DE FUNCIONAMIENTO PARA EL DISEÑO DEL PROTOTIPO 12

2.1. ESTADO DEL ARTE 12

2.1.1. Patrón de Tiempo y Frecuencia. 12

2.1.2. Sistema de Posicionamiento Global GPS. 13

2.1.3. Método De Vista Común – Common View 14

2.1.4. Formatos Estándar para el Intercambio de Datos 17

2.1.4.1. Formato RINEX. 17

2.1.4.2. Formato CGGTTS. 19

2.2. FUNCIONALIDADES Y REQUERIMIENTOS PARA EL PROTOTIPO 21

2.3. INFRAESTRUCTURA Y EVALUACIÓN DEL EQUIPAMIENTO DEL LABORATORIO 22

2.3.1. Infraestructura del Laboratorio 23

2.3.2. Evaluación del equipamiento del laboratorio. 27

3. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN 30

3.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN 30

3.2. MODELO MATEMÁTICO 36

3.3. DISEÑO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS 43

3.4. DISEÑO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE DATOS 44

4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN 45

4.1. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO 45

4.2. CONFIGURACIÓN DEL RECEPTOR ZED-F9T 47

4.3. SOFTWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS 54

4.4. SOFTWARE PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS 58

5. AJUSTE DE PARÁMETROS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MEDICIÓN 63

5.1. VALIDACIÓN DE SOFTWARE 63

5.1.1. Validación del software de adquisición de datos 63

5.1.2. Validación del software de procesamiento de datos 68

5.2. AJUSTE DE PARÁMETROS 70

5.3. VALIDACIÓN DEL MÉTODO COMMON-VIEW 75

6. CONCLUSIONES 83

7. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS 85

8. PRINCIPALES APORTES 87

9. REFERENCIAS 89

LISTA DE ABREVIATURAS

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures (Oficina Internacional de Pesas y medidas).
CCTF	Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia.
CGGTTS	Common GNSS Generic Time Transfer Standard
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGS	International GNSS Service
INM	Instituto Nacional de Metrología de Colombia
KCDB	Key Comparison Database
NIST	National Institute of Standards and Technology
PPP	Precise Point Positioning
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIM	Sistema Interamericano de Metrología
TAI	Tiempo Atómico Internacional
TIC	Contador de Intervalos de Tiempo
UTC	Universal Time Coordinated

DEFINICIONES

Tabla 1.

Definiciones de los términos más utilizados

Término	Definición
Base de tiempo	Un oscilador interno de un instrumento electrónico sirve como referencia para todas las funciones de tiempo y frecuencia que realiza dicho instrumento. En la mayoría de los instrumentos, el oscilador de base de tiempo es de cuarzo, a menudo un OCXO. Sin embargo, también existen osciladores de rubidio y cesio.
Disciplinar	Un oscilador cuya frecuencia de salida se ajusta continuamente (a menudo mediante un bucle de enganche de fase) para que coincida con una referencia externa.
Exactitud	El grado de conformidad de un valor medido o calculado con su definición, en relación con la desviación respecto a un valor ideal. En el ámbito del tiempo y la frecuencia, la exactitud se refiere a la desviación temporal o de frecuencia de un dispositivo.
Oscilador	Un dispositivo electrónico se utiliza para generar una señal oscilante. La oscilación se basa en un evento periódico que se repite a una frecuencia constante. El dispositivo que controla este evento se denomina resonador. El resonador necesita una fuente de energía para mantener la oscilación. En conjunto, la fuente de energía y el resonador forman un oscilador. Los dos tipos de osciladores principales para mediciones de tiempo y frecuencia son los osciladores de cuarzo y los osciladores atómicos.
Patrón	Un dispositivo o señal se utiliza como referencia de comparación para una medición. Un estándar se utiliza para medir o calibrar otros dispositivos.
Reloj	Un reloj es un dispositivo que genera señales periódicas y espaciadas con exactitud para aplicaciones de tiempo. Consta de al menos tres partes: un oscilador, un dispositivo que cuenta las oscilaciones y las convierte en unidades de intervalo de tiempo (como segundos, minutos, horas), y un sistema para mostrar o registrar los resultados.
TAI	El TAI reproduce el segundo del SI con la mayor precisión posible y funciona con la misma frecuencia que el Tiempo Universal Coordinado (UTC). Sin embargo, el TAI difiere del UTC en un número entero de segundos. Esta diferencia está relacionada con los segundos intercalares y aumenta cada vez que se produce uno.
Trazabilidad	La propiedad de un resultado de medición por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia a través de una cadena documentada e ininterrumpida de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de la medición.
UTC	La escala de tiempo atómico internacional sirve de base para la medición del tiempo en la mayor parte del mundo. UTC es un sistema de medición del tiempo de 24 horas. El UTC es calculado por el BIPM, promedia los datos recopilados de más de 450 patrones de tiempo y frecuencia atómicos ubicados en aproximadamente 70 laboratorios.

** Estas definiciones fueron tomadas de (National Institute of Standards and Technology, n.d.).*

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de las redes de comunicaciones ha permitido acceder y compartir información de manera rápida, la utilización de servicios y dispositivos en tiempo real, así como la diseminación de la hora legal ofreciendo exactitudes en el orden de los milisegundos. Sin embargo, la infraestructura de red de internet es limitada para lograr mediciones con exactitudes en el orden de los nanosegundos para algunas aplicaciones que lo requieren.

Desde hace unos años se utilizan los sistemas satelitales de posicionamiento global GNSS para fines de navegación, transporte, geodésicos y otros, los cuales proveen información sobre la posición y la hora con alta exactitud, por esta razón el uso de estos sistemas de comunicación permite realizar comparaciones de osciladores atómicos de cesio.

El INM custodia los Patrones Nacionales de la magnitud de Tiempo y Frecuencia, un conjunto de osciladores atómicos de cesio de alta exactitud[1], que materializan el segundo como la unidad del tiempo en el SI. La trazabilidad metrológica en la magnitud de Tiempo y Frecuencia para Colombia se establece a partir de la realización local de la hora, designada como UTC (INM), y es trazable por medio de la participación en la comparación clave CCTF-K001.UTC pilotada por el BIPM y publicada en el KCDB del BIPM en la cual participan 95 Institutos Nacionales de Metrología o Institutos designados de todo el mundo. Esta es la única comparación clave que ha sido definida por el CCTF del BIPM (CCTF-WGMRA, 2015) y en la cual el INM participa desde el año 2017, lo que le permite contribuir al cálculo del UTC.

Para participar en la comparación clave CCTF-K001.UTC, el laboratorio debe contar con equipamiento especializado para generar, mantener, coordinar y difundir la hora legal UTC(INM). Este consta, entre otros equipos, de osciladores atómicos de cesio de alta exactitud y sistemas de comparación (receptores GNSS) (CCTF-WGMRA, 2017). Específicamente, el INM cuenta con dos sistemas de comparación, ambos desarrollados y donados por el instituto nacional de metrología de los Estados Unidos NIST, un sistema denominado Sistema de medición de Vista Común de Tiempo y Frecuencia SIMT donde participan los laboratorios de América y otro sistema denominado Receptor para Transferencia de Tiempo NIST-TAI 1 para la comparación del BIPM.

El INM siendo una entidad del Estado Colombiano, debe velar por prestar sus servicios al país de manera oportuna, eficiente y segura, cumpliendo con la normatividad propia del sector público. En los últimos años se han creado nuevos servicios de calibración y medición de acuerdo con las

[1] *5071A Cesium Primary Time and Frequency Standard.* *https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/FTD/ProductDocuments/Brochures/5071A-Sell-Sheet-00002980.pdf*

necesidades del país los cuales han permitido atender a muchos sectores de la economía. Así mismo, ha iniciado su trabajo en temas de transformación digital mediante la implementación de sistemas de información, aplicativos de medición, entre otros, con el fin de reducir el tiempo y los costos y mejorar el servicio al cliente. A pesar de ello, aún existen problemas de diseminación de la trazabilidad metrológica en varias magnitudes dado que el INM no cuenta con la infraestructura y capacidad suficiente para atender la gran demanda de servicios nuevos que requiere el país.

Específicamente, el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia incursionó en el desarrollo de un servicio de medición remota 24/7 a través de internet, el cual que permite hacer un monitoreo del estado de sincronización de un servidor del cliente con respecto a la hora legal emitida por el INM, obteniendo exactitudes en el orden de los milisegundos. Para este servicio se desarrolló un aplicativo de medición personalizado como una solución para generar confianza en la datación de eventos (Rodriguez Claudia Fernanda et al., 2021). Sin embargo, existen limitaciones actuales en cuanto a la diseminación de la trazabilidad en Tiempo y Frecuencia para el sector de telecomunicaciones (alta exactitud).

En el sector de las telecomunicaciones es común el uso de osciladores atómicos de cesio de tipo comercial para la sincronización de redes, debido a su alta exactitud. No obstante, a pesar de su desempeño, las mediciones asociadas a estos instrumentos generalmente no cuentan con trazabilidad metrológica, ya que no se realizan calibraciones ni participan en ejercicios de comparación con otros osciladores. Esta situación limita el aseguramiento de la validez de los resultados de medición, impidiendo evaluar adecuadamente el estado de funcionamiento del oscilador y determinar si es apto para operar en procesos de sincronización de redes.

En este contexto, el oscilador de cesio del Instituto Nacional de Metrología (INM) cuenta con trazabilidad metrológica al participar en intercomparaciones a nivel internacional, como las del SIM y su contribución a la escala UTC. Por ello, resulta necesario establecer métodos de medición que permitan asegurar la trazabilidad y asegurar la validez de los resultados en los osciladores utilizados en el sector de telecomunicaciones. Actualmente, el INM no cuenta con un sistema para la medición de la señal de salida de osciladores atómicos que permita dar trazabilidad metrológica de alta exactitud, en el orden de los nanosegundos para estas empresas.

Entonces, la principal limitación es ¿Cómo implementar una comparación entre las señales de osciladores atómicos y el Patrón Nacional con el fin de proveer una oferta de trazabilidad metrológica obteniendo exactitudes en el orden de los nanosegundos? Por lo cual, se propuso diseñar, implementar y evaluar un sistema prototipo que permita comparar remotamente la señal de los osciladores de cesio basándose en comunicación satelital utilizando la tecnología GNSS, con el propósito de proveer una oferta de trazabilidad metrológica de alta exactitud.

El desarrollo del presente proyecto se estructuró en cuatro fases principales: análisis y definición de requerimientos y funcionalidades, diseño del prototipo del sistema de medición e implementación y evaluación de los resultados de medición.

En la primera fase se definieron las características técnicas y de funcionamiento necesarias para el diseño del prototipo, considerando tanto la infraestructura disponible en el laboratorio como los requerimientos asociados a la obtención de mediciones de alta exactitud. Para ello, se construyó el estado del arte sobre medición remota mediante GNSS en el contexto internacional, a partir de la revisión de literatura científica especializada y el intercambio técnico con otros Institutos Nacionales de Metrología (INM).

Con base en este análisis, se establecieron las funcionalidades mínimas que debía cumplir el sistema de medición, lo que permitió definir los requerimientos técnicos y de equipamiento necesarios. Adicionalmente, se identificaron los instrumentos disponibles en el laboratorio que podían ser utilizados, así como las posibles carencias de equipamiento.

La segunda fase se orientó al diseño del prototipo del sistema de medición conforme a los requerimientos definidos previamente. En esta etapa se estableció la arquitectura del sistema y se evaluaron las capacidades del hardware existente para la adquisición de señales provenientes de osciladores atómicos y de señales GNSS y la necesidad de adquirir instrumentación adicional, garantizando la viabilidad técnica y económica del proyecto. Asimismo, se formuló el modelo matemático del sistema, el cual describe la relación entre las observaciones GNSS, la referencia temporal y las correcciones aplicadas. Como parte del diseño, también se establecieron las actividades necesarias que debía ejecutar tanto el software de adquisición de datos como el de procesamiento de datos que permitiera la transmisión, recepción e interpretación de la información GNSS, para la captura de datos crudos requeridos para la medición.

En la tercera fase implementó el prototipo del sistema de medición, primero realizando su ensamblado y configuración, luego desarrollando el software de adquisición de datos que permite obtener los datos en los formatos estándar para el intercambio de información. Así mismo, se creó el software para el procesamiento de datos, encargado de transformar la información adquirida en resultados de medición coherentes, integrando así el equipamiento y el software desarrollado.

Finalmente, en la cuarta fase se llevaron a cabo procesos de validación del software, ajuste de parámetros y validación del método de medición Common-View, que llevó a los resultados de medición para verificar su correcto funcionamiento y cumplimiento de los requisitos.

Los objetivos del presente proyecto se formulan como el punto de partida que orienta y estructura el desarrollo del proyecto, definiendo el alcance y las metas a alcanzar en la implementación de

un sistema de medición basado en GNSS para la comparación de señales de osciladores atómicos.

Objetivo General

Realizar un sistema de medición que permita comparar señales de osciladores atómicos por medio de GNSS (Global Navigation Satellite System) para proveer una oferta de trazabilidad de alta exactitud en el país.

Objetivos Específicos

- Definir las características técnicas y de funcionamiento necesarias para el diseño del prototipo de sistema de medición a partir de la infraestructura actual del laboratorio y los requerimientos para proveer alta exactitud.
- Diseñar el prototipo de sistema de medición de acuerdo con los requerimientos técnicos para la medición de señales de osciladores atómicos utilizando GNSS.
- Implementar el prototipo diseñado que cumpla con los requerimientos técnicos y que permita obtener los resultados de la comparación de las señales de los osciladores atómicos.
- Evaluar los resultados de medición obtenidos en función de los parámetros establecidos para el prototipo de sistema de medición.

El Grupo Internacional de Investigación en Informática, Comunicaciones y Gestión del Conocimiento (GICOGE), reconocido por MinCiencias en categoría C tiene como objetivo contribuir al avance científico y tecnológico mediante la integración de sistemas de información y gestión del conocimiento. La línea de investigación es: Calidad e Innovación en Informática, Comunicaciones y Gestión del Conocimiento para el Desarrollo Organizacional y su área de conocimientos es: Ciencias Naturales, Computación y Ciencias de la Información y Ciencias de la Computación. El grupo busca establecer colaboraciones estratégicas con instituciones de renombre y contribuir significativamente al cuerpo de conocimientos en su disciplina. Enmarcado en esto, se estableció una colaboración con el Instituto Nacional de Metrología de Colombia INM. El INM cuenta con el Grupo de Investigación en Metrología Científica e Industrial GIMCI, el cual está enfocado en aplicar métodos físico-matemáticos y estadísticos para el desarrollo de la metrología científica e industrial, proporcionando soporte a la infraestructura de calidad. Sus objetivos principales incluyen realizar mejoras en los métodos de medición implementados, desarrollo de patrones y nuevos métodos para aumentar la calidad de las mediciones y contribuir

al desarrollo de los sectores productivos del país, haciéndolos más competitivos. La línea de investigación aplicable es: Desarrollo, caracterización y automatización de patrones y métodos de medida.

El desarrollo de este proyecto titulado *"Medición de la diferencia de fase de la señal de salida de osciladores atómicos mediante comparación satelital"* se basa en la articulación de las líneas de investigación de dos grupos con enfoques complementarios. GICOGE aporta desde su línea de Calidad e Innovación en Informática, Comunicaciones y Gestión del Conocimiento para el Desarrollo Organizacional, proporcionando el soporte en integración de sistemas de información, procesamiento de datos y gestión del conocimiento, elementos clave para el diseño de la arquitectura de adquisición, tratamiento y análisis de las mediciones GNSS. Por otro lado, GIMCI contribuye desde su línea de Desarrollo, caracterización y automatización de patrones y métodos de medida, mediante la aplicación de fundamentos metrológicos para garantizar la validez, trazabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. La convergencia de estas capacidades permite abordar el proyecto de manera integral, combinando el desarrollo tecnológico y computacional con el rigor metrológico requerido para la comparación de osciladores atómicos, facilitando así la implementación de métodos de medición basados en GNSS que contribuyan al fortalecimiento de la infraestructura de calidad y a la competitividad del sector de telecomunicaciones.

Actualmente, el modelo de reconocimiento y medición de grupos de investigación de MinCiencias otorga un puntaje diferencial a aquellos grupos que evidencian procesos de cooperación interinstitucional, mediante el fortalecimiento del índice de cooperación. En este contexto, el presente proyecto representa una oportunidad estratégica para consolidar dicha articulación, al integrar capacidades complementarias entre GICOGE y GIMCI. Esta colaboración no solo contribuye al fortalecimiento institucional de ambas entidades, mediante la generación conjunta de conocimiento y el desarrollo de capacidades técnicas, sino que también impulsa la consolidación de sus grupos de investigación al fomentar la producción científica, la transferencia de conocimiento y la formación de talento humano especializado. De igual manera, promueve el crecimiento de los investigadores involucrados, al facilitar el trabajo interdisciplinario y el intercambio de experiencias en áreas de informática, comunicaciones y metrología, aportando así al avance científico y tecnológico y al posicionamiento de las instituciones en el ámbito nacional e internacional.

La estructura del presente informe se organiza en cuatro capítulos que reflejan el desarrollo progresivo del proyecto en concordancia con las fases metodológicas definidas, desde la formulación de requerimientos hasta la evaluación de los resultados del sistema propuesto.

En el Capítulo 2 “*Definición de características técnicas y de funcionamiento para el diseño del prototipo*” se presenta la fase de análisis y definición de requerimientos y funcionalidades, en la cual se establecen las características técnicas y de funcionamiento necesarias para el diseño del sistema de medición. Este capítulo se fundamenta en la revisión del estado del arte y en el análisis de la infraestructura disponible en el laboratorio, abordando además los principios del método Common-View y los formatos estándar de datos, lo que permite definir los requerimientos que orientan el desarrollo del prototipo.

El Capítulo 3 “*Diseño del prototipo de medición*” corresponde a la fase de diseño del sistema, donde se define la arquitectura del prototipo de medición a partir de los requerimientos previamente establecidos. En esta etapa se desarrolla el modelo matemático que describe la relación entre las observaciones GNSS y la referencia temporal (oscilador de cesio), así como la estructura funcional del sistema, incluyendo las actividades asociadas a la adquisición y procesamiento de datos.

En el Capítulo 4 “*Implementación del prototipo de medición*” se desarrolla la fase de implementación del sistema de medición, en la cual se realiza el ensamblaje, configuración e integración del hardware y software. Asimismo, se presenta el desarrollo del software de adquisición de datos y del software de procesamiento, que permiten transformar la información capturada en resultados de medición coherentes y compatibles con estándares internacionales.

Finalmente, en el Capítulo 5 “*Ajuste de parámetros y evaluación de los resultados de medición*” se aborda la fase de evaluación de resultados, donde se presentan los procesos de validación del software, ajuste de parámetros y verificación del método de medición Common-View. En este capítulo se analizan los resultados obtenidos, evaluando el desempeño del sistema y cumplimiento de los requerimientos definidos, con el fin de determinar su viabilidad para aplicaciones en metrología de tiempo y frecuencia.

El informe se complementa con la identificación de trabajos futuros, los cuales plantean la continuidad del desarrollo mediante el perfeccionamiento de algoritmos, la ampliación a múltiples frecuencias y constelaciones GNSS, y la implementación de herramientas de monitoreo y procesamiento en tiempo real. Estas proyecciones, junto con las conclusiones alcanzadas, evidencian el potencial del sistema para evolucionar hacia aplicaciones más avanzadas y su posible integración con otros proyectos del laboratorio, así como su impacto en la generación de nuevos servicios de calibración y sincronización en el contexto de la metrología del tiempo y la frecuencia.

2. DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y DE FUNCIONAMIENTO PARA EL DISEÑO DEL PROTOTIPO

El desarrollo de sistemas de medición de alta exactitud para la transferencia de tiempo y frecuencia requiere definir las características técnicas y de funcionamiento que garanticen la trazabilidad y confiabilidad de los resultados. En este contexto, el presente capítulo establece los fundamentos necesarios para el diseño de un prototipo de sistema de medición de diferencia de fase basado en el uso de señales GNSS, orientado a la comparación de un oscilador atómico mediante el método de Vista Común (Common-View). Este proceso implica no solo la comprensión de los principios físicos y matemáticos asociados a la sincronización temporal satelital, sino también la identificación de los requerimientos instrumentales y operativos que aseguren el cumplimiento de estándares internacionales en metrología del tiempo y la frecuencia. Para ello, se realiza una revisión del estado del arte enfocada en las especificaciones técnicas que se deben cumplir para las aplicaciones de transferencia de tiempo de alta exactitud, considerando aspectos como estabilidad, resolución, manejo de señales multibanda y capacidad de registro de observaciones crudas. De manera complementaria, se analiza el equipamiento actualmente disponible en el laboratorio, con el fin de identificar brechas tecnológicas y definir criterios de selección adecuados para la implementación del sistema propuesto.

2.1. ESTADO DEL ARTE

Esta sección aborda la fundamentación teórica que sustenta el sistema propuesto, incluyendo el patrón de Tiempo y Frecuencia, el funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), los principios del método de Vista Común, y los formatos estándar de intercambio de datos como RINEX y CGGTTS, los cuales son esenciales para la interoperabilidad y el procesamiento de la información en aplicaciones de transferencia de tiempo.

2.1.1. Patrón de Tiempo y Frecuencia.

El Segundo, con símbolo s, es la unidad de tiempo en el Sistema Internacional de Unidades - SI. Se define tomando el valor numérico fijo de la frecuencia del cesio, Δv_{Cs} que es la frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133 es 9 192 631 770 cuando se expresa en la unidad Hz (BIPM, 2019).

De acuerdo con (Levine, 1999), un patrón de frecuencia atómica requiere un "paquete físico" que prepare los átomos en el estado apropiado y detecte el hecho de que han realizado la transición del reloj después de la interacción con el oscilador. También requiere un "paquete electrónico" que consta del oscilador, el circuito de retroalimentación para controlar su frecuencia y varios

sintetizadores o divisores de frecuencia para convertir la frecuencia del reloj a frecuencias de salida estándar como 5 MHz o 1 Hz. Entonces, un Patrón primario de Tiempo y Frecuencia es un oscilador atómico basado en la definición del Segundo en el SI.

Es necesario monitorear los patrones de cesio para evitar un mal funcionamiento. Los laboratorios nacionales responsables de mantener el patrón primario de tiempo y frecuencia de un país comparan continuamente su patrón primario (objeto de medición) con al menos uno y preferiblemente con otros dos patrones de cesio. También comparan su patrón primario con otros patrones primarios nacionales, mediante una comparación común con señales definidas del satélite GPS (Allan & Weiss, 1980).

2.1.2. Sistema de Posicionamiento Global GPS.

El sistema de posicionamiento global GPS funciona como una red de al menos 24 satélites que orbitan la Tierra a unos 20 200 km de altura, transmitiendo señales de tiempo y posición. en seis planos fijos inclinados 55° con respecto al ecuador. El período orbital es de 11 h 58 min, lo que significa que un satélite orbitará la Tierra dos veces al día. A bordo hay dos osciladores de cesio y dos osciladores de rubidio (Costa et al., 2004). Cada satélite cuenta con osciladores atómicos internos (de cesio o rubidio) que generan una frecuencia base de 10.23 MHz.

Por otra parte, el GPS es un servicio de posicionamiento y tiempo que está disponible para uso civil, comercial y científico con fines pacíficos (Department Of Defense USA, 2022). Este servicio incluye la señal de código C/A (Coarse/Acquisition), las señales de código CM/CL y las señales de código I5/código Q5. La señal de código C/A es transmitida por todos los satélites y comprende una portadora L1 modulada por una señal de alcance de código aproximado/adquisición (C/A) con un mensaje de datos de navegación heredado (LNAV).

Para el proceso de generación y transmisión de GPS para un satélite objetivo de la serie, el patrón de frecuencia atómica genera la base de tiempo estable para el satélite. La señal de oscilador sintetizada de 10.23 MHz y las señales de sincronización de código/portadora sincronizadas se distribuyen mediante el sintetizador de frecuencia a otros subsistemas de carga útil. La computadora de la misión recibe los datos de navegación (NAV) cargados desde el segmento de control (CS) a través del subsistema de telemetría, seguimiento y comando (TT&C). La banda base de navegación genera códigos de alcance de ruido pseudoaleatorio (PRN) y agrega los datos del mensaje NAV a los códigos de alcance de PRN. El subsistema de banda L modula las secuencias binarias resultantes en las portadoras L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.6 MHz) y L5 (1176.45 MHz) que luego son transmitidas por la antena helicoidal.

Cada satélite transmite un mínimo de dos códigos de alcance PRN: (1) el código de precisión (P), que es el código de alcance principal o el código Y que se utiliza en lugar del código P siempre que el modo de operación anti-spoofing está activado; y (2) el código aproximado/adquisición (C/A) que se utiliza para la adquisición del código P (o Y) (denotado como P(Y)) y como señal de alcance civil primaria.

Un receptor GPS proporciona la localización y la hora exacta en cualquier condición atmosférica, lugar del mundo y cuenta con acceso a usuarios de manera simultánea. Los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican los receptores del GPS; ellos, a su vez, proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora local precisa (Department Of Defense USA, 2020).

El pseudorange (o pseudodistancia) es el dato observable fundamental que permite el funcionamiento del método de Common-View. En términos sencillos, es la medición de la distancia entre un satélite y un receptor, obtenida a partir del tiempo entre la emisión de un código de ruido pseudoaleatorio (PRN) por el satélite y su recepción en el receptor multiplicado por la velocidad de la luz.

$$P = c(t_{r,rec} - t_{e,sat}) \qquad \textit{(Ec.1)}$$

Donde:

$t_{r,rec}$ es el tiempo de recepción medido por el reloj del receptor

$t_{e,sat}$ es el tiempo de emisión leído en el reloj del satélite.

Debido a que los osciladores del satélite y del receptor no están perfectamente sincronizados, la pseudodistancia no refleja la distancia real de inmediato. Se compone de la distancia geométrica real entre el satélite y el receptor, errores de sincronización de osciladores y otros errores adicionales como retrasos atmosféricos (ionosfera y troposfera), efectos de multipath, ruido del sistema y retrasos de hardware.

2.1.3. Método De Vista Común – Common View

La comparación de osciladores atómicos mediante sistemas de navegación por satélite (GNSS), como el GPS, es el método fundamental para medir patrones de tiempo a nivel global y generar la escala de tiempo universal (UTC).

Existen tres técnicas principales para comparar dos osciladores (Oscilador A y Oscilador B) situados en lugares distantes:

- Common-View (Vista Común): El principio consiste en conectar el oscilador local (o la realización de UTC) a un receptor GPS y determinar, a partir de las mediciones de

pseudodistancia, la diferencia de sincronización entre el oscilador local y la escala de tiempo GPS cuando ambos laboratorios observan simultáneamente el mismo satélite. Al restar las mediciones de ambos sitios, el error del oscilador del satélite se cancela, permitiendo obtener la diferencia directa entre el Oscilador A y el Oscilador B.

- All-in-View (Todo a la Vista): Es una evolución que no requiere observar el mismo satélite. Cada laboratorio compara su oscilador con el tiempo del sistema GNSS utilizando todos los satélites visibles. Los promedios resultantes se intercambian y comparan, permitiendo enlaces sobre distancias intercontinentales muy largas.
- Precise Point Positioning (PPP): Es el método más avanzado y preciso actualmente (incertidumbre de ~1 ns). Utiliza no solo los códigos de la señal, sino también la fase de la portadora y modelos de órbita muy precisos.

Específicamente, para este proyecto se usó el método Common-View (Vista Común), una técnica fundamental y bien establecida en metrología para comparar osciladores situados en sitios remotos, utilizando un transmisor independiente (como un satélite GPS) como vehículo de transferencia.

Se basa en la recepción por varios receptores de la misma señal emitida. La transferencia de tiempo GNSS se ve intrínsecamente afectada por los errores de posición del satélite y por la inestabilidad del oscilador del satélite. Estos efectos se eliminan o minimizan cuando las dos estaciones involucradas en la comparación de osciladores observan el mismo satélite simultáneamente. El método CV requiere la observación simultánea de satélites en las dos estaciones, con el inconveniente de que al aumentar la distancia el número de satélites observados simultáneamente disminuye y el número de satélites de gran elevación se vuelve pobre (Panfilo & Arias, 2019).

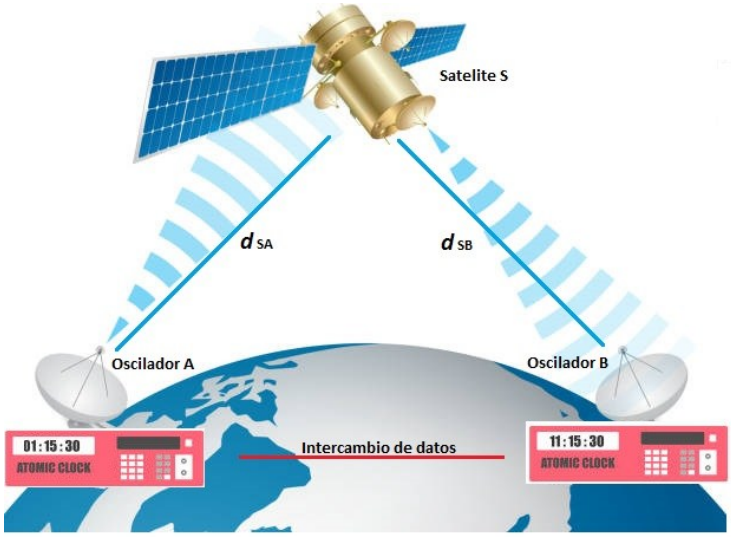
El proceso consiste en medir la diferencia de tiempo entre un oscilador atómico local y las señales emitidas por los osciladores a bordo de los satélites GNSS. Un receptor GNSS recibe la señal del satélite y utiliza un Contador de Intervalos de Tiempo (TIC) para medir la diferencia entre el pulso de "un segundo" (1 PPS) del oscilador atómico local y el pulso equivalente derivado del satélite. Internamente, el receptor, utilizando un software y siguiendo un procedimiento determinado recomendado por el CCTF, calcula la diferencia en tiempo entre UTC(k) y la hora GPS realizada por cada satélite recibido: cada diferencia es realizada procesando un conjunto o track de 780 observaciones sucesivas de corta duración, a intervalos de 1 segundo, tomadas por el propio receptor durante un seguimiento de 13 minutos de duración (780 s) (Costa et al., 2004).

El método involucra un satélite GPS (S) y dos sitios de recepción (A y B), cada uno con un receptor GPS y un oscilador local (Figura 1). El satélite GPS (S) transmite una señal que se recibe

en los sitios A y B, y ambos sitios comparan la señal GPS con su oscilador local. El sitio A recibe GPS sobre la ruta dSA y mide el oscilador A – S. El sitio B recibe GPS sobre la ruta dSB y mide el oscilador B – S.

Figura 1.

Método de vista común



La diferencia entre las dos mediciones es una estimación de Oscilador A – Oscilador B. Los retrasos que son comunes a ambas rutas dSA y dSB se cancelan incluso si son desconocidos, pero las diferencias de retraso no corregidas entre las dos rutas agregan incertidumbre al resultado de la medición. Por lo tanto, la ecuación básica para una medición de Common-View es:

$$(Oscilador\ A - S) - (Oscilador\ B - S) = (Oscilador\ A - Oscilador\ B) + (e_{SA} - e_{SB}) \qquad \textit{(Ec.2)}$$

Los componentes que conforman el término de error (eSA – eSB) incluyen diferencias de demora entre los dos sitios causadas por demoras ionosféricas y troposféricas, reflejos de señales de trayectos múltiples, condiciones ambientales y errores en las coordenadas de la antena GPS. Estos factores pueden medirse o estimarse y aplicarse como una corrección de la medición o contabilizarse en el análisis de incertidumbre.

Esta técnica alinea y diferencia los datos de las pistas individuales de los satélites y descarta los datos recopilados de los satélites que no están a la vista en ambos sitios. La diferencia de tiempo promedio, TD, entre los osciladores en los dos sitios se obtiene por:

$$TD = \frac{\sum_{i=1}^{N}(REFGPS_i(A) - REFGPS_i(B))}{N} \qquad \textit{(Ec. 3)}$$

Dónde N es el número de satélites rastreados en ambos sitios, $REFGPS_i(A)$ es la serie de rastreos de satélites individuales registrados en el sitio A, y $REFGPS_i(B)$ es la serie de rastreos registrados en el sitio B.

Su funcionamiento se basa en los siguientes pasos y principios técnicos:

a) Observación Simultánea: Dos laboratorios (A y B) observan simultáneamente la misma señal emitida por un satélite específico cuando este es visible para ambos con ángulos de elevación adecuados.
b) Mediciones Locales: Cada laboratorio mide la diferencia de tiempo entre su oscilador atómico local y la señal recibida del satélite. Esto produce dos mediciones independientes:
    - Laboratorio A: (Oscilador A - Oscilador del Satélite GNSS).
    - Laboratorio B: (Oscilador B - Oscilador del Satélite GNSS).
c) Intercambio de Datos: Los datos recolectados se almacenan, generalmente en un formato estándar internacional denominado CGGTTS (Common GNSS Generic Time Transfer Standard), y se intercambian entre los laboratorios o se cargan en un servidor central para su procesamiento (Defraigne & Petit, 2015).
d) Cálculo de la Diferencia: Al restar las dos mediciones, el tiempo del oscilador del satélite se cancela por ser común a ambos, dejando como resultado una estimación de la diferencia entre los dos osciladores locales (Oscilador A - Oscilador B).

2.1.4. Formatos Estándar para el Intercambio de Datos

Estos formatos estándar son utilizados por la comunidad de Tiempo y Frecuencia para el intercambio de datos. El formato RINEX de observaciones proporciona los datos de pseudorange para cada instante de tiempo, este dato es fundamental ya que a partir de este se establece la distancia entre el satélite y el receptor y a este dato se le aplicarán ciertas correcciones, dentro de las que se incluyen los datos generados por el formato RINEX de navegación. Por su parte el formato CGGTTS permite la comparación de osciladores atómicos locales, se genera a partir de los datos de ambos formatos RINEX, este contiene la diferencia entre el reloj local y el tiempo del sistema GNSS en el campo REFSYS con el cual se realiza el método de Common-View.

2.1.4.1. Formato RINEX.

El formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) fue creado originalmente por la Universidad de Berna para permitir el intercambio de datos GPS entre receptores de diferentes fabricantes. Actualmente, facilita el intercambio de datos de los principales sistemas globales de navegación por satélite: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou (BDS), QZSS, IRNSS y SBAS.

Este formato era utilizado principalmente para programas de procesamiento geodético que requieren un conjunto bien definido de observables: la fase de la portadora, el pseudorange (código) y el tiempo de observación.

El sistema opera mediante archivos de texto plano en formato ASCII, lo que garantiza su legibilidad y compatibilidad entre diferentes sistemas informáticos. En su versión 3.04 (International GNSS Service, 2018), el formato se divide principalmente en tres tipos de archivos:

- Archivo de datos de observación: Contiene las mediciones de pseudorange, fase, Doppler y SNR.
- Archivo de mensajes de navegación: Incluye los datos transmitidos por los satélites sobre su órbita y estado del reloj.
- Archivo de datos meteorológicos: Almacena parámetros ambientales como presión, temperatura y humedad.

Cada archivo RINEX consta de dos partes fundamentales: un encabezado (header), que contiene información global como el nombre de la estación, el tipo de antena y los modelos de corrección aplicados; y una sección de datos, donde se registran las observaciones por épocas.

Para organizar la información, RINEX utiliza identificadores específicos:

- Identificación de satélites: Se emplea una letra para el sistema (G para GPS, R para GLONASS, E para Galileo, C para BeiDou, J para QZSS, I para IRNSS y S para SBAS) seguida de un número de dos dígitos. Para este caso, se requirieron los satélites de la constelación GPS, así que los archivos RINEX presentan únicamente el tipo de identificación G junto con el número del satélite.
- Códigos de observación: Las medidas se clasifican con códigos de tres caracteres que indican el tipo de observación (C para pseudorange, L para fase, D para Doppler, S para fuerza de señal), la banda de frecuencia y el atributo de seguimiento (como el canal o modo de código utilizado). Para este caso, el método se basa a partir de mediciones de pseudorange, entonces el procesamiento o tratamiento de dichos archivos incluyen correcciones a estas observaciones.
- Definiciones de tiempo: El tiempo reportado es el del reloj del receptor en el momento de la medición, el cual debe ser consistente para todos los satélites observados en una misma época. Esta estampa de tiempo es muy importante porque a partir de ella se estiman los tracks y se definen algunas correcciones que se deben llevar a cabo en ese instante de tiempo.

2.1.4.2. Formato CGGTTS.

El formato CGGTTS (*Common GNSS Generic Time Transfer Standard*) es el estándar internacional utilizado por los laboratorios de metrología para el intercambio de datos de transferencia de tiempo mediante sistemas satelitales GNSS. Su propósito principal es permitir la comparación de osciladores atómicos locales, realizaciones del UTC(k), con las escalas de tiempo de los satélites para contribuir al cálculo del Tiempo Atómico Internacional TAI y del UTC por parte del BIPM (Defraigne & Petit, 2015).

Los archivos CGGTTS son archivos de texto ASCII compuestos por dos secciones fundamentales, el encabezado y la sección de datos:

El Encabezado (Header):

Contiene información global sobre el equipo y el laboratorio. Las líneas clave incluyen:

- RCVR: Marca, modelo y número de serie del receptor.
- LAB: Acrónimo del laboratorio.
- X, Y, Z: Coordenadas cartesianas precisas de la antena en el marco ITRF.
- INT DLY / CAB DLY / REF DLY: Retrasos de hardware calibrados (interno, del cable de antena y del cable de referencia local).
- CKSUM: Suma de comprobación hexadecimal para verificar la integridad del encabezado.

Sección de Datos:

Cada línea de datos representa una "pista" (track) de seguimiento de un satélite individual. Los campos principales de cada línea son:

- SAT: Identificador del satélite (ej. G para GPS, R para GLONASS, E para Galileo).
- MJD: Fecha Juliana Modificada.
- STTIME: Hora de inicio de la pista en formato UTC (hhmmss).
- TRKL: Duración de la pista (usualmente 780 segundos).
- REFSV: Diferencia de tiempo entre el oscilador local y el del satélite.
- REFSYS: Diferencia entre el reloj local y el tiempo del sistema GNSS.
- MDTR / MDIO: Retrasos troposféricos e ionosféricos aplicados.

El formato contempla la segmentación del día, entonces, divide el día UTC (1440 minutos) en 90 segmentos de 16 minutos cada uno. De cada segmento, se graban datos efectivos durante 13 minutos (780 segundos). Los primeros dos minutos se usan para el enganche de la señal y el último minuto para el procesamiento de datos. Las pistas de GPS avanzan 4 minutos cada día para alinearse con el día sidéreo, permitiendo que los mismos satélites se observen en la misma posición geométrica en días sucesivos.

En la figura 2 se puede observar el formato CGGTTS, donde se aprecian todos los componentes que se requieren, la sección enmarcada de color gris representa el header, la sección rosada corresponde a los campos y unidades y la sección azul son los datos para cada campo:

Figura 2.

Ejemplo formato CGGTTS

```
CGGTTS GENERIC DATA FORMAT VERSION = 2E
REV DATE = 2022-06-22
RCVR = GTR51 1309042 1.9.0
CH = 20
IMS = GTR51 1309042 1.9.0
LAB = PTB Germany
X = -1432891.86 m
Y = +6050260.21 m
Z = -5739698.67 m
FRAME = ITRF
COMMENTS = AUSPOS ITRF2014 2020-11-23
INT DLY = 33.2 ns (GPS C1), 31.4 ns (GPS P1), 24.8 ns (GPS P2), CAL_ID = 1001-2020
CAB DLY = 250.0 ns
REF DLY = 36.6 ns
REF = UTC(PTB)
CKSUM = DA
```

SAT	CL	MJD	STTIME	TRKL	ELV	AZTH	REFSV	SRSV	REFSYS	SRSYS	DSG	IOE	MDTR	SMDT	MDIO	SMDI	MSIO	SMSI	ISG	FR	HC	FRC	CK
			hhmmss	s	.1dg	.1dg	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns		.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns				
G02	FF	60312	000200	780	811	2954	+5065571	-65	-17	-9	3	061	82	-2	50	-1	26	+10	5	0	0	L1C	AA
G03	FF	60312	000200	780	374	2333	-994025	-281	-64	-16	4	095	133	-22	77	-10	67	-1	9	0	0	L1C	F3
G08	FF	60312	000200	780	410	1811	+1601523	+5	-36	-14	5	014	123	+19	72	+10	61	+9	19	0	0	L1C	CC
G10	FF	60312	000200	780	191	589	+677818	+7	-188	-8	8	036	246	+82	111	+16	52	-33	19	0	0	L1C	02
G14	FF	60312	000200	780	211	2864	-2881624	-79	-76	+25	9	160	223	+23	106	+5	42	+28	30	0	0	L1C	0E
G17	FF	60312	000200	780	192	3153	-7207717	+9	-103	+1	8	046	243	-75	111	-15	28	-8	28	0	0	L1C	00
G21	FF	60312	000200	780	831	1062	-1396356	+7	-14	-5	4	047	81	+1	50	+0	14	+26	7	0	0	L1C	8F
G22	FF	60312	000200	780	206	3084	-549647	+78	-81	+12	9	040	228	-4	108	-1	6	+39	43	0	0	L1C	DE
G32	FF	60312	000200	780	421	728	+6019645	+28	-81	-3	5	055	120	+4	71	+2	44	-24	8	0	0	L1C	AB

** Tomado de: https://cbkt-time.bipm.org/cggtts-data-format/*

Los campos REFSV, SRSV, REFSYS y SRSYS son fundamentales porque constituyen el resultado final procesado de una "pista" (*track*) de observación de satélites, permitiendo la transferencia de tiempo de alta exactitud.

REFSV: Es el valor estimado, en el punto medio de la pista de 13 minutos, de la diferencia entre el oscilador local y el oscilador individual del satélite observado $t_{clock} - t_{sat}$. Este campo registra el desfase directo después de aplicar todas las correcciones físicas (distancia geométrica, efectos relativistas, retrasos atmosféricos y de hardware). Es el dato base que permite realizar comparaciones directas entre estaciones que ven el mismo satélite.

SRSV: Representa la pendiente de la diferencia de tiempo entre el oscilador local y el del satélite durante el intervalo de la pista. Ayuda a caracterizar el comportamiento dinámico de la medición

durante esos 13 minutos. Es útil para el filtrado de datos y para detectar anomalías o saltos de fase en el seguimiento del satélite.

REFSYS: Es el valor central de la diferencia entre el oscilador local y la escala de tiempo de referencia del sistema (como el Tiempo GPS o el Tiempo Galileo). Se calcula sumando al valor de REFSV el desfase del oscilador del satélite transmitido en el mensaje de navegación. Con este campo se realiza el método de Common-View por lo cual se considera el más importante.

SRSYS: Es la pendiente del ajuste lineal realizado sobre las diferencias entre el oscilador local y el tiempo del sistema. Proporciona información directa sobre la diferencia de frecuencia entre el oscilador de laboratorio del usuario y la escala de tiempo del sistema GNSS. Al expresar qué tan rápido está ganando o perdiendo tiempo el oscilador local respecto al sistema GNSS, permite evaluar la estabilidad del patrón de frecuencia local.

2.2. FUNCIONALIDADES Y REQUERIMIENTOS PARA EL PROTOTIPO

A partir de la revisión del estado del arte, fue posible establecer las funcionalidades y requerimientos que debe cumplir el sistema de medición para que el método Common-View funcione con alta precisión:

- La recepción de señales GNSS es de línea de visión, lo que significa que la antena receptora debe tener una vista clara del cielo y se debe asegurar la alimentación de la antena (Lombardi, 2002).
- Cada satélite transmite una forma de onda de espectro disperso, llamada código de ruido pseudoaleatorio o pseudorange (PRN) en L1 y L2, y cada satélite se identifica por el código PRN que transmite (Lombardi, 2002).
- Observaciones de vista común de los códigos Coarse/Adquisition (C/A) transmitidos por satélites GPS en la frecuencia portadora L1 de 1575,42 MHz. Dependiendo el receptor GPS, es posible que se utilice otro código (Lombardi et al., 2010).
- Medir con un contador de intervalos de tiempo, las diferencias de tiempo entre las señales de 1 PPS generadas por el receptor GPS y la escala de tiempo UTC (INM) (Lombardi Michael A. et al., 2014).
- Se promedian las mediciones individuales en cada sitio para producir estimaciones de (Oscilador A - oscilador del satélite GPS) y (Oscilador B - oscilador del satélite GPS). Si se restan estos resultados, se elimina el oscilador del satélite y queda una estimación de Oscilador A - Oscilador B (Kamas et al., 1990).
- La exactitud objetivo de estas diferencias deberá ser en el orden de los nanosegundos.

- Retrasos ionosféricos y troposféricos, reflexiones de señales por trayectos múltiples, condiciones ambientales o errores en las coordenadas de la antena GPS. Estos factores se miden o se estiman y se aplican como una corrección a la medición (Lombardi et al., 2016).
- Retrasos de Hardware: Se deben medir y restar los tiempos que tarda la señal en viajar por la antena, los cables y los circuitos internos del receptor (parámetros como INTDLY, CABDLY y REFDLY).
- Software: Medir las diferencias de tiempo entre los satélites GPS individuales y la escala de tiempo UTC local del usuario una vez por segundo, y almacenar los resultados de la medición y otra información recopilada de las efemérides GPS en un archivo de datos (Lombardi Michael A. et al., 2014).
- Crear un archivo CGGTTS por día con los datos medidos.

De acuerdo con (Lombardi et al., 2016), para el desarrollo del sistema se requiere el siguiente equipamiento:

- Tarjeta de interfaz de red.
- Receptor GPS de banda L1 de 12 canales.
- Antena GPS (ganancia necesaria (> 30 dB) para manejar cables largos)
- Cable de baja pérdida (la pérdida de señal es de aproximadamente 5 dB por 30 m en la frecuencia L1 de 1575 MHz)
- Contador de intervalos de tiempo con resolución inferior a nanosegundos.
- Oscilador atómico de cesio.
- Amplificador distribuidor para las señales del oscilador atómico de cesio para señales de 10 MHz y de 1 PPS.
- Conectores BNC, TNC, SMA, SMB dependiendo del receptor que se adquiera.

2.3. INFRAESTRUCTURA Y EVALUACIÓN DEL EQUIPAMIENTO DEL LABORATORIO

A continuación, se realiza una presentación de los componentes principales de la infraestructura del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del INM. También, se realiza la evaluación del equipamiento que, de acuerdo con los requerimientos mencionados en la sección 2.2, son de utilidad para el diseño del prototipo. Esto permitirá definir si el equipamiento es adecuado y suficiente para crear el prototipo.

2.3.1. Infraestructura del Laboratorio

El laboratorio cuenta con una infraestructura compuesta por distintos instrumentos de medición y equipos que permiten participar en la comparación UTC, el desarrollo de proyectos, la prestación de servicios de calibración y medición y el servicio de Hora Legal para Colombia. Esta infraestructura se observa en la Figura 3.

Figura 3.

Infraestructura del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia.



De izquierda a derecha se aprecia, respectivamente, rack con condiciones ambientales controladas donde se ubican los instrumentos y equipos utilizados para la generación de UTC(INM), en el siguiente rack se ubica una parte del equipamiento para diseminación de la Hora Legal, luego se encuentra el rack donde se dispone de los equipos para las comparaciones y otros equipos para la diseminación de la Hora Legal, en los dos últimos racks se encuentran los instrumentos y equipos auxiliares usados para la prestación de servicios de calibración y medición.

En la Figura 4 se observa específicamente el rack donde se ubican los instrumentos y equipos utilizados para la generación de UTC(INM), los osciladores de cesio (lila), distribuidor de 1 PPS (naranja), distribuidor de frecuencia (amarillo) y contador de frecuencia (verde).

Figura 4.

Rack de los patrones de Tiempo y Frecuencia.



En el rack de comparaciones, se encuentra el sistema NIST TAI-1, este es el sistema que el laboratorio ha venido utilizando para participar en la comparación internacional UTC, fue desarrollado por el NIST para que los institutos de metrología del SIM tuvieran la capacidad de establecer su trazabilidad directamente a UTC. En la Figura 5 se muestra la parte frontal del instrumento, allí se aprecia la interfaz gráfica del software de medición que permite de manera rápida ver los principales datos asociados a la recepción de las señal de GPS y el valor REFGPS, resaltado en amarillo, que indica la diferencia entre el reloj local (oscilador de cesio) y el tiempo del sistema GPS.

Figura 5.

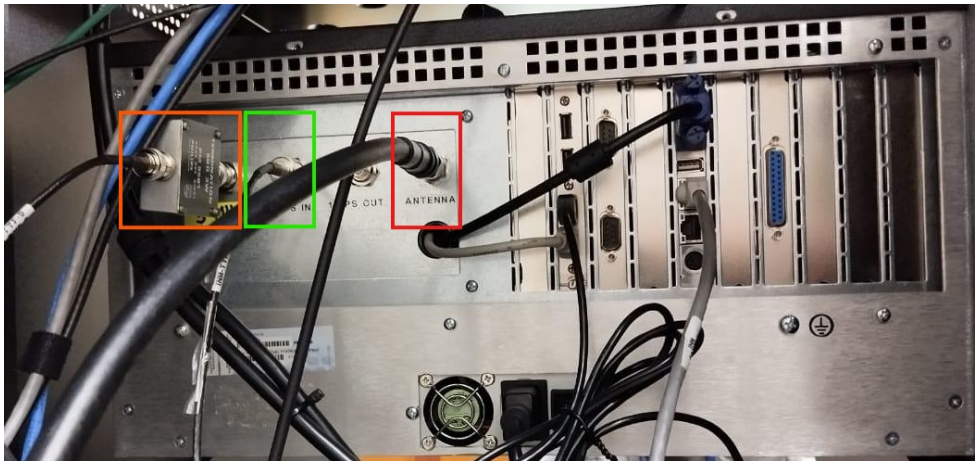
Sistema de Comparación NIST TAI-1, vista frontal



En la parte posterior, Figura 6, se muestra las entradas de frecuencia de 5 MHz (naranja) y 1 PPS (verde) que provienen del oscilador atómico de cesio, también se encuentra la entrada de la antena GPS (rojo). Este instrumento cuenta con un contador de intervalos de tiempo TIC en su interior, el cual es disciplinado por la señal de 5 MHz del oscilador atómico. Este sistema genera directamente los archivos CGGTTS para cada día.

Figura 6.

Sistema de Comparación NIST TAI-1, vista posterior



Se dispone de 4 antenas para la recepción de señales GNSS para la banda L1, ver Figura 7. Estas se encuentran ubicadas en el último piso del edificio donde cuentan con amplia línea de vista y lejos de infraestructura que afecte la recepción de señales. Cada una se conecta por medio de cable coaxial al equipamiento que se encuentra dentro del laboratorio.

Figura 7.

Antenas GNSS de banda L1.



El laboratorio cuenta con 2 contadores de frecuencia Keysight 53230A, como el presentado en la Figura 8, estos instrumentos permiten medir frecuencia e intervalo de tiempo con resolución de 20 ps.

Figura 8.

Contador de Frecuencia



Debido a que el oscilador atómico de cesio genera señales de 1 PPS y 5 MHz de baja amplitud y además sus salidas son limitadas, se requieren distribuidores de pulso y frecuencia que amplifican la señal del oscilador y generan varias salidas de la misma señal, esto permite usar estas señales para disciplinar todos los instrumentos del laboratorio. En la Figura 9 se muestra el distribuidor de frecuencia de color negro y el distribuidor de pulso de color blanco.

Figura 9.

Distribuidores de frecuencia y de pulso



Adicionalmente, ubicada en el interior de un computador se encuentra una tarjeta bc637PCIe GPS, ver figura 10, la cual permite la sincronización de equipos con la señal GPS. Esta cuenta con una entrada SMB a la cual se conecta la antena GPS.

Figura 10.

Tarjeta bc637PCIe GPS



2.3.2. Evaluación del equipamiento del laboratorio.

Teniendo en cuenta lo requerido, se revisaron las especificaciones y funcionalidades del equipamiento del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia, con el fin de establecer si es el apropiado para la implementación del sistema prototipo. En la tabla 2 se presenta un resumen de la evaluación del equipamiento:

Tabla 2.

Evaluación del equipamiento del laboratorio.

Equipo	Especificación del equipo de laboratorio	Requerimiento a partir de la bibliografía	Calificación
Oscilador atómico de Cesio	Oscilador atómico de Cesio Microchip 5071A high performance	Oscilador atómico de Cesio	Instrumento adecuado
Contador de frecuencia Keysight 53230A	Contador de frecuencia en modo Time Interval con resolución de 20 ps	Modo de medición: intervalo de tiempo. Resolución inferior a nanosegundos	Instrumento adecuado
Receptor GNSS	Tarjeta bc637PCIe GPS sincronizado con exactitud de 170 ns RMS a UTC. Resolución de oscilador de 100 ns. 1PPS and 10 MHz inputs. Receptor GPS de 12 canales con trazabilidad a UTC (USNO).	Receptor GPS Banda L1 de 12 canales.	No es adecuado para esta aplicación.
Antena GPS	GPS L1 Inline Antenna Amplifier 150-200	Antena GPS para lectura de banda L1	Equipo adecuado
Cable de baja pérdida	Se cuenta con cableado de la antena GPS referida.	Pérdida de señal de unos 5 dB por 30 m en la frecuencia L1 de 1 575 MHz	Equipo adecuado
Amplificador distribuidor de pulso y frecuencia.	Se cuenta con equipos independientes para señales de 1 PPS y de 10 MHz, de bajo ruido. Frecuencia: Microchip 9611B Pulso: Spectradynamics PD-5 y PD-15RMi-C	Amplificador distribuidor para las señales para señales de 10 MHz y de 1 PPS.	Equipos adecuados

Con respecto a la tarjeta bc637PCIe, se revisó su manual y se encontró que, aunque es adecuada para aplicaciones de sincronización temporal de sistemas informáticos y distribución de señales de tiempo/frecuencia, presenta limitaciones que restringen su uso para esta aplicación. Funciona como una tarjeta de sincronización GPS disciplinada para servidores o estaciones de trabajo, priorizando la entrega de referencias temporales (1 PPS, frecuencias programables, IRIG) pero no el acceso a observables GNSS crudos requeridos para la técnica de Common-View. En particular, no proporciona acceso documentado a pseudorangos por satélite, fases de portadora, mensajes de navegación sin procesar ni formatos estándar de intercambio como RINEX,

elementos indispensables para la generación de archivos CGGTTS y para la aplicación de correcciones asociadas a la técnica Common-View (ionosféricas, geométricas, de oscilador y calibración). Aunque la tarjeta ofrece un desempeño adecuado como fuente de sincronización GPS disciplinada, su diseño cerrado y la ausencia de capacidades de observación GNSS constituyen obstáculos técnicos que impiden su utilización como receptor primario en sistemas de comparación temporal basados en Common-View.

Para el caso de la tarjeta de interfaz de red, esta se utiliza para la transmisión de datos por internet. Este equipo no se requiere ya que para este prototipo inicial no se contempla el envío de datos por internet, solo su almacenamiento interno.

De acuerdo con las funcionalidades, requerimientos, la infraestructura disponible y la evaluación del equipamiento presentada en la tabla 2, se determinó que el prototipo puede diseñarse con los siguientes equipos propios del laboratorio:

- Oscilador atómico de cesio.
- Contador de frecuencia.
- Antena GPS.
- Amplificadores de pulso y de frecuencia.
- Cables de baja pérdida

Estos equipos en conjunto permitirían alcanzar la exactitud necesaria en el orden de los nanosegundos. Sin embargo, es necesario determinar el receptor GNSS que se utilizará ya que es el núcleo del sistema de medición, es de tipo comercial y debe ser adquirido.

3. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN

En este capítulo se presenta el diseño del prototipo de sistema de medición para la determinación de diferencias temporales mediante la técnica Common-View, tomando como base los requerimientos técnicos, las funcionalidades y el análisis del equipamiento disponible establecidos en el Capítulo 2, a partir de estos elementos, se define la arquitectura del sistema.

El diseño se fundamenta en tres componentes principales: el modelo matemático que describe el funcionamiento del sistema de medición, estableciendo la relación entre las observaciones GNSS, la referencia temporal externa y las correcciones aplicadas durante el procesamiento de los datos; la arquitectura del sistema, que integra los elementos de hardware y software requeridos para la adquisición y tratamiento de la información. Finalmente, se plantea el desarrollo del software de adquisición y procesamiento de datos, para lo cual se elaboran diagramas de flujo que describen de manera estructurada las actividades, secuencias operativas y procesos necesarios para la captura, transformación e interpretación de los datos GNSS. Estos componentes constituyen la base del diseño del sistema y orientan su implementación en las fases posteriores del proyecto.

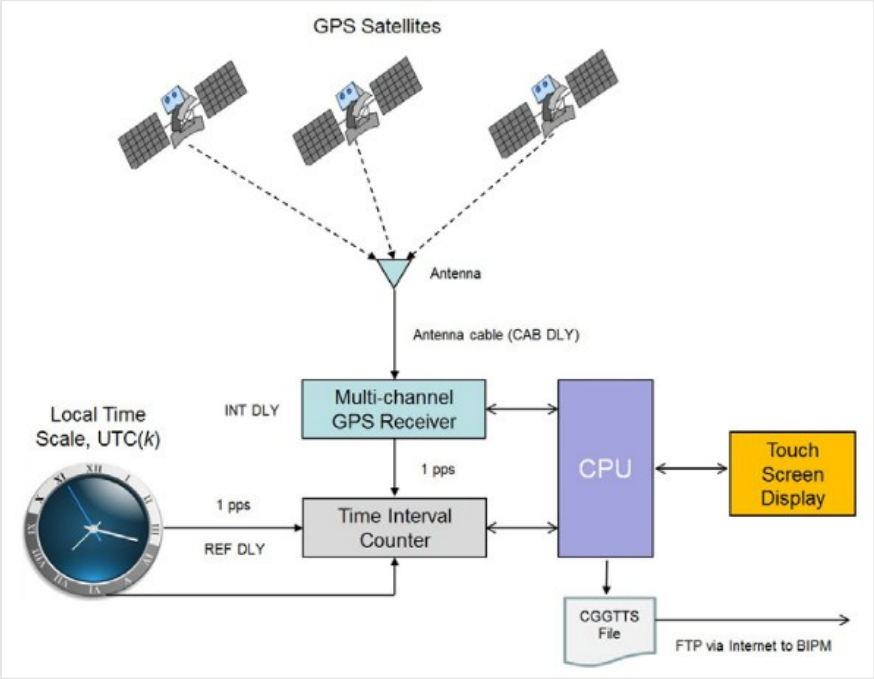
3.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para proponer la arquitectura del sistema de medición se analizó la configuración del sistema de medición NIST TAI-1 mostrado en la figura 11, el cual fue propuesto en el NIST por (Lombardi Michael A. et al., 2014) y se evaluó la necesidad específica de cada elemento dentro del sistema. Este sistema constituye una referencia ampliamente reconocida en aplicaciones de transferencia de tiempo de bajo costo, al integrar elementos esenciales para la medición de diferencias temporales mediante señales GNSS.

El análisis se orientó a comprender la función de cada uno de los componentes que conforman dicho sistema, así como su interacción dentro de la cadena de medición. En particular, se evaluaron aspectos relacionados con la generación de la señal de referencia temporal, la recepción y procesamiento de señales GNSS, y los mecanismos de medición de intervalos de tiempo. A partir de este estudio, se identificaron los elementos críticos necesarios para garantizar la trazabilidad y la confiabilidad de las mediciones, así como aquellos que podían ser optimizados o sustituidos en función de las capacidades tecnológicas disponibles.

Figura 11.

Sistema de medición de bajo costo NIST TAI-1



- **Oscilador Atómico de Cesio**

El oscilador atómico de cesio es parte fundamental del sistema ya que es la fuente que genera una señal de 1 PPS estable y exacta. En este caso, el oscilador es un patrón primario de alto rendimiento de tipo comercial que genera la señal de referencia local UTC(INM) objeto de medición.

- **Distribuidor de señales de 1 PPS**

Este equipo recibe la señal de 1 PPS del oscilador y la reproduce en varias salidas idénticas y amplificadas para evitar pérdidas de calidad de la señal. Dentro del laboratorio de Tiempo y Frecuencia es un elemento esencial ya que varios equipos requieren de esta señal y el oscilador de cesio tiene limitaciones en la cantidad de salidas, por lo cual, es un elemento que debe ser incluido dentro del sistema.

- **Receptor de señales GNSS**

El sistema NIST TAI-1 cuenta con un receptor GPS de 12 canales que admite las señales de GPS para la banda L1.

De acuerdo con lo mencionado en la sección 2.3.2 y con el propósito de seleccionar la tecnología de recepción de señales GNSS más adecuada para el diseño del prototipo de sistema de medición de diferencia de fase para el método de Common-View, se realizó una comparación técnica entre dos receptores de referencia en aplicaciones de sincronización temporal que han

sido probados por otros institutos como el National Institute of Standards and Technology - NIST de Estados Unidos, el National Metrology Laboratory - NSAI de Irlanda y el National Physical Laboratory – NPL de India.

Los receptores para evaluar son: el receptor mosaic-T GNSS timing module de Septentrio y el módulo GNSS Timing Breakout – ZED-F9T (Qwiic) basado en el chipset u-blox e integrado por SparkFun. Ambos dispositivos están orientados a aplicaciones de tiempo basados en GNSS, pero presentan diferencias significativas de desempeño, robustez y nivel de integración.

La Tabla 3 presenta la comparación de las principales especificaciones técnicas relevantes para aplicaciones de transferencia de tiempo de alta exactitud.

Tabla 3.

Comparación de especificaciones técnicas de receptores GNSS.

Parámetro	**Mosaic-T GNSS timing module**	**GNSS Timing Breakout – ZED-F9T**
Fabricante	Septentrio	SparkFun / u-blox
Aplicación objetivo	Sincronización profesional / infraestructura crítica	Desarrollo / laboratorio / prototipado
Exactitud temporal nominal del pulso de sincronización (1PPS / Time Pulse)	Nivel subnanosegundo a nanosegundo*	< 5 ns típica
Resolución de timestamp / marcas temporales	Subnanosegundo	Nanosegundo
Observables GNSS crudos disponibles	Sí	Sí
Soporte de marcas temporales externas (event timestamping)	Sí	Sí (TIM-TM2)
Constelaciones soportadas	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC, SBAS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS
Bandas GNSS	Multibanda multifrecuencia avanzada	Dual-band L1/L2
Número de canales	448	184
Mitigación anti-jamming / anti-spoofing	Sí (AIM+)	No dedicada
Entradas de referencia de frecuencia externa	Sí	No
Costo	Alto ($1500 USD)	Medio/Bajo ($310 USD)

La comparación evidencia que el receptor mosaic-T presenta capacidades técnicas superiores en prácticamente todos los parámetros críticos para aplicaciones de transferencia de tiempo de alta exactitud. Su arquitectura ha sido desarrollada específicamente para infraestructura de temporización profesional, incorporando entradas dedicadas para sincronización de oscilador y frecuencia, capacidad de ser disciplinado a partir de señales de osciladores externos y también cuenta con tecnologías avanzadas de mitigación de interferencia GNSS (Septentrio, 2025). Estas características permiten su integración directa en sistemas de sincronización de infraestructura crítica, telecomunicaciones y laboratorios nacionales de metrología.

Por otro lado, el módulo ZED-F9T ofrece prestaciones destacables considerando su costo significativamente inferior. Su exactitud de hasta 5 ns, la disponibilidad de observables GNSS crudos y el acceso a marcas temporales externas mediante el mensaje TIM-TM2 lo convierten en una solución técnicamente viable para aplicaciones de transferencia de tiempo experimental y desarrollo de prototipos (Sparkfun Electronics, n.d.) (U-blox, 2024).

No obstante, el uso del ZED-F9T en aplicaciones metrológicas avanzadas requiere procesamiento adicional de señales y correcciones externas para compensar retrasos internos del receptor y efectos de la arquitectura de timestamping, particularmente cuando se emplea para generación de archivos tipo RINEX y CGGTTS para la implementación de métodos como el Common-View.

El receptor ZED-F9T admite las bandas L1, L2 y E5b en todas las constelaciones principales (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou), pero no dispone de entrada externa para referencias de frecuencia tales como 10 MHz o 1 PPS que permita que su oscilador interno sea disciplinado. Sin embargo, su arquitectura permite la temporización de eventos externos a través de la entrada EXTINT y el mensaje UBX-TIM-TM2, posibilitando la medición de la relación temporal entre una referencia externa y la escala de tiempo GNSS interna del receptor. En consecuencia, el dispositivo opera como un comparador temporal respecto a la referencia externa, mas no como un sistema disciplinado por dicha referencia.

Aunque el receptor ZED-F9T no permite disciplinar externamente su oscilador interno, puede emplearse en la técnica Common View debido a que esta no requiere que el receptor opere sincronizado físicamente con el patrón local. Basta con que el receptor determine con precisión la diferencia temporal entre su escala de tiempo GNSS interna y la referencia externa aplicada al pin EXTINT, información obtenida mediante el mensaje UBX-TIM-TM2. Dicha diferencia permite trasladar las observaciones GNSS al marco temporal del patrón local durante el procesamiento posterior, habilitando así la comparación temporal entre estaciones.

Desde una perspectiva de relación costo-beneficio, el ZED-F9T representa una alternativa técnicamente adecuada para el desarrollo del sistema propuesto en este proyecto, dado que proporciona el nivel de exactitud requerido para la etapa de prototipado experimental con una inversión menor respecto al mosaic-T. Aunque este último ofrece un desempeño superior, sus capacidades exceden los requerimientos funcionales inicialmente establecidos para el presente desarrollo y su costo de adquisición resulta considerablemente más elevado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que el receptor ZED-F9T puede ser la opción más adecuada para el desarrollo del prototipo de sistema de medición propuesto, ya que proporciona un equilibrio favorable entre exactitud temporal, acceso a observables GNSS crudos y viabilidad económica. Esta selección permite satisfacer los requerimientos técnicos definidos para la validación experimental del sistema, manteniendo la posibilidad de escalar posteriormente hacia plataformas de mayor desempeño.

- **Contador de intervalos de tiempo**

Se evaluó si era necesario incorporar el contador de intervalos de tiempo (TIC) externo para realizar la medición de la diferencia temporal entre la señal de referencia local y la base temporal GNSS del receptor. Revisando los manuales del receptor ZED-F9T se encontró que este incorpora una funcionalidad interna de marcado temporal de eventos externos mediante el mecanismo de timestamping asociado al mensaje UBX-TIM-TM2, el cual permite registrar con resolución de 8 ns el instante de ocurrencia de flancos aplicados a la entrada externa de interrupción (EXTINT) respecto a la base temporal GNSS interna del receptor (U-blox, 2024). Esta funcionalidad permite medir directamente la relación temporal entre una señal de referencia externa, típicamente un pulso por segundo (1 PPS), y el tiempo GNSS mantenido por el receptor. Desde el punto de vista funcional, esta capacidad actúa de manera equivalente a un contador de intervalos de tiempo embebido, dado que realiza la medición interna del intervalo temporal entre el evento externo y la referencia temporal del receptor, eliminando la necesidad de instrumentación adicional para dicha tarea. En este sentido, (Montare et al., 2024) han señalado que la capacidad de timestamping interno del ZED-F9T tiene el potencial de reducir los costos del sistema al evitar el uso de un TIC externo en aplicaciones de transferencia de tiempo basadas en Common-View.

Si bien el bloque de timestamping interno del ZED-F9T no presenta las prestaciones técnicas de un contador de intervalos de tiempo dedicado de laboratorio, particularmente en términos de su resolución, su desempeño resulta suficiente para los requerimientos funcionales del sistema propuesto, cuyo objetivo principal corresponde al desarrollo de un prototipo experimental de medición. Por tanto, se decidió aprovechar las capacidades internas de timestamping del receptor

ZED-F9T como mecanismo principal para la medición de diferencias temporales entre la referencia externa y la escala GNSS del sistema.

- **Antena**

El sistema NIST TAI-1 cuenta con una antena GPS de banda L1 solamente. La antena es activa e incluye un amplificador que proporciona aproximadamente 30 dB de ganancia.

De acuerdo con los manuales del receptor ZED-F9T, la antena a utilizar preferiblemente debería ser de doble banda (L1/L2) para aprovechar toda la precisión del módulo. Sin embargo, el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia cuenta con una antena multiconstelación de banda L1 únicamente, tiene una ganancia activa total aproximada de 44 dB y fuerte rechazo fuera de banda superior a 50 dB. Estas prestaciones favorecen una recepción robusta de señales GNSS con adecuada inmunidad a interferencias y reducción de errores por multipath.

- **Cables y conectores**

El NIST refiere que los cables utilizados son cables coaxiales de baja pérdida que permite que la degradación de la señal en la frecuencia L1 sea de poco más de 5 dB por cada 30 metros y principalmente usan conectores tipo BNC.

Para este sistema se utilizaron cables coaxiales con conectores BNC de 50 Ω para las conexiones asociadas a 1 PPS.

- **Computador**

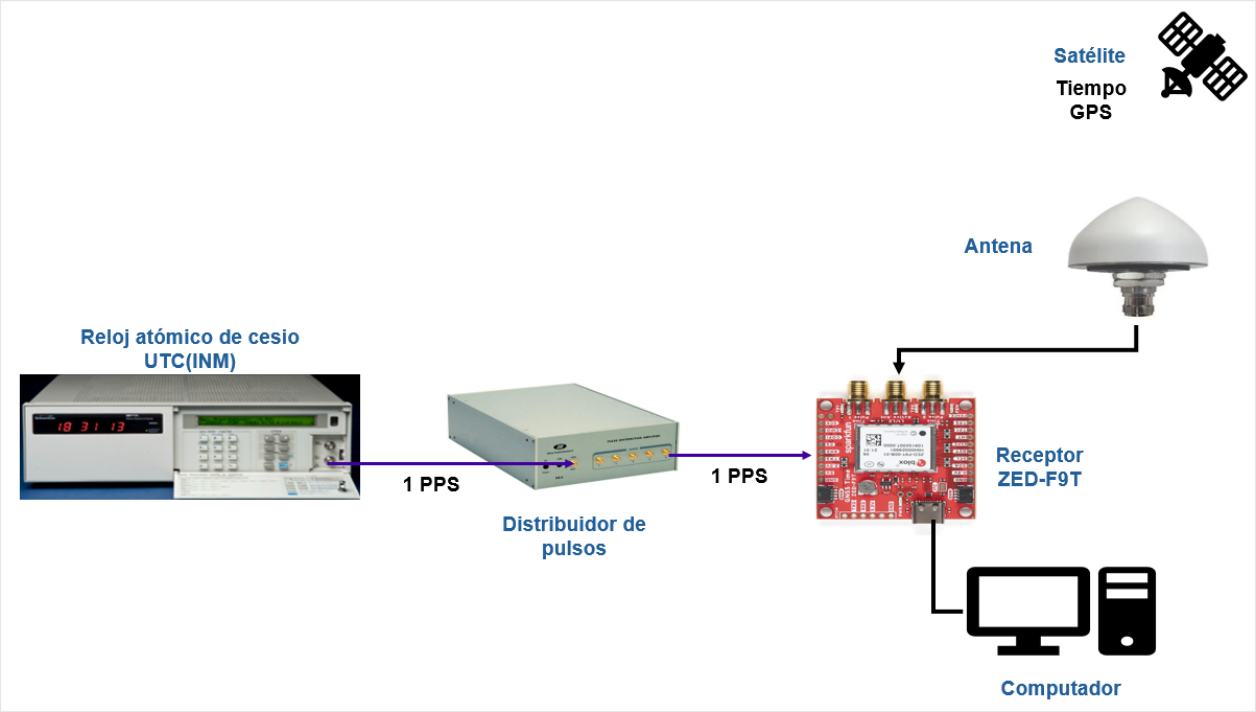
El sistema NIST TAI-1 cuenta con un computador embebido que le permite ejecutar las siguientes funciones: Conexión con el receptor GPS y la tarjeta del Contador de Intervalo de Tiempo (TIC); ejecuta un software especializado que mide una vez por segundo las diferencias de tiempo entre cada satélite individual y la escala de tiempo local del usuario; procesa los datos crudos y calcula las correcciones de los retrasos ionosféricos y troposféricos; recopila la información de las efemérides de los satélites y genera archivos de datos compatibles con el estándar internacional CGGTTS y mediante una aplicación carga automáticamente los archivos de datos al BIPM a través de Internet.

Este sistema de medición requiere el computador para las siguientes funciones: conectar el receptor a través de un cable USB-C para su alimentación; configurar el receptor; capturar y procesar los datos crudos del receptor, generación de archivos RINEX y CGGTTS a través de software desarrollado.

De acuerdo con el análisis, se estableció que el sistema de medición propuesto estará compuesto por los equipos que se muestran en la figura 12.

Figura 12.

Sistema de medición propuesto en este proyecto



Así mismo se estableció que, dada la limitación de la antena con la que cuenta el laboratorio, solo es posible implementar el método de Common-View para la constelación GPS con banda L1.

3.2. MODELO MATEMÁTICO

Como se mencionó en la sección 2.1.3, cada laboratorio mide la diferencia de tiempo entre su oscilador atómico local y la señal recibida del satélite, esto con el fin de implementar la técnica de Common-View. Sin embargo, es necesario incluir ciertas correcciones para lograr estimar la diferencia de tiempo, para esto, en la ecuación *(Ec.4)*. se presenta el modelo matemático para determinar el desfase entre el oscilador local y el del satélite para una sola frecuencia, que corresponde a la frecuencia L1 de la constelación GPS:

$$t_{clock} - t_{sat} = \frac{1}{c}\left[\overline{P_{IF}} - \left\|\overrightarrow{x_{sat}} - \overrightarrow{x_{rec,IF}}\right\| - S\right] + \delta t_{rel} + \delta t_{iono} - \delta t_{tropo} - GD \qquad \textit{(Ec.4)}$$

Donde:

- $\overline{P_{IF}}$: Pseudorange promedio durante el track
- c: Velocidad de la luz
- $\overrightarrow{x_{sat}}$: Posiciones del satélite en el marco ITRF.

- $\overrightarrow{x_{rec,IF}}$: Posiciones del centro de fase de la antena en el marco ITRF.
- S: Corrección de Sagnac por rotación terrestre.
- δt_{rel}: Corrección relativista por el desplazamiento al rojo variable.
- δt_{iono}: Retraso ionosférico (estimado mediante modelo Klobuchar para GPS).
- δt_{tropo}: Retraso troposférico (calculado con el modelo estándar de NATO).
- GD: Retraso de grupo (Group Delay) transmitido en el mensaje de navegación.

Para calcular o determinar las posiciones, correcciones y retrasos de la *Ec. 4*, es necesario conocer el mensaje de navegación (.nav) que se genera en formato RINEX. Este contiene los parámetros de efemérides transmitidos por los satélites GNSS, los cuales permiten reconstruir su posición y estado temporal en cualquier instante. En la figura 13, se muestra un ejemplo del mensaje de navegación para el satélite G3 y en la tabla 4 se muestra la estructura del mensaje:

Figura 13.

Mensaje de navegación para el satélite G3

```
G 3 2026  4 12 18  0  0  .505898147821E-03 -.142108547152E-10  .000000000000E+00
      .135000000000E+03  .500625000000E+02  .387301846962E-08  .537303801294E+00
      .267289578915E-05  .667816726491E-02  .607781112194E-05  .515360760498E+04
      .648000000000E+05 -.540167093277E-07 -.290892314757E+01  .689178705215E-07
      .994064217828E+00  .279500000000E+03  .120890781250E+01 -.799354724904E-08
      .115719105880E-09  .100000000000E+01  .241400000000E+04  .000000000000E+00
      .240000000000E+01  .000000000000E+00  .139698386192E-08  .135000000000E+03
      .588960000000E+05  .400000000000E+01
```

Tabla 4.

Estructura del mensaje de navegación

Posición	Campo	Significado
Fila 1	G 3	Satélite GPS PRN 03
	Fecha	Epoch de referencia del reloj
	af0	bias del oscilador del satélite (s)
	af1	drift del oscilador (s/s)
	af2	drift de segundo orden (s/s²)
Fila 2	IODE	Issue of Data Ephemeris
	Crs	Corrección radial (m)
	Δn	Corrección de movimiento medio (rad/s)
	M0	Anomalía media inicial (rad)

Posición	Campo	Significado
Fila 3	Cuc	Corrección coseno argumento latitud
	e	Excentricidad orbital
	Cus	Corrección seno argumento latitud
	√A	Raíz del semieje mayor
Fila 4	toe	Tiempo de referencia efeméride
	Cic	Corrección inclinación
	Ω0	Longitud nodo ascendente
	Cis	Corrección inclinación
Fila 5	i0	Inclinación orbital
	Crc	Corrección radial
	ω	Argumento del perigeo
	Ω̇	Velocidad nodo ascendente
	i0	Inclinación orbital
Fila 6	IDOT	Variación de inclinación
	Codes L2	Tipo código
	GPS Week	Semana GPS
	L2P flag	Flag
Fila 7	SV accuracy	Precisión estimada
	SV health	Estado del satélite
	TGD	Group Delay (s)
	IODC	Issue of Data Clock
Fila 8	Transmission time	Tiempo transmisión
	Fit interval	Intervalo de ajuste

A continuación, se presenta el cálculo para cada uno de las posiciones, correcciones y retrasos, en algunos casos los procesos son amplios y solo se hace una breve explicación:

Posición del satélite $\overrightarrow{x_{sat}}$

La posición del satélite se calcula a partir de varios parámetros que se encuentran en el mensaje de navegación (.nav). El proceso para hacer este cálculo es complejo y para este caso no es necesario implementarlo dado que el software R2CGGTTS requiere de los mensajes .nav para procesarlos e incluirlos en el archivo CGGTTS.

Los parámetros requeridos se muestran en la Tabla 3 y corresponden a los descritos en las filas 1 a la 5. Con ellos, se procede a calcular lo siguiente:

- El tiempo de recepción y de transmisión del mensaje
- El tiempo relativo a la efeméride
- El semieje mayor de la órbita
- El movimiento medio
- Anomalías: media, excéntrica y verdadera
- Argumento de latitud no corregido
- Correcciones orbitales
- Argumento de latitud, radio e inclinación corregidos
- Coordenadas en el plano orbital
- Longitud corregida del nodo ascendente
- Coordenadas del satélite

Posiciones del centro de fase de la antena $\overrightarrow{x_{rec,1}}$

La posición del receptor utilizada en el cálculo del pseudorango geométrico se obtiene a partir de las coordenadas cartesianas incluidas en el encabezado del archivo RINEX de observación. Sin embargo, dichas coordenadas corresponden típicamente al punto de referencia de la antena (ARP). Para obtener la posición del centro de fase de la antena (APC), es necesario aplicar un vector de corrección dependiente del modelo de antena, el cual se obtiene de archivos externos de calibración como el formato ANTEX generado por el IGS en (International GNSS Service, n.d.).

Corrección de Sagnac por rotación terrestre S

Esta corrección está asociada a la rotación terrestre durante la propagación de la señal GNSS, se calcula a partir de las coordenadas del satélite, obtenidas mediante las efemérides, y de la posición del receptor, considerando la velocidad angular de la Tierra.

$$\delta\rho_{Sag} = \frac{\Omega_E}{c}\,(X_s\,Y_r - X_r Y_s) \qquad \textit{(Ec. 5)}$$

donde:

- X_s, Y_s: Coordenadas del satélite
- X_r, Y_r: Coordenadas del receptor
- Ω_E: Velocidad angular de la Tierra
- $c\rightarrow$ velocidad de la luz

Corrección del oscilador relativista δt_{rel}

Es un término que corrige el efecto combinado de la relatividad general (campo gravitacional) y la relatividad especial (velocidad del satélite). Su expresión se presenta en la ecuación *Ec.6*,

$$\delta t_{rel} = -\frac{2\sqrt{\mu}}{c^2} \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin E \qquad \textit{(Ec. 6)}$$

Donde:

- $\mu = 3.986005 * 10^{14}\ m^3/s^2$: es el parámetro gravitacional terrestre
- $c = 299\,792\,458\ m/s$: es la velocidad de la luz.

De los parámetros de la tabla 4, se utilizan e y $\sqrt{A}$, con ellos se calcula la anomalía excéntrica E y se aplica la ecuación *Ec.6.*

Retraso ionosférico δt_{iono}

El archivo de navegación (.nav) proporciona los coeficientes para aplicar el modelo ionosférico de Klobuchar *Ec.7*, los cuales permiten estimar este retraso en función de la posición del receptor, la elevación del satélite y el tiempo de observación. En la figura 14, se observan las filas GPSA y GPSB que corresponden a los coeficientes de amplitud ALPHA y de periodo BETA para los satélites GPS. También se requiere la elevación del satélite e, latitud y longitud del receptor y la hora GPS.

$$\delta t_{iono} = F \cdot [5 \times 10^{-9} + A \cdot (1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24})] \qquad \textit{(Ec. 7)}$$

Donde:

- F: es el factor de oblicuidad que corresponde a $F = 1 + 16(0.53 - e)^3$
- A: Amplitud del retraso ionosférico
- x: Variable de fase con t corregido por longitud ionosférica

Figura 14.

Encabezado del archivo de navegación

```
     3.04           N: GNSS NAV DATA    M: Mixed            RINEX VERSION / TYPE
CONVBIN 2.4.2                           20260412 235900 UTC PGM / RUN BY / DATE
log: C:\Users\Claudia Rodriguez\Documents\Medición remota\R2COMMENT
format: u-blox                                              COMMENT
GPSA   1.5832E-08  1.4901E-08 -1.1921E-07 -1.1921E-07       IONOSPHERIC CORR
GPSB   1.0650E+05  6.5536E+04 -1.9661E+05 -1.9661E+05       IONOSPHERIC CORR
GAL    0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00       IONOSPHERIC CORR
QZSA   0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00       IONOSPHERIC CORR
QZSB   0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00       IONOSPHERIC CORR
GPUT -3.7252902985E-09-1.509903313E-14 233472 2414         TIME SYSTEM CORR
GAUT  0.0000000000E+00 0.000000000E+00      0    0         TIME SYSTEM CORR
QZUT  0.0000000000E+00 0.000000000E+00      0    0         TIME SYSTEM CORR
BDUT  0.0000000000E+00 0.000000000E+00      0    0         TIME SYSTEM CORR
                                                            END OF HEADER
```

Retraso Troposférico δt_{tropo}:

La corrección del retraso de refracción troposférica se calcula utilizando el modelo hidrostático estándar NATO para los satélites de todos los sistemas:

$$\delta t_{tropo} = f(e) * \Delta R(h) \qquad \textit{(Ec.8)}$$

Donde:

- $f(e)$: Función de la elevación dada por:

$$f(e) = \frac{1}{\sin(e) + \frac{0.00143}{\tan(e) + 0.0455}}$$

- $\Delta R(h)$ es el retraso total en el cenit, el cual varía si la altitud es menor o mayor a 1 km.

  Para $h < 1$ km:

$$\Delta R(h) = \frac{1}{c}[2162 + N_s(1 - \mathrm{h}) + 0.5\,\Delta\mathrm{N}\,(1 - h^2)]10^{-3}$$

  Para $h > 1$ km:

$$\Delta R(h) = \frac{1}{c}\left[732 - 8\frac{N_s + \Delta N}{N_{slog}}\left(e^{-N_{slog}} - e^{0.125(1-h)N_{slog}}\right)\right]10^{-3}$$

Retraso de grupo GD:

Es un parámetro transmitido en el mensaje de navegación que representa el desfase entre las señales de diferentes frecuencias debido a los efectos internos del hardware del satélite. En el caso del sistema GPS, este parámetro se denota como TGD y se obtiene directamente del archivo RINEX de navegación (.nav). Este parámetro corresponde a la línea 7 columna 3 para cada mensaje de navegación de cada satélite, ver Figura 15.

Figura 15.

Ubicación del parámetro TDG en el mensaje de navegación

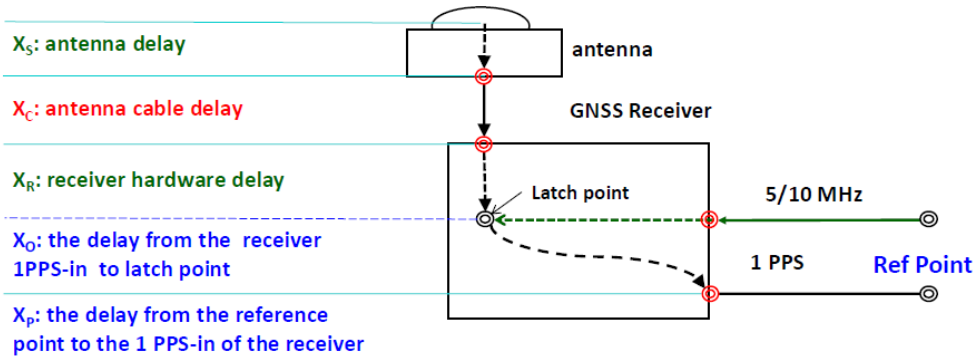
```
G 3 2026  4 12 18  0  0  .505898147821E-03 -.142108547152E-10  .000000000000E+00
      .135000000000E+03  .500625000000E+02  .387301846962E-08  .537303801294E+00
      .267289578915E-05  .667816726491E-02  .607781112194E-05  .515360760498E+04
      .648000000000E+05 -.540167093277E-07 -.290892314757E+01  .689178705215E-07
      .994064217828E+00  .279500000000E+03  .120890781250E+01 -.799354724904E-08
      .115719105880E-09  .100000000000E+01  .241400000000E+04  .000000000000E+00
      .240000000000E+01  .000000000000E+00  .139698386192E-08  .135000000000E+03
      .588960000000E+05  .400000000000E+01
```

Pseudorange $\bar{P}_{IF}$:

Adicionalmente, según (Defraigne & Petit, 2015) también se deben considerar los retrasos asociados al hardware del receptor, los cuales son REFDLY, INTDLY y CABDLY. En la figura 16 se puede observar todos los retrasos que se pueden dar en una estación típica de GNSS usada para la comparación remota de osciladores:

Figura 16.

Retrasos de una estación típica de GNSS



**Tomado de Calvin S.Y. Lin, Telecommunication Laboratories, Taiwan*

REFDLY: es la diferencia en tiempo entre el oscilador interno del receptor (o su implementación convencional mediante una señal externa) y el oscilador local, que puede ser una realización de UTC. En la mayoría de los casos, esta diferencia en tiempo consta de dos componentes que deben medirse: el retraso del cable entre el oscilador local y el conector de entrada del receptor, y la diferencia en tiempo entre el conector de entrada y la referencia interna, estos se representan como los valores X_O y X_P.

INTDLY: es el retraso combinado de la señal GNSS dentro de la antena y el receptor, representados como los valores X_S y X_R. Este retraso depende de la frecuencia y del código, por lo que debe proporcionarse para cada señal utilizada en el CGGTTS. Los retrasos de hardware que intervienen en INTDLY deben determinarse mediante una campaña de calibración.

CABDLY: es el retraso de grupo de señal dentro del cable de antena, incluyendo ambos conectores de extremo, representado como el valor X_C.

Luego, se realiza un procedimiento de cálculo para corregir los datos asociados a los pseudorange, donde se toman las mediciones de cada uno de los P_i y se corrigen los retrasos del hardware del receptor como se presenta en la *Ec.9.*

$$\bar{P}_i = P_i - c\,(INTDLY(f_i) + CABDLY - REFDLY) \qquad \textit{(Ec.9)}$$

Donde:

- P_i: Pseudodistancia corregida (en metros).
- c: Velocidad de la luz.
- $INTDLY(f_i) + CABDLY - REFDLY$: Retraso de hardware dependiente de la frecuencia.

3.3. DISEÑO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

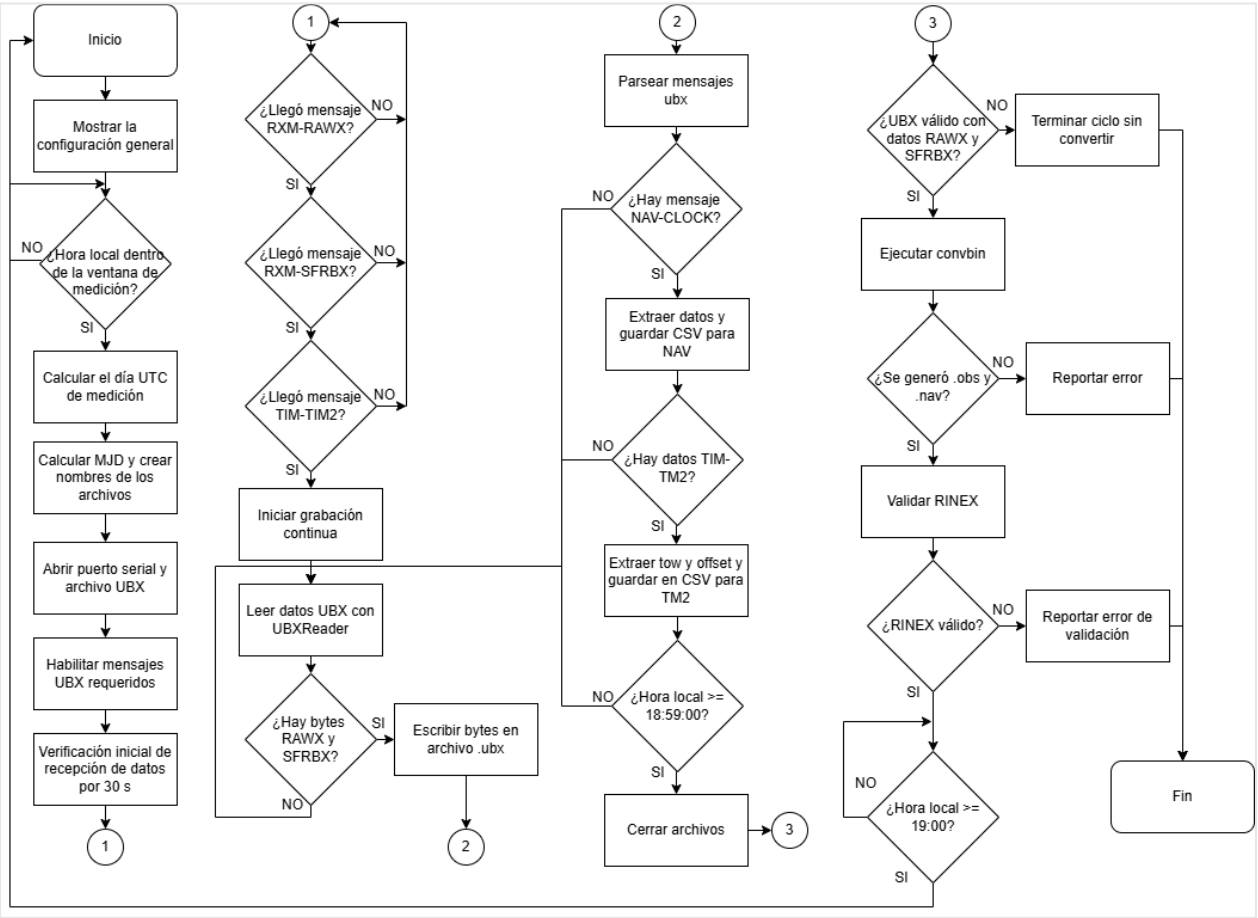
Para lograr la adquisición de datos para el sistema, se establecieron las siguientes actividades:

- Abrir el puerto para comunicación con el receptor.
- Habilitar y comprobar la recepción de los mensajes requeridos.
- Crear los archivos (.ubx y .csv) y guardar los datos correspondientes, para el día.
- Generar los archivos RINEX a partir del archivo (.ubx) con la herramienta convbin
- Validar si los archivos RINEX contienen datos válidos.

Se diseñó el diagrama de flujo que presenta el funcionamiento requerido para este software el cual se muestra en la Figura 17.

Figura 17.

Diagrama de flujo para el software de adquisición de datos.



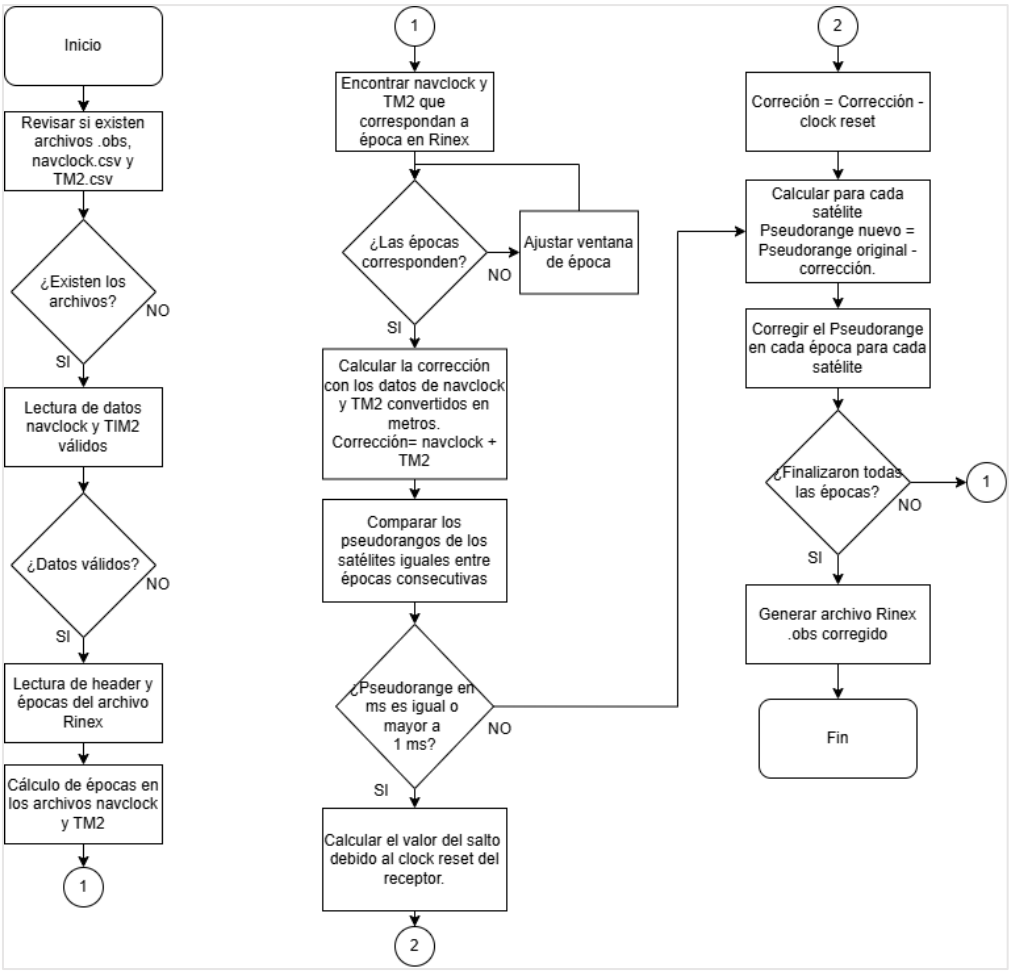
3.4. DISEÑO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

A continuación, en la figura 18 se presenta el diagrama de flujo diseñado para las actividades requeridas en el procesamiento de los datos, las cuales son:

- Validar existencia de los archivos (.obs y .csv)
- Para cada época en el archivo RINEX, encontrar el TM2 y NAVCLOCK que corresponda.
- Realizar el cálculo de la corrección del pseudorange de cada época.
- Revisar si los pseudorangos para cada satélite entre épocas consecutivas son mayores a 1 ms y calcular el valor del salto de reloj del receptor.
- Calcular y corregir para cada satélite el nuevo valor de pseudorange.
- Generar archivo RINEX (.obs) corregido.

Figura 18.

Diagrama de flujo para el software de procesamiento de datos.



4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN

En este capítulo se presenta la fase de implementación del prototipo de sistema de medición, en la cual se materializa el diseño previamente definido mediante la integración de los componentes de hardware y el desarrollo de las herramientas de software requeridas. Esta etapa corresponde a la ejecución práctica de la arquitectura propuesta, permitiendo configurar un sistema funcional capaz de adquirir, procesar y transformar las observaciones GNSS en resultados de medición para la comparación de señales de osciladores atómicos.

La implementación comprende tres aspectos fundamentales. En primer lugar, se realiza el ensamble físico del prototipo, considerando la disposición y las conexiones necesarias para garantizar la integridad de las señales y la correcta interacción entre los elementos del sistema. En segundo lugar, se lleva a cabo la configuración del receptor GNSS, asegurando la habilitación de los mensajes y parámetros requeridos para la adquisición de datos crudos y su posterior procesamiento en formatos estándar. Finalmente, se desarrolla el software de adquisición y el software de procesamiento de datos, los cuales permiten capturar, almacenar y transformar la información obtenida en los formatos estándar requeridos.

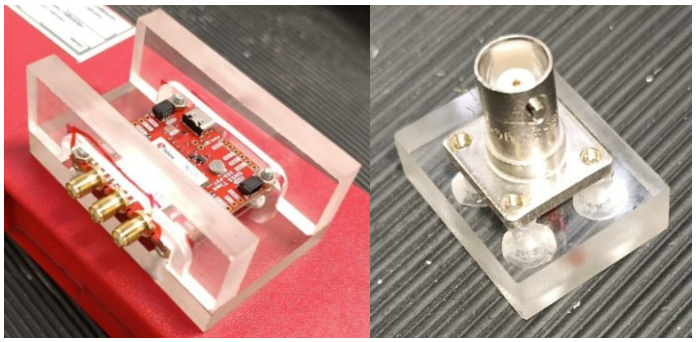
De esta manera, el capítulo describe el proceso mediante el cual el diseño se convierte en un sistema operativo, sentando las bases para la validación experimental y la evaluación de los resultados de medición presentados en el capítulo siguiente.

4.1. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO

Teniendo en cuenta la arquitectura del prototipo de sistema de medición propuesto, se procedió a realizar su ensamble. Inicialmente, se desarrolló un chasis en acrílico (ver Figura 19) para el receptor y los terminales o conectores SMA y USB-C propios del receptor. Además, para un conector BNC el cual va conectado al pin EXTINT mediante cable con aislante en teflón para preservar la calidad de la señal.

Figura 19.

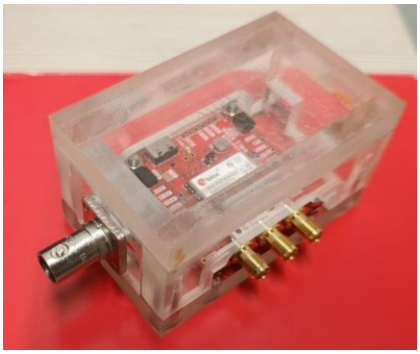
Elaboración del chasis de acrílico para el receptor.



En la Figura 20 se puede observar el chasis finalizado donde se puede acceder a los terminales requeridos para la conexión con los demás elementos del sistema prototipo.

Figura 20.

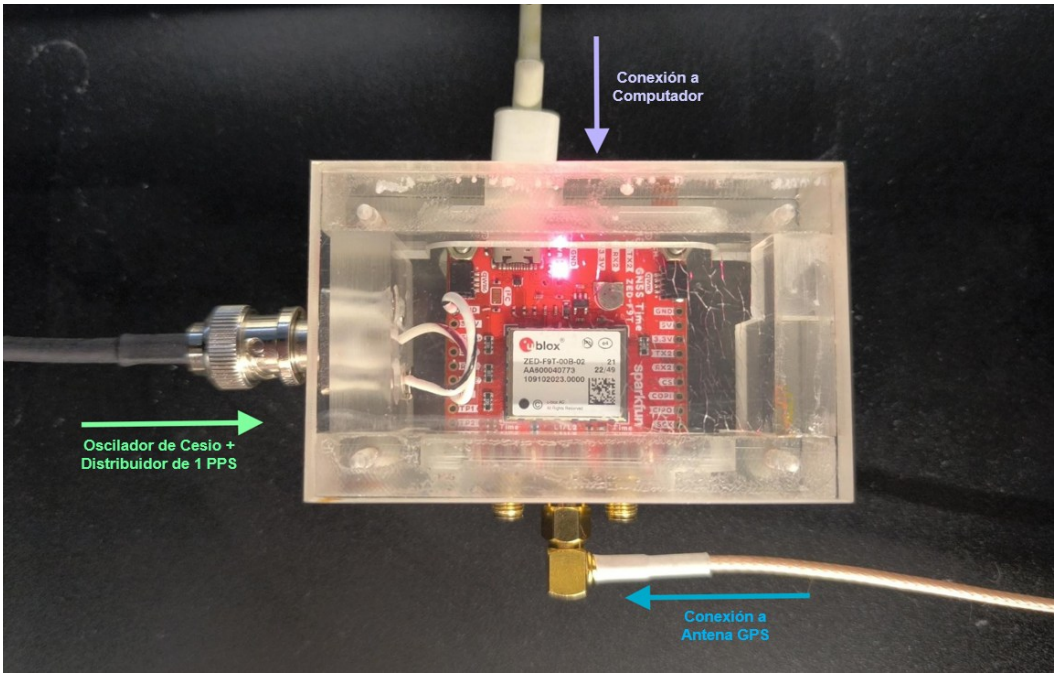
Chasis de acrílico para el receptor.



En el receptor se conectan los demás instrumentos y equipos, como aparece en la Figura 21, mediante un conector BNC se conecta la entrada de la señal proveniente del distribuidor de 1 PPS que se conecta al oscilador de cesio, el computador se conecta mediante el puerto USB-C el cual proporciona la energía para su funcionamiento y permite la transmisión de los datos y finalmente un conector SMA al que se le conecta la antena GPS.

Figura 21.

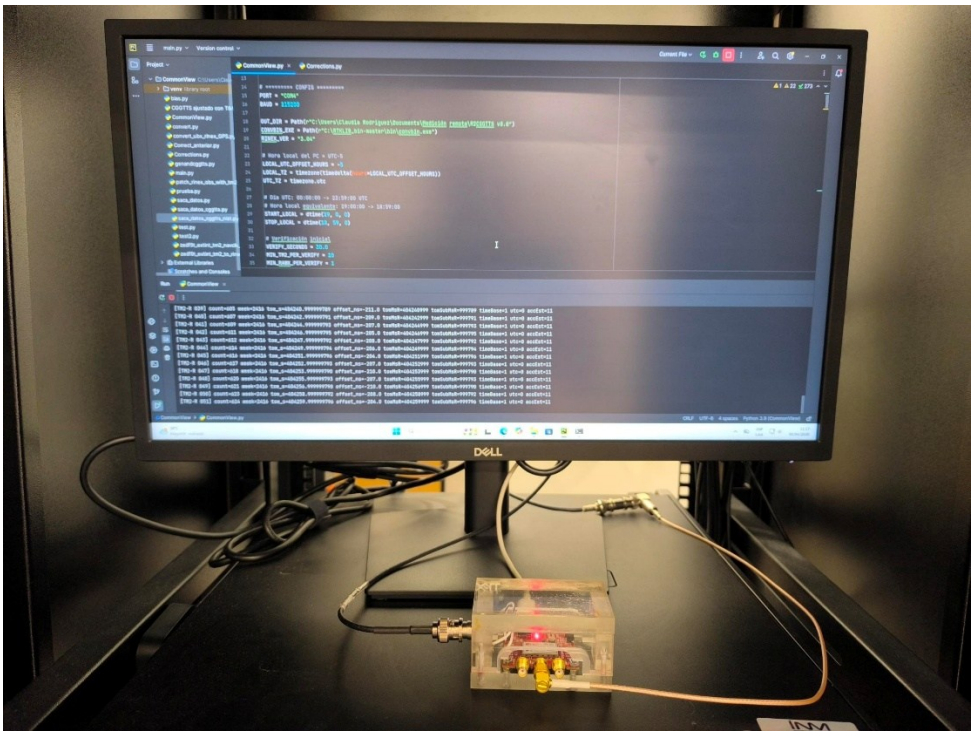
Conexión del prototipo.



En la Figura 22 se muestra la ubicación del sistema prototipo en el rack del laboratorio, debido a las amplias distancias entre los racks así como a la zona de ubicación de las antenas no es posible presentar todo el sistema en su conjunto.

Figura 22.

Ubicación del sistema prototipo en el laboratorio.



4.2. CONFIGURACIÓN DEL RECEPTOR ZED-F9T

Para la implementación el software de adquisición de datos fue necesario conocer primero sobre el funcionamiento del receptor en cuanto al tipo de mensajes que podía generar. Los receptores GNSS pueden transmitir información mediante protocolos estándar como NMEA o mediante protocolos propietarios como UBX. Mientras que NMEA está orientado a aplicaciones de navegación y proporciona información básica de posición, velocidad y tiempo en formato ASCII, el protocolo UBX permite el acceso completo a las capacidades internas del receptor, incluyendo observaciones GNSS crudas, datos de navegación, estado del oscilador y mecanismos de sincronización de alta precisión.

En aplicaciones de transferencia de tiempo como la técnica Common View, es necesario acceder a los pseudorangos y a la relación temporal entre el receptor y una referencia externa, lo cual solo es posible mediante mensajes UBX como UBX-RXM-RAWX, UBX-RXM-SFRBX y UBX-TIM-TM2. Por esta razón, el uso del protocolo UBX resulta indispensable, mientras que el protocolo

NMEA no es adecuado debido a sus limitaciones en resolución temporal y acceso a datos internos del receptor.

Para configurar el receptor ZED-F9T para el método de Common-View, se deben seguir una serie de pasos para la fijación de la posición de la antena del receptor, la habilitación de mensajes para la captura de datos crudos (pseudorange), de los pulsos externos y de la desviación del oscilador interno del receptor. Estos pasos se realizan en el software *u-center_v25.06*, el cual se puede descargar desde la página web de *u-blox* e instalarlo en el computador dedicado para el sistema. A continuación, se detallan las operaciones realizadas para la configuración:

a) Configuración de la posición de la antena

Para el método de vista común, la antena debe estar estacionaria y su posición debe conocerse con extrema precisión, ya que cualquier error de posición se traduce directamente en errores de tiempo.

En la ecuación:

$$\delta t = \frac{\delta r}{c} \qquad \textit{(Ec. 10)}$$

Donde:

δt: Error temporal inducido en la medición de tiempo debido al error en la posición de la antena/receptor.

δr: Error en la distancia geométrica entre la posición real de la antena y la posición asumida por el receptor en el procesamiento.

c: Velocidad de la luz.

La ecuación expresa que cualquier error en la posición de la antena produce un error equivalente en el tiempo de propagación de la señal satélite–receptor, porque el receptor modela incorrectamente la distancia geométrica recorrida por la señal GNSS.

Por ejemplo, si la posición de la antena tiene un error de 1 m:

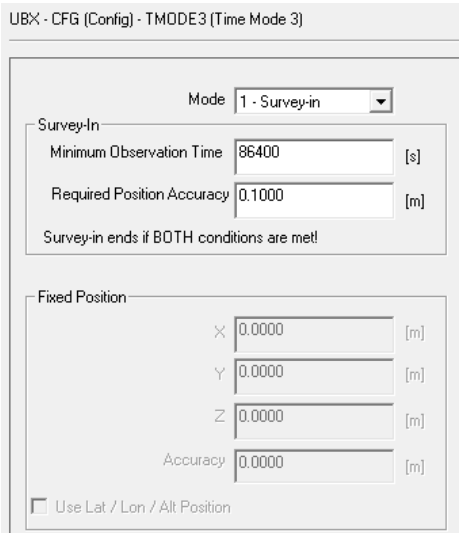
$$\delta t = \frac{1\ m}{299\,792\,458\ m/s} \approx 3.3 \text{ ns}$$

Entonces, se puede observar que 1 metro de error en la posición de la antena se produce un error en tiempo de 3.3 ns, lo cual afectaría significativamente las mediciones.

Para conocer las coordenadas exactas, se configura el mensaje *UBX-CFG-TMODE3* en el modo Survey-in para que el receptor estime su posición durante un periodo prolongado, ver Figura 23, el fabricante recomienda al menos 24 horas para alta precisión.

Figura 23.

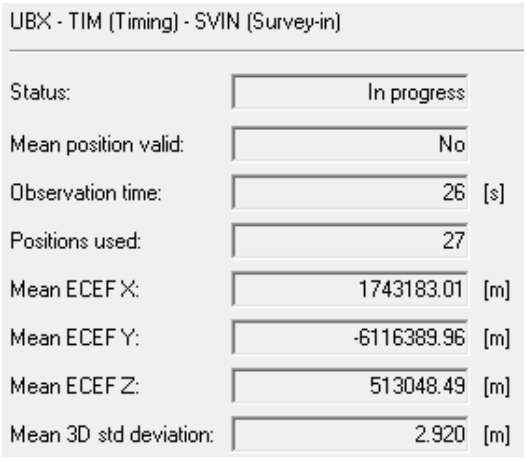
Configuración del mensaje UBX-CFG-TMODE3 en el modo Survey-in



Luego se verifica que la configuración haya quedado correcta y que el receptor inicie la medición de las coordenadas En la Figura 24, se observa el estado "*in progress*" y los promedios de las mediciones para cada coordenada con base en las observaciones adquiridas. El receptor establece las coordenadas cuando se cumplen simultáneamente dos condiciones: un tiempo mínimo de observación de 86 400 s y un umbral de exactitud configurado de 0.1 m. Este valor de exactitud corresponde a un criterio interno de convergencia del algoritmo de posicionamiento del receptor basado en la dispersión de las soluciones obtenidas, es un indicador de estabilidad de la solución de posición durante el proceso de promediado.

Figura 24.

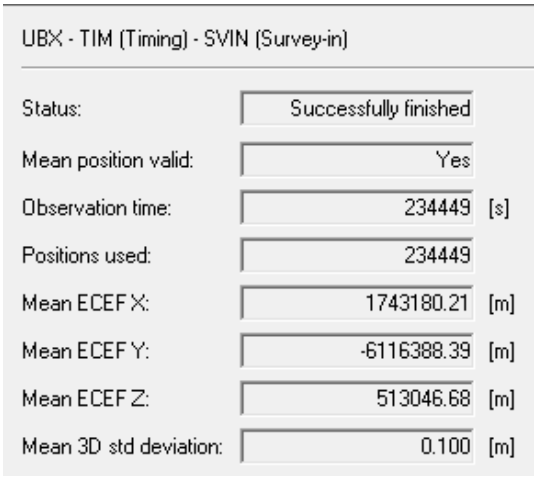
Verificación del estado de medición de la posición de la antena



En la Figura 25, se puede observar que para lograr la exactitud requerida fueron necesarios 234449 s que corresponden a casi 3 días de medición.

Figura 25.

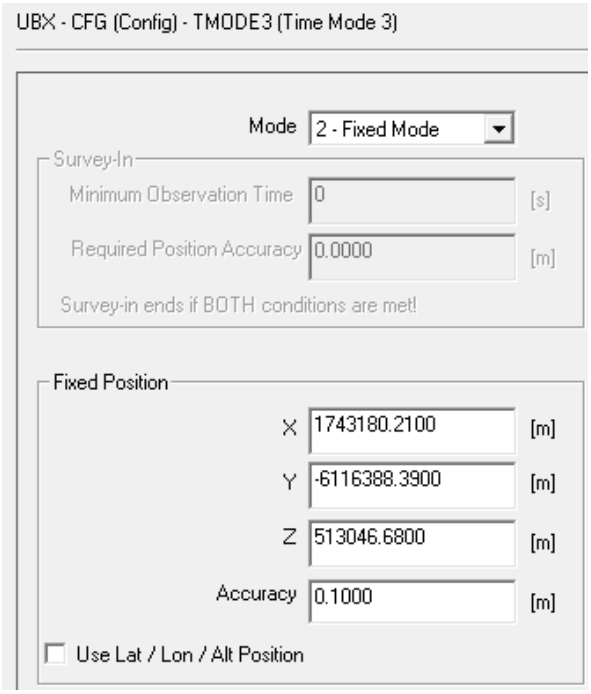
Coordenadas establecidas para la posición de la antena



Luego de encontrar las coordenadas se debe configurar la posición fija, en el mensaje *UBX-CFG-TMODE3*, en el modo Fixed e ingresar las coordenadas X, Y, Z manualmente como se observa en la Figura 26, luego se guarda la configuración.

Figura 26.

Configuración del mensaje UBX-CFG-TMODE3 en el modo fixed

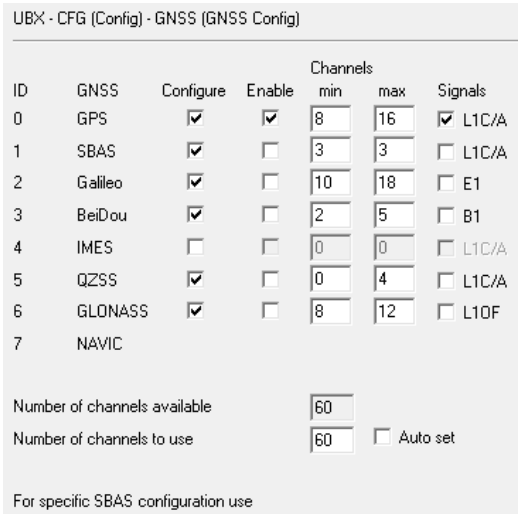


b) Configuración de la constelación GPS

El receptor tiene la capacidad de obtener datos de varias constelaciones, es necesario configurarlo para que únicamente esté ligado a la constelación GPS, para esto se accede al mensaje UBX-CFG-GNSS y se habilita la opción GPS como se puede ver en la Figura 27.

Figura 27.

Configuración de la constelación GPS

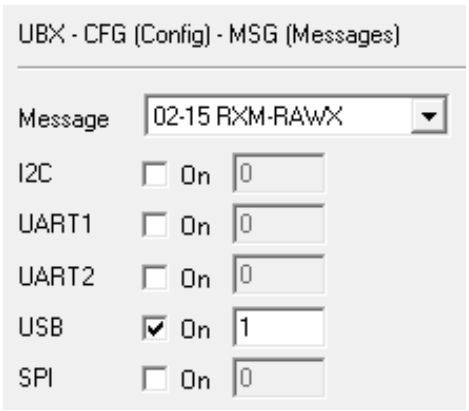


c) Configuración del mensaje para obtener datos de los satélites

Es indispensable obtener las mediciones crudas de los satélites, para esto, se debe habilitar el mensaje UBX-RXM-RAWX, que proporciona el pseudorange, el carrier phase y los demás mensajes de navegación para cada uno de los satélites que se encuentran en línea de vista. Se activa el mensaje UBX-RXM-RAWX en el menú de configuración de mensajes como se muestra en la Figura 28.

Figura 28.

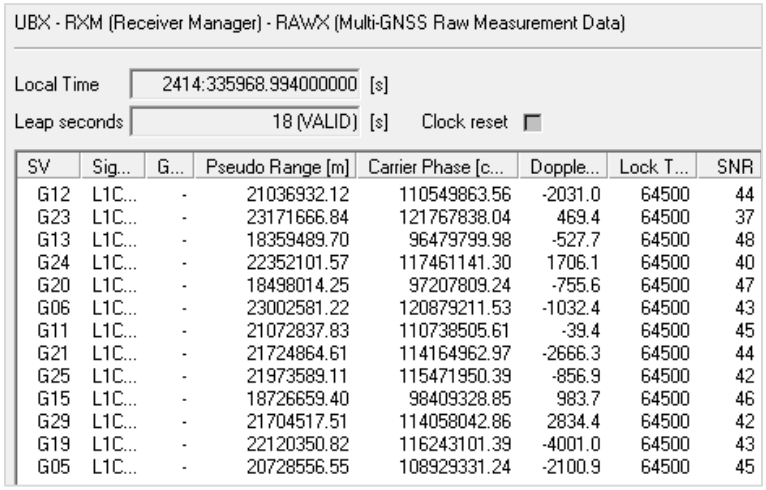
Configuración para obtener el mensaje UBX-RXM-RAWX



Luego se verifica que el receptor se encuentre leyendo los datos de los satélites, esto se realiza en el menú de vista de mensajes para el mensaje UBX-RXM-RAWX como se puede observar en la Figura 29.

Figura 29.

Verificación de datos del mensaje UBX-RXM-RAWX



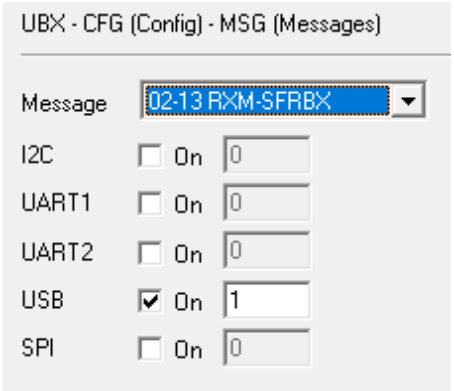
SV	Sig...	G...	Pseudo Range [m]	Carrier Phase [c...	Dopple...	Lock T...	SNR
G12	L1C...	-	21036932.12	110549863.56	-2031.0	64500	44
G23	L1C...	-	23171666.84	121767838.04	469.4	64500	37
G13	L1C...	-	18359489.70	96479799.98	-527.7	64500	48
G24	L1C...	-	22352101.57	117461141.30	1706.1	64500	40
G20	L1C...	-	18498014.25	97207809.24	-755.6	64500	47
G06	L1C...	-	23002581.22	120879211.53	-1032.4	64500	43
G11	L1C...	-	21072837.83	110738505.61	-39.4	64500	45
G21	L1C...	-	21724864.61	114164962.97	-2666.3	64500	44
G25	L1C...	-	21973589.11	115471950.39	-856.9	64500	42
G15	L1C...	-	18726659.40	98409328.85	983.7	64500	46
G29	L1C...	-	21704517.51	114058042.86	2834.4	64500	42
G19	L1C...	-	22120350.82	116243101.39	-4001.0	64500	43
G05	L1C...	-	20728556.55	108929331.24	-2100.9	64500	45

d) Configuración del mensaje para obtener datos de navegación

El mensaje *UBX-RXM-SFRBX* es el encargado de reportar los datos de navegación transmitidos (broadcast navigation data) que el receptor recolecta de cada señal satelital rastreada, en la Figura 30 se presenta la activación de la salida del mensaje en el panel de configuración de mensajes.

Figura 30.

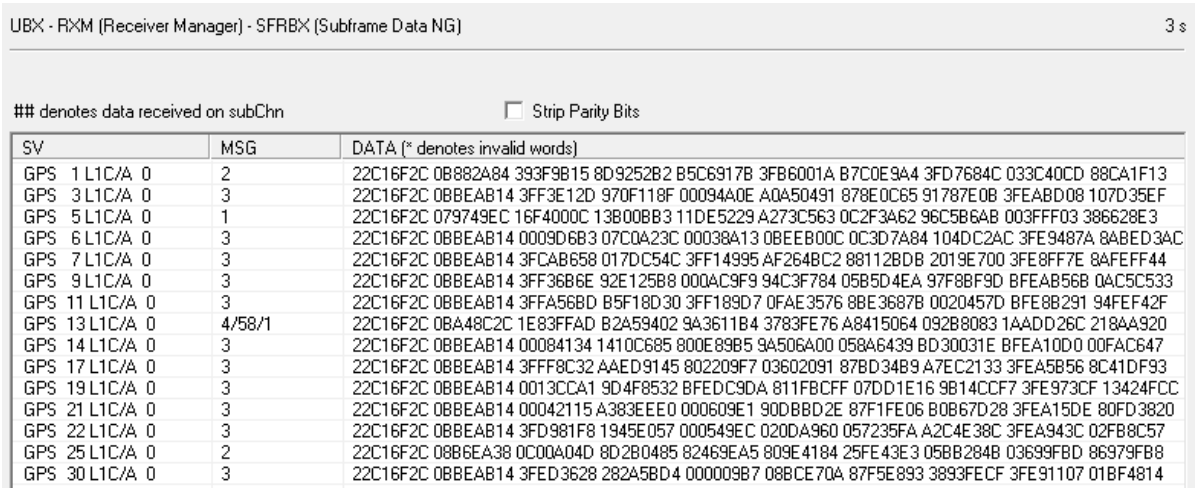
Configuración para obtener el mensaje UBX-RXM-SFRBX



Luego se verifica que el receptor se encuentre leyendo los datos del mensaje UBX-RXM-SFRBX como se puede observar en la Figura 31.

Figura 31.

Verificación de datos del mensaje UBX-RXM-SFRBX



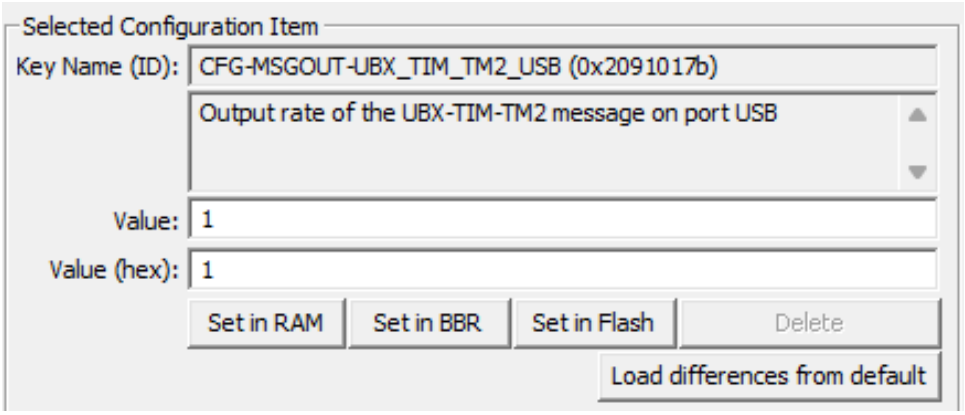
SV	MSG	DATA (* denotes invalid words)
GPS 1 L1C/A 0	2	22C16F2C 0B882A84 393F9B15 8D9252B2 B5C6917B 3FB6001A B7C0E9A4 3FD7684C 033C40CD 88CA1F13
GPS 3 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FF3E12D 970F118F 00094A0E A0A50491 878E0C65 91787E0B 3FEABD08 107D35EF
GPS 5 L1C/A 0	1	22C16F2C 079749EC 16F4000C 13B00BB3 11DE5229 A273C563 0C2F3A62 96C5B6AB 003FFF03 386628E3
GPS 6 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 0009D6B3 07C0A23C 00038A13 0BEEB00C 0C3D7A84 104DC2AC 3FE9487A 8ABED3AC
GPS 7 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FCAB658 017DC54C 3FF14995 AF264BC2 88112BDB 2019E700 3FE8FF7E 8AFEFF44
GPS 9 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FF36B6E 92E125B8 000AC9F9 94C3F784 05B5D4EA 97F8BF9D BFEAB56B 0AC5C533
GPS 11 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FFA56BD B5F18D30 3FF189D7 0FAE3576 8BE3687B 0020457D BFE8B291 94FEF42F
GPS 13 L1C/A 0	4/58/1	22C16F2C 0BA48C2C 1E83FFAD B2A59402 9A3611B4 3783FE76 A8415064 092B8083 1AADD26C 218AA920
GPS 14 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 00084134 1410C685 800E89B5 9A506A00 058A6439 BD30031E BFEA10D0 00FAC647
GPS 17 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FFF8C32 AAED9145 802209F7 03602091 87BD34B9 A7EC2133 3FEA5B56 8C41DF93
GPS 19 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 0013CCA1 9D4F8532 BFEDC9DA 811FBCFF 07DD1E16 9B14CCF7 3FE973CF 13424FCC
GPS 21 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 00042115 A383EEE0 000609E1 90DBBD2E 87F1FE06 B0B67D28 3FEA15DE 80FD3820
GPS 22 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FD981F8 1945E057 000549EC 020DA960 057235FA A2C4E38C 3FEA943C 02FB8C57
GPS 25 L1C/A 0	2	22C16F2C 08B6EA38 0C00A04D 8D2B0485 82469EA5 809E4184 25FE43E3 05BB284B 03699FBD 86979FB8
GPS 30 L1C/A 0	3	22C16F2C 0BBEAB14 3FED3628 282A5BD4 000009B7 08BCE70A 87F5E893 3893FECF 3FE91107 01BF4814

e) Configuración del mensaje para obtener datos del oscilador atómico

El receptor mide el tiempo de llegada de un pulso externo (1 PPS del oscilador atómico local) utilizando su función interna de registro de tiempo denominada *time-tagging*. Se debe habilitar el mensaje *UBX-RXM-TIM-TM2*, el cual registra el tiempo exacto en el que el receptor detectó el flanco del pulso en el pin *EXTINT*.

Figura 32.

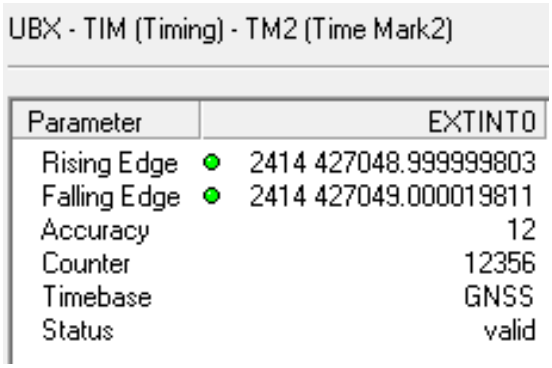
Configuración para obtener el mensaje UBX-TIM-TM2



Luego se verifica que el receptor se encuentre leyendo los datos para el mensaje *UBX-TIM-TM2* como se puede observar en la Figura 33.

Figura 33.

Verificación de datos del mensaje UBX-TIM-TM2

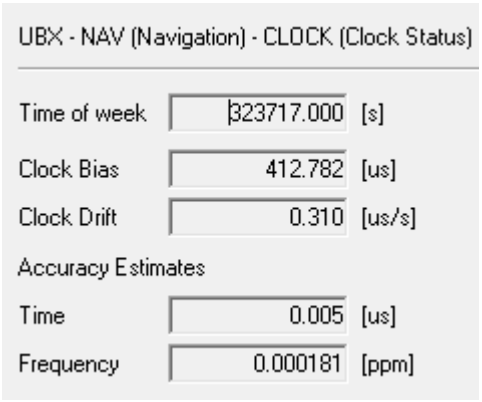


f) Configuración del mensaje para obtener el dato de desviación del oscilador interno del receptor.

El mensaje *UBX-NAV-CLOCK* reporta sobre el estado del oscilador interno del receptor, específicamente para esta aplicación se requiere conocer la desviación del oscilador (Clock Bias), que corresponde a la diferencia calculada entre el tiempo del sistema GNSS y el tiempo local del receptor.

Figura 34.

Verificación de datos del mensaje UBX-NAV-CLOCK



4.3. SOFTWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Se desarrolló un software de adquisición de datos en Python para capturar y almacenar las observaciones GNSS del receptor, utilizando el protocolo UBX y la librería pyubx2 mediante el puerto USB. Esta herramienta permite decodificar en tiempo real los mensajes generados por el receptor para tener el acceso a las mediciones necesarias para su posterior procesamiento. Así mismo, automatiza la conversión de los archivos UBX generados por el receptor GNSS a formato

RINEX mediante la herramienta convbin de RTKLIB. Esto permite generar los archivos de observación y navegación en formato RINEX.

Antes de iniciar la adquisición, el software ejecuta una fase de verificación durante un intervalo de tiempo corto, en la cual se evalúa la presencia de los mensajes y se establecen umbrales mínimos de detección para cada tipo de mensaje, ver Figura 35. En caso de no cumplirse estos criterios, el sistema detiene la ejecución, evitando la generación de archivos incompletos o inválidos. Esta etapa es fundamental para garantizar la calidad de los datos desde el inicio de la medición.

Figura 35.

Verificación de llegada de mensajes.

```
try:
    with Serial(PORT, baudrate=BAUD, timeout=1) as stream, open(ubx_path, "wb") as f:
        enable_required_messages(stream)
        try_configure_timemark_note()

        ubr = UBXReader(stream, protfilter=UBX_PROTOCOL)

        print(f"[INFO] Verificando llegada de RXM-RAWX, RXM-SFRBX y TIM-TM2 durante {VERIFY_SECONDS:.0f} s...")
        verify_counts = verify_required_arrival(ubr, timeout_s=VERIFY_SECONDS)

        print("[INFO] Conteo durante verificación:")
        for k in ("RXM-RAWX", "RXM-SFRBX", "TIM-TM2"):
            print(f"  {k}: {verify_counts.get(k, 0)}")

        if verify_counts.get("RXM-RAWX", 0) < MIN_RAWX_PER_VERIFY:
            raise RuntimeError(
                "No se detectó RXM-RAWX en la verificación. No se inicia la grabación porque convbin generará un OBS vacío."
            )

        if verify_counts.get("RXM-SFRBX", 0) < MIN_SFRBX_PER_VERIFY:
            raise RuntimeError(
                "No se detectó RXM-SFRBX en la verificación. No se inicia la grabación porque el RINEX puede salir incompleto."
            )

        if verify_counts.get("TIM-TM2", 0) < MIN_TM2_PER_VERIFY:
            print("[WARN] Muy pocos TIM-TM2 durante la verificación.")
```

Almacenamiento de los datos cada día. En la Figura 36 se presenta un aparte del código para la creación de archivos y almacenamiento diario de los datos.

Figura 36.

Creación de los archivos para cada día.

```python
def run_single_measurement_day() -> None:

    OUT_DIR.mkdir(parents=True, exist_ok=True)

    local_now = current_local_dt()
    utc_day_start = get_measurement_utc_day_start_from_local(local_now)
    local_start = get_measurement_local_start(utc_day_start)
    local_stop = get_measurement_local_stop(utc_day_start)
    mjd = mjd_from_utc_date(utc_day_start)
    stem = build_file_stem_for_utc_day(utc_day_start)

    ubx_path = OUT_DIR / f"{stem}.ubx"
    csv_path = OUT_DIR / f"{stem}_tm2.csv" if WRITE_TM2_CSV else None
    csv_NAVpath = OUT_DIR / f"{stem}_NAV.csv"

    counts: Dict[str, int] = {}
    csv_file = None
    csv_writer = None

    print("\n============================================================")
    print("[INFO] Iniciando día de medición")
    print(f"[INFO] Día UTC de medición : {utc_day_start.strftime('%Y-%m-%d')}")
    print(f"[INFO] MJD                 : {mjd}")
    print(f"[INFO] Inicio local        : {local_start.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S %z')}")
    print(f"[INFO] Fin local           : {local_stop.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S %z')}")
    print(f"[INFO] Archivo UBX         : {ubx_path}")
    if csv_path is not None:
        print(f"[INFO] Archivo TM2 CSV     : {csv_path}")
```

Conversión a formato RINEX (observaciones y navegación) mediante RTKLIB convbin.

Figura 37.

Conversión archivo (.ubx) a RINEX.

```python
def ubx_to_rinex(convbin_exe: Path, ubx_path: Path, out_dir: Path, rinex_ver: str) -> Tuple[Path, Path]:
    out_dir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
    stem = ubx_path.stem

    obs = out_dir / f"{stem}.obs"
    nav = out_dir / f"{stem}.nav"

    if not ubx_path.exists():
        raise FileNotFoundError(f"No existe el archivo UBX: {ubx_path}")

    if ubx_path.stat().st_size == 0:
        raise RuntimeError(f"El archivo UBX está vacío: {ubx_path}")

    cmd = [
        str(CONVBIN_EXE),
        "-r", "ubx",
        "-v", rinex_ver,
        "-f", "2",
        "-od", "-os", "-oi", "-ot",
        "-o", str(obs),
        "-n", str(nav),
        "-g", "NUL",
        "-q", "NUL",
        "-l", "NUL",
        str(ubx_path),
    ]
```

Registro de eventos de señal externa 1 PPS (TIM-TM2) en formato CSV y de la desviación de oscilador del receptor (NAV-CLOCK) en formato CSV.

Figura 38.

Registro de los datos TIM-TM2 y NAV-CLOCK.

```
if not os.path.exists(csv_path):
    csv_file = open(csv_path, "w", newline="", encoding="utf-8")
    csv_NAVfile = open(csv_NAVpath, "w", newline="", encoding="utf-8")
    csv_writer = csv.DictWriter(
        csv_file,
        fieldnames=[
            "count", "ch", "week",
            "towMsR", "towSubMsR", "tow_s_rising", "offset_ns",
            "accEst", "timeBase", "utc",
            "newRisingEdge", "newFallingEdge",
            "wnF", "towMsF", "towSubMsF"
        ],
    )
    writer = csv.DictWriter(
        csv_NAVfile,
        fieldnames=[
            "iTOW_ms",
            "clkB_ns",
            "clkD_ns_s",
            "tAcc_ns",
            "fAcc_ps_s",
        ],
    )
    csv_writer.writeheader()
    writer.writeheader()
```

Validación de integridad de los datos, se presenta en la Figura 39.

Figura 39.

Revisión de completitud de los datos.

```
def print_final_interpretation(counts: Dict[str, int]) -> None:
    tm2 = counts.get("TIM-TM2", 0)
    rawx = counts.get("RXM-RAWX", 0)
    sfrbx = counts.get("RXM-SFRBX", 0)

    print("\n===== RESUMEN =====")
    print(f"TIM-TM2    : {tm2}")
    print(f"RXM-RAWX   : {rawx}")
    print(f"RXM-SFRBX  : {sfrbx}")

    if tm2 > 0:
        print("Conclusión: el archivo UBX sí contiene timestamps TM2 del PPS externo en EXTINT.")
    else:
        print("Conclusión: no se detectaron eventos TM2. Revisa EXTINT/TimeMark/PPS externo.")

    if rawx > 0 and sfrbx > 0:
        print("Conclusión: el UBX contiene observaciones y navegación necesarias para generar RINEX.")
    else:
        print("Conclusión: faltan RAWX o SFRBX; el RINEX puede salir incompleto o vacío.")
```

Todo el proceso está diseñado para operar de manera automática y continua, segmentando la adquisición en intervalos equivalentes a días UTC completos. Esto garantiza que cada archivo generado corresponda exactamente a un día UTC completo, facilitando su uso en este tipo de aplicación. Cada conjunto de datos generado se identifica mediante el Modified Julian Date (MJD) correspondiente al día UTC de medición.

Cuando se finaliza la adquisición, el archivo UBX se convierte a formato RINEX específicamente a la versión 3.04 utilizando la herramienta convbin en la cual se seleccionan los tipos de observables a exportar, para este caso se generan archivos de observación y navegación, el software también realiza una validación del archivo RINEX generado. Este paso permite la interoperabilidad con herramientas de procesamiento GNSS como R2CGGTTS (Observatoire Royal de Belgique, 2018), un software especializado para tratar los archivos RINEX y convertirlos a formato CGGTTS, el cual es de uso permitido únicamente por los institutos nacionales de metrología.

4.4. SOFTWARE PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Se desarrolló un software para el procesamiento de datos en Python. Esta herramienta permite leer los archivos generados por el software de adquisición, automatiza las correcciones de los pseudorange por época en los archivos RINEX de observación haciendo uso de rutinas de cálculo.

El software implementa el siguiente flujo:

Lectura de los datos de señal externa (1 PPS)

Figura 40.

Lectura de los datos TIM-TM2.

```python
def read_tm2_csv(path: Path) -> List[TM2Sample]:
    samples: List[TM2Sample] = []

    with open(path, "r", encoding="utf-8", newline="") as f:
        reader = csv.DictReader(f)
        for row in reader:
            week = row.get("week")
            tow_ms_r = row.get("towMsR")
            tow_sub_ms_r = row.get("towSubMsR")

            if not week or not tow_ms_r or not tow_sub_ms_r:
                continue

            try:
                gps_week = int(float(week))
                tow_ms = float(tow_ms_r)
                tow_sub_ns = float(tow_sub_ms_r)
            except Exception:
                continue

            tow_s = tow_ms / 1000.0 + tow_sub_ns * 1e-9
            offset_s = compute_tm2_offset_seconds(tow_ms, tow_sub_ns)
            dt = gpsweek_tow_to_datetime(gps_week, tow_s)
            tow_sub_s = tow_sub_ns * 1e-9

            samples.append(TM2Sample(
                gps_week=gps_week,
                tow_s=tow_s,
                offset_s=offset_s,
                dt=dt,
                tow_sub_s=tow_sub_s
            ))
```

Lectura de los datos del desfase acumulado del oscilador del receptor.

Figura 41.

Lectura de los datos NAV-CLOCK.

```python
def read_nav_clock_csv(path: Path, rinex_day_dt: datetime) -> List[NavClockSample]:
    samples: List[NavClockSample] = []
    day0 = rinex_day_dt.replace(hour=0, minute=0, second=0, microsecond=0)

    with open(path, "r", encoding="utf-8", newline="") as f:
        reader = csv.DictReader(f)
        for row in reader:
            iTOW_ms = row.get("iTOW_ms")
            clkB_ns = row.get("clkB_ns")

            if not iTOW_ms or not clkB_ns:
                continue

            try:
                itow_ms = float(iTOW_ms)
                clkb_ns = float(clkB_ns)
            except Exception:
                continue

            sod = (itow_ms / 1000.0) % 86400.0
            dt = day0 + timedelta(seconds=sod)

            samples.append(NavClockSample(
                iTOW_ms=itow_ms,
                clkB_ns=clkb_ns,
                dt=dt,
            ))
```

Calcula el valor más cercano a la época en los archivos *TIM-TM2* y *NAV-CLOCK* con respecto a la época en el archivo RINEX (.obs).

Figura 42.

Cálculo para encontrar las épocas que coinciden para los tres archivos.

```python
def nearest_nav_clock_clkB_ns(samples: List[NavClockSample], epoch_dt: datetime) -> Optional[float]:
    if not samples:
        return None
    nearest = min(samples, key=lambda s: abs((s.dt - epoch_dt).total_seconds()))
    return nearest.clkB_ns
```

```python
def average_tm2_for_epoch(samples: List[TM2Sample], epoch_dt: datetime, half_window_s: float) -> Tuple[Optional[float], int]:
    k_td = 1
    while True:
        t0 = epoch_dt - k_td * timedelta(seconds=half_window_s)
        t1 = epoch_dt + k_td * timedelta(seconds=half_window_s)
        selected = [s.tow_sub_s for s in samples if t0 <= s.dt < t1]
        if not selected:
            k_td+=2
        else:
            break

    return sum(selected) / len(selected), len(selected)
```

Cálculo para el ajuste del pseudorange por época de acuerdo con los datos de *TIM-TM2* y *NAV-CLOCK.*

Figura 43.

Cálculo del ajuste para el pseudorange por época con TIM-TM2 y *NAV-CLOCK*

```
for epoch in epochs:
    out_lines.append(epoch.header_line)

    avg_offset_s, n_used = average_tm2_for_epoch(tm2_samples, epoch.dt, half_window)
    nearest_dt_s = nearest_tm2_distance_seconds(tm2_samples, epoch.dt)
    clkB_ns = nearest_nav_clock_clkB_ns(nav_clock_samples, epoch.dt)

    corrected = False
    if avg_offset_s is not None:
        corrected = True
        matched_epochs += 1
    else:
        unmatched_epochs += 1

    clkB_s = (clkB_ns * 1e-9) if clkB_ns is not None else 0.0
    if clkB_s>=0.001:
        clkB_s = clkB_s + 0.001 * k
        k += 1
    else:
        clkB_s = clkB_s + 0.001 * k

    tm2_corr_m = C_MPS * avg_offset_s if avg_offset_s is not None else 0.0
    nav_clock_corr_m = C_MPS * clkB_s
    range_corr_m = tm2_corr_m + nav_clock_corr_m
```

Cálculo para el ajuste del pseudorange debido a saltos del clock reset del receptor.

Figura 44.

Cálculo del pseudorange por época correspondiente al clock reset

```
if count >= 1:
    for item in array_ps:
        for item_prev in array_ps_prev:
            if item[0]==item_prev[0]:
                diff = item_prev[1] - item[1]
if diff >= 0.001*C_MPS:
    tC_ms = (diff / C_MPS)*1000
    kC = kC + round(tC_ms)*C_MPS/1000
    range_corr_m = range_corr_m - kC
else:
    range_corr_m = range_corr_m - kC
```

Ajuste del pseudorange debido las correcciones calculadas anteriormente.

Figura 45.

Ajuste del pseudorange por época de todas las correcciones.

```python
def correct_sat_line_gps(
    sat_line: str,
    obs_types: List[str],
    range_corr_m: float,
    correct_phase: bool,
) -> str:
    sat, fields = split_sat_line_into_fields(sat_line, len(obs_types))
    out_fields: List[str] = []

    for obs_code, field in zip(obs_types, fields):
        value, lli, snr = parse_obs_field(field)

        new_value = value

        if obs_code.startswith("C"):
            new_value = value - range_corr_m
            value_ps=value

        elif correct_phase and obs_code.startswith("L"):
            lam = gps_wavelength_m(obs_code)
            if value is None:
                value=value_ps/lam
            new_value = value - (range_corr_m / lam)

        out_fields.append(format_obs_field(new_value, lli, snr))

    return sat + "".join(out_fields) + "\n"
```

Generación del archivo RINEX de observaciones corregido.

Figura 46.

Corrección del archivo RINEX para cada satélite.

```python
        for sat_line in epoch.sat_lines:
            sys_code = sat_line[:1]
            if sys_code != "G":
                out_lines.append(sat_line)
                continue

            corrected_line = correct_sat_line_gps(
                sat_line=sat_line,
                obs_types=gps_obs_types,
                range_corr_m=range_corr_m,
                correct_phase=correct_phase,
            )

            out_lines.append(corrected_line)

        count += 1

out_path.write_text("".join(out_lines), encoding="utf-8")
```

Por otra parte, para realizar los cálculos y ajustes requeridos en el modelo matemático presentado en la ecuación *Ec.4*, existe una herramienta de procesamiento de archivos RINEX llamada R2CGGTTS desarrollada por el (Observatoire Royal de Belgique, 2018), este software especializado calcula las posiciones, correcciones y retrasos. Para esto, se ingresa el archivo (.obs) ajustado de acuerdo con el procedimiento presentado en la Figura 18 y el archivo (.nav) original.

Además, tiene la capacidad de incluir las correcciones asociadas a la ecuación *Ec.9* a partir de un archivo de parámetros que se ingresa con los datos del receptor. Luego utiliza los archivos Rinex y el archivo de parámetros para realizar los cálculos y generar el formato CGGTTS con el cual se puede ejecutar la técnica de Common-View.

Como cierre de esta fase, la implementación del prototipo permitió materializar el diseño propuesto mediante la integración efectiva de los componentes de hardware y el desarrollo del software de adquisición y procesamiento de datos. El ensamblaje del sistema, la configuración del receptor GNSS y la puesta en marcha de los algoritmos desarrollados evidencian la coherencia entre los requerimientos definidos y la solución implementada, garantizando la captura de datos en formatos adecuados y su transformación en resultados de medición consistentes. De esta manera, se dispone de un sistema operativo funcional para continuar con la fase de validación, ajuste de parámetros y evaluación de resultados para determinar el desempeño metrológico del prototipo, las cuales se presentan en el capítulo siguiente.

5. AJUSTE DE PARÁMETROS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MEDICIÓN

Para la evaluación del sistema de medición se consideraron procesos de validación del software desarrollado, validación del método de medición Common-View y ajuste de parámetros operativos del prototipo, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos. En este contexto, la validación del método se realizó teniendo en cuenta unos requisitos establecidos, así como la necesidad de verificar la compatibilidad de los resultados del sistema prototipo con los obtenidos mediante el sistema de referencia NIST TAI-1, ambos conectados al mismo oscilador UTC(INM). Para comprobar el cumplimiento de estos requisitos, se aplicaron herramientas estadísticas que incluyeron el cálculo del error de medición, la estimación de la incertidumbre tipo A y la incertidumbre expandida, así como la evaluación de la compatibilidad mediante el error normalizado $E_n$conforme a la ISO 13528:2022. Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación entre los resultados del prototipo y del sistema de referencia, con el fin de verificar la consistencia del comportamiento temporal entre ambos sistemas.

5.1. VALIDACIÓN DE SOFTWARE

5.1.1. Validación del software de adquisición de datos

La validación consiste en tomar una muestra de datos para cada uno de los archivos que se generan y compararlos con el archivo fuente (.ubx) para constatar que se están guardando los datos adecuadamente. Haciendo uso del software u-center, se realizó la validación del software de adquisición de datos desarrollado, el proceso consiste en verificar que los datos almacenados en el archivo (.ubx) sean los mismos que se exportan en otras extensiones (.obs, .nav y .csv). Para esta validación, se utilizaron los archivos correspondientes a la fecha juliana modificada MJD 61138.

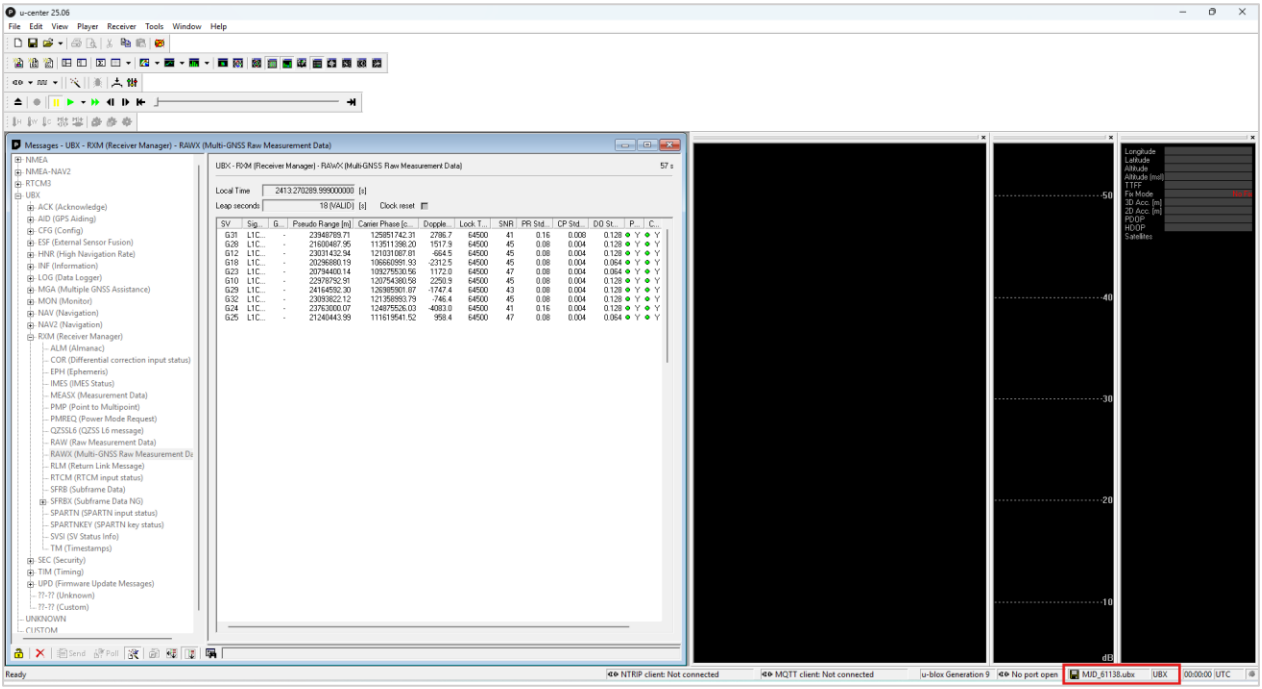
- Archivo UBX (.ubx):

Contiene todos los mensajes aplicados al receptor, por tanto, en esta validación se revisa la adquisición de observaciones cada segundo y que corresponda al almacenamiento en formato binario UBX, para esto se toma el archivo generado y se abre con el software u-center.

En la figura 47 se puede observar que se ha cargado el archivo correctamente, en la parte baja a la derecha se observa que los datos corresponden al archivo MJD 61138.ubx.

Figura 47.

Archivo MJD 61138 cargado en el programa u-center.



A continuación, en las figuras 48 a la 51 se muestra que para cada uno de los mensajes (*UBX-RXM-RAWX, UBX-RXM-SFRBX, UBX-TIM-TM2 y UBX-NAV-CLOCK*), el archivo (.ubx) contenga los datos correspondientes:

Figura 48.

Mensaje UBX-RXM-RAWX en el archivo MJD 61138.ubx

UBX - RXM (Receiver Manager) - RAWX (Multi-GNSS Raw Measurement Data)

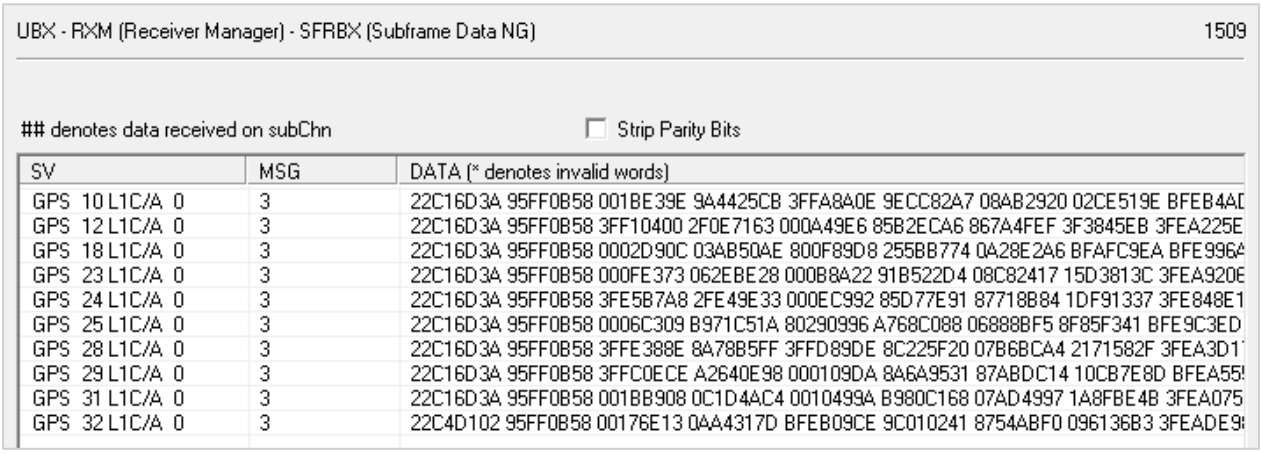
Local Time 2413:270289.999000000 [s]

Leap seconds 18 (VALID) [s] Clock reset

SV	Sig...	G...	Pseudo Range [m]	Carrier Phase [c...	Dopple...	Lock T...	SNR	PR Std...	CP Std...	DO St...	P...	C...
G31	L1C...	-	23948789.71	125851742.31	2786.7	64500	41	0.16	0.008	0.128	Y	Y
G28	L1C...	-	21600487.95	113511398.20	1517.9	64500	45	0.08	0.004	0.128	Y	Y
G12	L1C...	-	23031432.94	121031087.81	-664.5	64500	45	0.08	0.004	0.128	Y	Y
G18	L1C...	-	20296880.19	106660991.93	-2312.5	64500	45	0.08	0.004	0.064	Y	Y
G23	L1C...	-	20794400.14	109275530.56	1172.0	64500	47	0.08	0.004	0.064	Y	Y
G10	L1C...	-	22978792.91	120754380.58	2250.9	64500	45	0.08	0.004	0.128	Y	Y
G29	L1C...	-	24164592.30	126985901.87	-1747.4	64500	43	0.08	0.004	0.128	Y	Y
G32	L1C...	-	23093822.12	121358993.79	-746.4	64500	45	0.08	0.004	0.128	Y	Y
G24	L1C...	-	23763000.07	124875526.03	-4083.0	64500	41	0.16	0.004	0.128	Y	Y
G25	L1C...	-	21240443.99	111619541.52	958.4	64500	47	0.08	0.004	0.064	Y	Y

Figura 49.

Mensaje UBX-RXM-SFRBX en el archivo MJD 61138.ubx



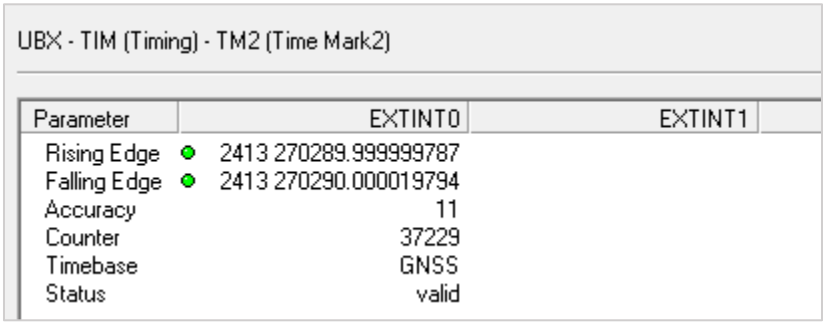
UBX - RXM (Receiver Manager) - SFRBX (Subframe Data NG) 1509

denotes data received on subChn ☐ Strip Parity Bits

SV	MSG	DATA (* denotes invalid words)
GPS 10 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 001BE39E 9A4425CB 3FFA8A0E 9ECC82A7 08AB2920 02CE519E BFEB4A[
GPS 12 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 3FF10400 2F0E7163 000A49E6 85B2ECA6 867A4FEF 3F3845EB 3FEA225E
GPS 18 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 0002D90C 03AB50AE 800F89D8 255BB774 0A28E2A6 BFAFC9EA BFE996A
GPS 23 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 000FE373 062EBE28 000B8A22 91B522D4 08C82417 15D3813C 3FEA920E
GPS 24 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 3FE5B7A8 2FE49E33 000EC992 85D77E91 87718B84 1DF91337 3FE848E1
GPS 25 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 0006C309 B971C51A 80290996 A768C088 06888BF5 8F85F341 BFE9C3ED
GPS 28 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 3FFE388E 8A78B5FF 3FFD89DE 8C225F20 07B6BCA4 2171582F 3FEA3D1[
GPS 29 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 3FFC0ECE A2640E98 000109DA 8A6A9531 87ABDC14 10CB7E8D BFEA55[
GPS 31 L1C/A 0	3	22C16D3A 95FF0B58 001BB908 0C1D4AC4 0010499A B980C168 07AD4997 1A8FBE4B 3FEA075
GPS 32 L1C/A 0	3	22C4D102 95FF0B58 00176E13 0AA4317D BFEB09CE 9C010241 8754ABF0 096136B3 3FEADE9[

Figura 50.

Mensaje UBX-TIM-TM2 en el archivo MJD 61138.ubx

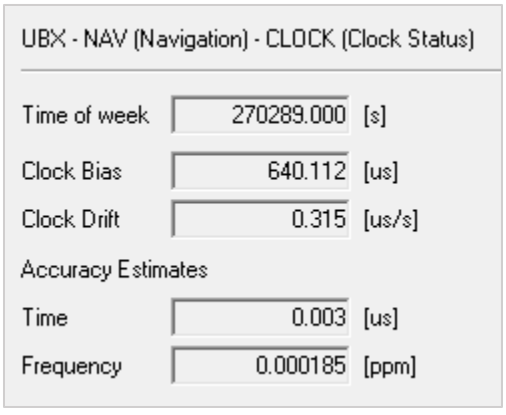


UBX - TIM (Timing) - TM2 (Time Mark2)

Parameter	EXTINT0	EXTINT1
Rising Edge	2413 270289.999999787	
Falling Edge	2413 270290.000019794	
Accuracy	11	
Counter	37229	
Timebase	GNSS	
Status	valid	

Figura 51.

Mensaje UBX-NAV-CLOCK en el archivo MJD 61138.ubx



UBX - NAV (Navigation) - CLOCK (Clock Status)

Time of week	270289.000	[s]
Clock Bias	640.112	[us]
Clock Drift	0.315	[us/s]
Accuracy Estimates		
Time	0.003	[us]
Frequency	0.000185	[ppm]

De acuerdo con lo observado en las figuras se puede evidenciar que los mensajes se grabaron adecuadamente en el archivo binario (.ubx). Por lo cual se puede decir que se valida la captura y adquisición de datos en dicho archivo.

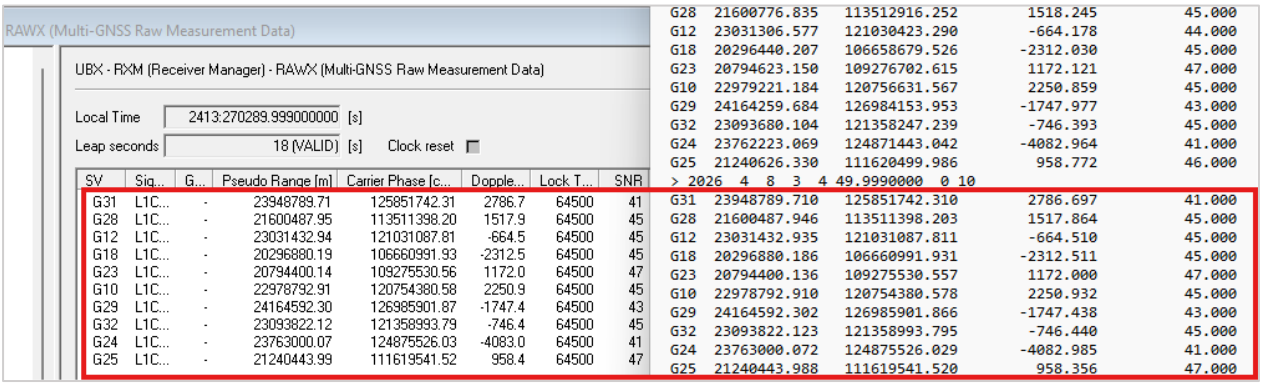
- Archivos Rinex (.obs y .nav)

Estos archivos son generados a partir del uso de la librería RTKLIB y su herramienta convbin. que permite la conversión del formato binario (.ubx) a formato RINEX (observaciones y navegación). Para esto se usan los mensajes *UBX-RXM-RAWX* y *UBX-RXM-SFRBX* respectivamente.

En la figura 52 se presenta la comparación de los datos del archivo (.ubx) del lado izquierdo, con los del archivo (.obs) del lado derecho en un instante de tiempo determinado. Se puede evidenciar que presentan los mismos datos, con unas diferencias en los dígitos decimales porque en el programa u-center no es posible tener la visualización completa, sin embargo, se puede apreciar que el programa realiza un redondeo y este corresponde al valor redondeado del (.obs).

Figura 52.

Archivo MJD 61138 cargado en el programa u-center vs archivo (.obs) generado



Para el caso del archivo (.nav) que se crea a partir del mensaje *UBX-RXM-SFRBX*, como se pudo apreciar en la figura 49 este mensaje se encuentra codificado, por lo cual no es evidente la comparación entre los datos de los archivos. Sin embargo, se considera que la herramienta RTKLIB es altamente confiable ya que es usada ampliamente, por tanto, para este caso únicamente se valida que se genere el archivo (.nav) como se observa en la figura 53.

Figura 53.

Archivo (.nav) para MJD 61138 generado por RTKLIB

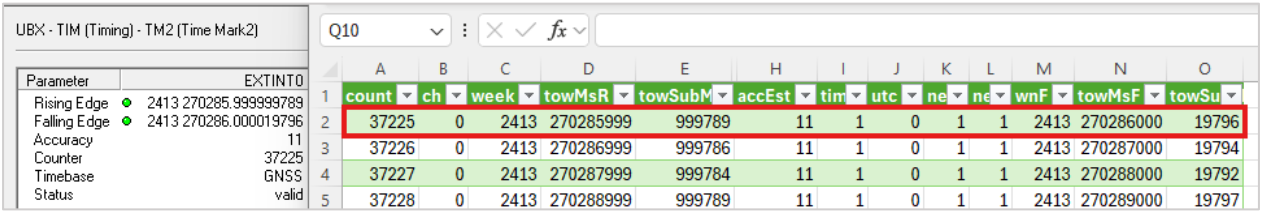
```
     3.04           N: GNSS NAV DATA    M: Mixed            RINEX VERSION / TYPE
CONVBIN 2.4.2                           20260408 235902 UTC PGM / RUN BY / DATE
log: C:\Users\Claudia Rodriguez\Documents\Medición remota\R2COMMENT
format: u-blox                                              COMMENT
GPSA   1.6764E-08  1.4901E-08 -1.1921E-07 -5.9605E-08       IONOSPHERIC CORR
GPSB   1.0854E+05  3.2768E+04 -2.6214E+05 -6.5536E+04       IONOSPHERIC CORR
GAL    0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00       IONOSPHERIC CORR
QZSA   0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00       IONOSPHERIC CORR
QZSB   0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00       IONOSPHERIC CORR
GPUT  5.5879354477E-09 1.154631946E-14 503808 2413          TIME SYSTEM CORR
GAUT  0.0000000000E+00 0.000000000E+00      0    0          TIME SYSTEM CORR
QZUT  0.0000000000E+00 0.000000000E+00      0    0          TIME SYSTEM CORR
BDUT  0.0000000000E+00 0.000000000E+00      0    0          TIME SYSTEM CORR
                                                            END OF HEADER
G18 2026  4  8  4  0  0 -.382137019187E-03  .943600753089E-11  .000000000000E+00
      .123000000000E+03  .230625000000E+02  .426232039990E-08  .562233006461E+00
      .120699405670E-05  .582545518409E-02  .312738120556E-05  .515363463402E+04
      .273600000000E+06  .204890966415E-07  .245577638007E+01  .115483999252E-06
      .971530726806E+00  .325093750000E+03 -.287173219462E+01 -.819676999980E-08
      .425017703693E-10  .100000000000E+01  .241300000000E+04  .000000000000E+00
      .240000000000E+01  .000000000000E+00 -.838190317154E-08  .891000000000E+03
      .270306000000E+06  .400000000000E+01
G23 2026  4  8  4  0  0  .633591320366E-03  .443378667114E-11  .000000000000E+00
      .100000000000E+03 -.727812500000E+02  .387587573150E-08 -.596967090898E+00
     -.367686152458E-05  .609630357940E-02  .583194196224E-05  .515371205711E+04
      .273600000000E+06  .117346644402E-06 -.282015365742E+01  .856816768646E-07
      .988538469029E+00  .281000000000E+03 -.274052333396E+01 -.783746931920E-08
      .617882880159E-10  .100000000000E+01  .241300000000E+04  .000000000000E+00
      .240000000000E+01  .000000000000E+00 -.884756445885E-08  .100000000000E+03
      .270306000000E+06  .400000000000E+01
G25 2026  4  8  4  0  0  .431634951383E-03 -.272848410532E-11  .000000000000E+00
      .390000000000E+02  .232500000000E+02  .484270171796E-08 -.103307750734E+01
      .126101076603E-05  .128951749066E-01  .849738717079E-05  .515370874214E+04
      .273600000000E+06  .502914190292E-07  .316553967458E+00  .305473804474E-06
      .947773553087E+00  .209062500000E+03  .115950664160E+01 -.813212444991E-08
     -.431446542909E-09  .100000000000E+01  .241300000000E+04  .000000000000E+00
      .240000000000E+01  .000000000000E+00  .558793544769E-08  .390000000000E+02
      .270306000000E+06  .400000000000E+01
```

- Archivos CSV

Se genera un primer archivo con el registro de eventos de señal externa que corresponde al mensaje *UBX-TIM-TM2*. En la figura 54 se presenta la comparación de los datos del archivo (.ubx) del lado izquierdo y los datos en el archivo (.csv) del lado derecho, permitiendo evidenciar la correspondencia de los datos para el contador (count) en el valor de 37225. Donde el dato Rising Edge corresponde a las columnas C, D y E y el dato Falling Edge corresponde a las columnas M,N y O del archivo TM2.csv. Por lo cual se puede decir que se valida la relación de los datos en dicho archivo.

Figura 54.

Archivo MJD 61138 cargado en el programa u-center vs archivo (TM2.csv) generado



UBX - TIM (Timing) - TM2 (Time Mark2)

Parameter	EXTINT0
Rising Edge	2413 270285.999999789
Falling Edge	2413 270286.000019796
Accuracy	11
Counter	37225
Timebase	GNSS
Status	valid

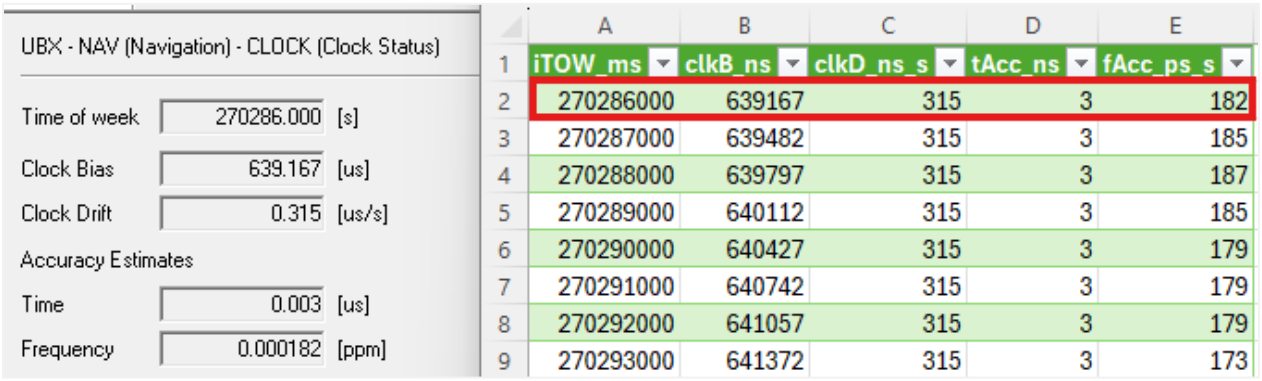
Q10

	A	B	C	D	E	H	I	J	K	L	M	N	O
1	count	ch	week	towMsR	towSubM	accEst	tim	utc	ne	ne	wnF	towMsF	towSu
2	37225	0	2413	270285999	999789	11	1	0	1	1	2413	270286000	19796
3	37226	0	2413	270286999	999786	11	1	0	1	1	2413	270287000	19794
4	37227	0	2413	270287999	999784	11	1	0	1	1	2413	270288000	19792
5	37228	0	2413	270288999	999789	11	1	0	1	1	2413	270289000	19797

Luego se genera el archivo para el registro de eventos de la desviación de oscilador del receptor que corresponde al mensaje *UBX-NAV-CLOCK*. En la figura 55 se presenta la comparación de los datos del archivo (.ubx) del lado izquierdo y los datos en el archivo (.csv) del lado derecho, permitiendo evidenciar que los datos se guardan adecuadamente ya que cada una de las filas del mensaje corresponde a cada columna del archivo (.csv) en las unidades que aparecen en el encabezado. Dado lo anterior, se valida la equivalencia de los datos de dichos archivos.

Figura 55.

Archivo MJD 61138 cargado en el programa u-center vs archivo (NAV.csv) generado



	A	B	C	D	E
1	iTOW_ms	clkB_ns	clkD_ns_s	tAcc_ns	fAcc_ps_s
2	270286000	639167	315	3	182
3	270287000	639482	315	3	185
4	270288000	639797	315	3	187
5	270289000	640112	315	3	185
6	270290000	640427	315	3	179
7	270291000	640742	315	3	179
8	270292000	641057	315	3	179
9	270293000	641372	315	3	173

5.1.2. Validación del software de procesamiento de datos

La validación para este software consiste en tomar los datos de pseudorange de los satélites de la primera época del archivo MJD 61138.obs y compararlos con el archivo corregido para constatar que se están aplicando las correcciones a los datos originales adecuadamente.

Figura 56.

Archivo RINEX MJD 61138.obs para la primera época.

```
> 2026  4  8  3  4 46.9990000  0 10
G31  23950380.759   125860103.475        2787.719          41.000
G28  21601354.970   113515953.962        1519.573          45.000
G12  23031053.944   121029095.605        -663.140          44.000
G18  20295560.535   106654056.446       -2310.795          46.000
G23  20795069.382   109279047.636        1172.935          47.000
G10  22980077.839   120761133.404        2250.993          44.000
G29  24163594.111   126980657.359       -1748.417          43.000
G32  23093395.994   121356754.128        -746.377          45.000
G24  23760669.136   124863277.219       -4082.669          41.000
G25  21240991.486   111622417.996         959.519          46.000
```

Para G31 se tiene el siguiente valor de pseudorange del archivo original para la época 03:04:46.99, que corresponde al primer valor de la línea G31.

$$P = 23\,950\,380.759\,m$$

Se calcula el valor en unidades de metros para el valor TM2 que está en la unidad de nanosegundos:

$$\delta P = c \times \delta t$$

$$\delta P_{TM2} = (299\,792\,458\ m/s\ ) \times (999\,786\,ns)$$

$$\delta P_{TM2} = (299\,792\,458\ m/s\ ) \times (999\,786\ \times\ 10^{-9}\ s)$$

$$\delta P_{TM2} = 2\,99\,728.302\,m$$

Se calcula el valor en unidades de metros para el valor NAV que está en la unidad de nanosegundos:

$$\delta P_{NAV} = (299\,792\,458\ m/s\ ) \times (639\,482\,ns)$$

$$\delta P_{NAV} = (299\,792\,458\ m/s\ ) \times (639\,482\ \times\ 10^{-9}\ s)$$

$$\delta P_{NAV} = 191\,711.881\,m$$

Se implementó una corrección por el tiempo acumulado de inicio del día del receptor, para este día corresponde a 3 ms.

$$\delta P_{acum} = c \times \delta t$$

$$\delta P_{acum} = (299\,792\,458\ m/s) \times (0.003\ \ s)$$

$$\delta P_{acum} = 899\,377.374\,m$$

Ahora, se calcula la corrección del Pseudorange en el RINEX:

$$P_{corregido} = P_{observado} - (\delta P_{TM2} + \delta P_{NAV}) + \ \delta P_{acum}$$

$$P_{corregido} = 23\,950\,380.759\,m - \ 491\,440.183\,m + \ 899\,377.374\,m$$

$$P_{corregido} = 24\,358\,317.95\,m$$

En la Figura 57 se puede observar el archivo corregido, el dato correspondiente al pseudorange del satélite G31 en la época 03:04:46.99 corresponde exactamente al dato hallado a partir de los cálculos mostrados anteriormente, lo que permite constatar que el programa está realizando los cálculos adecuadamente y, por tanto, es apto para su uso.

Figura 57.

Archivo RINEX MJD 61138.obs corregido para la primera época

```
> 2026  4  8  3  4 46.9990000  0 10
G31  24358317.950  128003827.882       2787.719          41.000
G28  22009292.161  115659678.369       1519.573          45.000
G12  23438991.135  123172820.012       -663.140          44.000
G18  20703497.726  108797780.853      -2310.795          46.000
G23  21203006.573  111422772.043       1172.935          47.000
G10  23388015.030  122904857.811       2250.993          44.000
G29  24571531.302  129124381.766      -1748.417          43.000
G32  23501333.185  123500478.535       -746.377          45.000
G24  24168606.327  127007001.626      -4082.669          41.000
G25  21648928.677  113766142.403        959.519          46.000
```

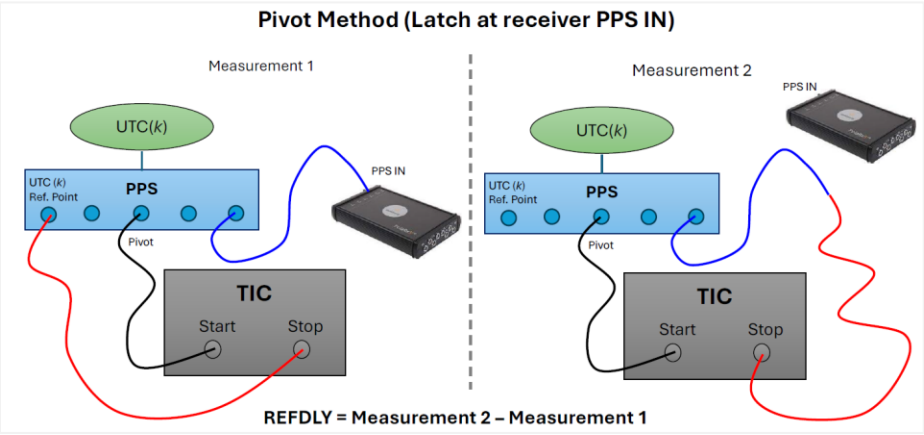
5.2. AJUSTE DE PARÁMETROS

Para ajustar los parámetros correspondientes a las mediciones de los retrasos presentados en la ecuación *Ec. 9* y que no están implementados en el RINEX, el programa R2CGGTTS cuenta con un archivo de parámetros en el cual se deben consignar los valores de estos retrasos para incluirlos dentro del archivo CGGTTS que se genera. A continuación, se presenta el cálculo de dichos parámetros:

REFDLY: Es la diferencia en tiempo entre el oscilador interno del receptor y el oscilador local, Este retraso se calcula usando el método de pivote como se muestra en la Figura 58, para esto se tomaron 10 mediciones para cada uno de los tipos de conexión y se realizó el cálculo de la diferencia entre las mediciones para encontrar el valor del retraso REFDLY, en la tabla 5 se presentan los resultados.

Figura 58.

Método de pivote para la medición de REFDLY



**Tomado de: Live Demonstration 2 CABDLY and REFDLY Measurements. Gutiérrez R. y Ortiz C. 2025*

Tabla 5.

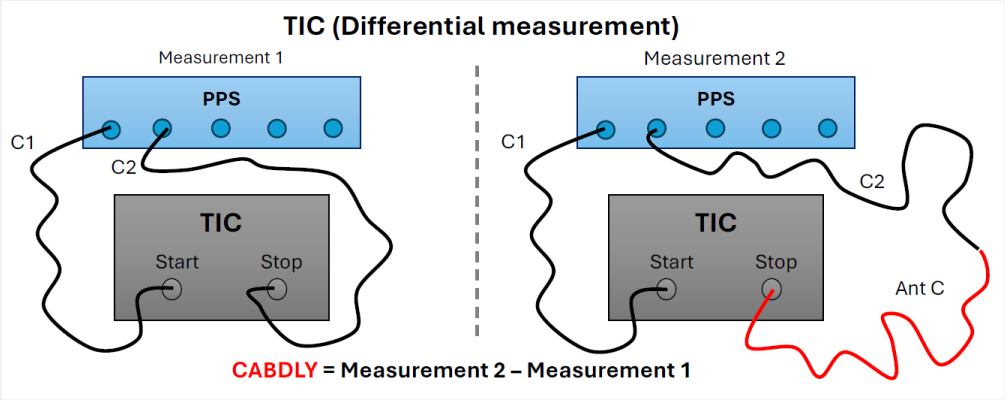
Resultados medición de REFDLY

Promedio Mediciones 1	Promedio Mediciones 2	Resultado REFDLY Mediciones 2 – Mediciones 1
32.291 ns	63.148 ns	30.86 ns

CABDLY: Es el retraso de grupo de señal dentro del cable de antena, incluyendo ambos conectores de extremo. Se utiliza el método de medición diferencial que se muestra en la Figura 59. Para esto se tomaron 10 mediciones para cada uno de los tipos de conexión y se realizó el cálculo de la diferencia entre las mediciones para encontrar el valor del retraso CABDLY.

Figura 59.

Método de medición diferencial para la medición de CABDLY



**Tomado de: Live Demonstration 2 CABDLY and REFDLY Measurements. Gutiérrez R. y Ortiz C. 2025*

Tabla 6.

Resultados medición de CABDLY

Promedio Mediciones 1	Promedio Mediciones 2	Resultado CABDLY Mediciones 2 – Mediciones 1
32.291	139.809	172.1 ns

INTDLY: Es el retraso combinado de la señal GNSS dentro de la antena y el receptor, este debe determinarse mediante una campaña de calibración. En este caso, no es posible generar la campaña de calibración por todo lo que implica, razón por la cual fue necesario establecer una manera alternativa que permita hallar esta componente.

El laboratorio cuenta con un sistema de medición NIST TAI-1 calibrado con el cual se mide actualmente UTC(INM)-GPS que corresponde a la columna REFGPS, en la Figura 60 se presenta

el formato CGGTTS que genera este sistema de medición. Es importante mencionar que ambos sistemas se encuentran conectados a la referencia UTC(INM).

Figura 60.

CGGTTS del sistema de medición NIST TAI-1 para el MJD 61138

```
GGTTS GPS DATA FORMAT VERSION = 01
REV DATE = 2025-11-06
RCVR = NIST TAI-1 Time Transfer Receiver TAI-103
CH = 12
IMS = 99999
LAB = INM
X =  1743180.352 m
Y = -6116396.744 m
Z =   513046.768 m
FRAME = WGS84
COMMENTS = Lab Code - 10080, UTC Code - 0010080
COMMENTS = CAL_ID=1012-2023
INT DLY = 45.2
CAB DLY = 176.6
REF DLY = 60.6
REF = UTC(INM)
CKSUM = C5

PRN CL  MJD  STTIME TRKL ELV AZTH   REFSV      SRSV     REFGPS    SRGPS  DSG IOE MDTR SMDT MDIO SMDI CK
             hhmmss  s  .1dg .1dg    .1ns     .1ps/s     .1ns    .1ps/s .1ns     .1ns.1ps/s.1ns.1ps/s
 05 FF 61138 001400  779 150 0570     2317431     10        614     73   33  16  222    1  258  -23 B2
 11 FF 61138 001400  779 145 1290     3774230   -132        -19     -4   22 159  230   72  270    2 D4
 12 FF 61138 001400  779 150 1596     6084447     27         27     67   23  71  222   -1  287  -27 D1
 15 FF 61138 001400  779 320 0100    -4025088    -53        440     20   18  25  109   18  204    6 BD
 18 FF 61138 001400  779 320 3400     3793883   -103        327     -4   30 122  111  -21  214  -44 FE
 20 FF 61138 001400  779 158 0260    -1013798   -188        334    243   29 146  215   74  268    3 1A
 23 FF 61138 001400  779 140 3204    -6342515    -37        218    -84   25  99  234  -20  327  -36 13
 24 FF 61138 001400  779 650 1089      416714   -181        426     44   17  51   65   -1  131  -11 CB
 25 FF 61138 001400  779 150 1972    -4310031      9        189    -29   18  25  227  -24  319  -38 FA
 29 FF 61138 001400  779 540 2334     3422531    -65        522     66   19  68   73    4  154   -3 BC
 32 FF 61138 001400  779 120 2350       44781   -181        375    -31   28 102  283  -96  371  -60 00
```

Por otra parte, la información del sistema de medición prototipo necesaria para los cálculos de posiciones, correcciones y retrasos *(Ec. 4)* se obtiene del archivo RINEX de navegación (*.nav*), mientras que las mediciones de pseudorango se encuentran en el archivo RINEX de observación (*.obs*). Una vez se cuenta con todos los archivos, se ejecuta desde la consola PowerShell el software R2CGGTTS, el cual realiza automáticamente los cálculos correspondientes a las ecuaciones *Ec. 4* y *Ec. 9*, generando como resultado el archivo en formato CGGTTS. En la Figura 61 se presenta el CGGTTS para el sistema de medición prototipo con un valor INTDLY en 0 ns debido a que se desconoce y el cálculo de UTC(INM)-GPS que corresponde a la columna REFSYS.

Figura 61.

CGGTTS del sistema de medición prototipo para el MJD 61138 con INTDLY de 0 ns

```
CGGTTS     GENERIC DATA FORMAT VERSION = 2E
REV DATE = 2019-11-21
RCVR = ZED-F9T                       R2CGGTTS v8.8
CH = 12
IMS = ZED-F9T
LAB = INMUD
X = +1743180.21 m
Y = -6116388.39 m
Z =  +513046.68 m
FRAME = ITRF
COMMENTS = IONO KLOBUCHAR
COMMENTS =           NO COMMENT
COMMENTS = C1P1bias: NO
INT DLY =    0.0 ns (GPS C1 ),      CAL_ID = XXXXXXX
CAB DLY =  172.1 ns
REF DLY =   30.9 ns
REF = UTC(INM2)
CKSUM = 51

SAT CL  MJD  STTIME TRKL ELV AZTH   REFSV      SRSV     REFSYS    SRSYS  DSG IOE MDTR SMDT MDIO SMDI MSIO SMSI ISG FR HC FRC CK
            hhmmss  s  .1dg .1dg    .1ns     .1ps/s     .1ns    .1ps/s .1ns     .1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns
G10 FF 61138 031000  780 314 3508    +5898985    +20         530    +27   24 107  112  -19   86  -10    0    0   0  0  0 L1C DF
G12 FF 61138 031000  780 235  782    +6080818    +61         884    +61   24  72  146   +8  101   +3    0    0   0  0  0 L1C A6
G18 FF 61138 031000  780 559 1841    +3822215    -80         603    +14   31 123   70   +7   58   +5    0    0   0  0  0 L1C A3
G23 FF 61138 031000  780 517  386    -6335199    -72         601    -28   24 100   74   -5   62   -4    0    0   0  0  0 L1C 9E
G25 FF 61138 031000  780 454 1198    -4315762    +21         657     -7   28  39   82   -4   67   -3    0    0   0  0  0 L1C 9B
G28 FF 61138 031000  780 461 2387    +5604924   -108         614    -18   25 181   81   -7   66   -5    0    0   0  0  0 L1C CE
G29 FF 61138 031000  780 111 1573    +3443927   -105         741    -33   37  69  294  +44  132   +5    0    0   0  0  0 L1C E5
G31 FF 61138 031000  780 187 2246    +1568471    -44         741    -21   28 106  181  -52  112  -14    0    0   0  0  0 L1C EC
G32 FF 61138 031000  780 244 3183      +89019   -192         526     +1   26   1  140   +2   99   +1    0    0   0  0  0 L1C 68
```

Entonces, se calculará el promedio de todas las mediciones del día juliano modificado MJD 61138 para cada sistema de medición, las cuales corresponden a las columnas REFGPS para el sistema NIST TAI-1 y REFSYS para el sistema de medición prototipo, se calcula la diferencia entre los sistemas y este valor será tomado como INTDLY para generar el nuevo archivo CGGTTS, los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.

Resultados para calcular diferencia entre sistemas de medición

Promedio A Mediciones NIST TAI-1	Promedio B Mediciones ZED-F9T	Diferencia B-A
30.9796 ns	46.3190 ns	15.34 ns

Como ya se calcularon todos los valores correspondientes a los retrasos, estos se ingresan en el archivo *paramCGGTTS.dat*, como se muestra en la Figura 62.

Figura 62.

Archivo paramCGGTTS.dat

```
REV DATE
2019-11-21
RCVR
ZED-F9T
CH
12
LAB NAME
INMUD
X COORDINATE
1743180.21
Y COORDINATE
-6116388.39
Z COORDINATE
513046.68
COMMENTS
NO COMMENT
REF
UTC(INM2)
CALIBRATION REFERENCE
XXXXXXX
INT DELAY C1 GPS (in ns)
15.3
ANT CAB DELAY (in ns)
172.1
CLOCK CAB DELAY XP+XO (in ns)
30.86
```

En la Figura 63 se presenta el archivo CGGTTS generado para el día juliano modificado MJD 61138, el cálculo de UTC(INM)-GPS que corresponde a la columna REFSYS el cual ya tiene aplicado el valor INTDLY de 15.3 ns.

Figura 63.

CGGTTS del sistema de medición prototipo para el MJD 61138

```
CGGTTS     GENERIC DATA FORMAT VERSION = 2E
REV DATE = 2019-11-21
RCVR = ZED-F9T                       R2CGGTTS v8.8
CH = 12
IMS = ZED-F9T
LAB = INMUD
X = +1743180.21 m
Y = -6116388.39 m
Z =  +513046.68 m
FRAME = ITRF
COMMENTS = IONO KLOBUCHAR
COMMENTS =           NO COMMENT
COMMENTS = C1P1bias: NO
INT DLY =   15.3 ns (GPS C1 ),      CAL_ID = XXXXXXX
CAB DLY =  172.1 ns
REF DLY =   30.9 ns
REF = UTC(INM2)
CKSUM = 6A

SAT CL  MJD  STTIME TRKL ELV AZTH   REFSV      SRSV     REFSYS    SRSYS  DSG IOE MDTR SMDT MDIO SMDI MSIO SMSI ISG FR HC FRC CK
             hhmmss  s  .1dg .1dg    .1ns     .1ps/s     .1ns    .1ps/s .1ns     .1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns
G10 FF 61138 031000  780 314 3508    +5898832    +20         376   +27   24 107  112  -19   86  -10    0    0   0  0  0 L1C DE
G12 FF 61138 031000  780 235  782    +6080665    +61         730   +61   24  72  146   +8  101   +3    0    0   0  0  0 L1C 9C
G18 FF 61138 031000  780 559 1841    +3822061    -80         449   +14   31 123   70   +7   58   +5    0    0   0  0  0 L1C AA
G23 FF 61138 031000  780 517  386    -6335352    -72         447   -28   24 100   74   -5   62   -4    0    0   0  0  0 L1C 9D
G25 FF 61138 031000  780 454 1198    -4315916    +21         504    -7   28  39   82   -4   67   -3    0    0   0  0  0 L1C 93
G28 FF 61138 031000  780 461 2387    +5604771   -108         461   -18   25 181   81   -7   66   -5    0    0   0  0  0 L1C CE
G29 FF 61138 031000  780 111 1573    +3443773   -105         588   -33   37  69  294  +44  132   +5    0    0   0  0  0 L1C ED
G31 FF 61138 031000  780 187 2246    +1568318    -44         587   -21   28 106  181  -52  112  -14    0    0   0  0  0 L1C F4
G32 FF 61138 031000  780 244 3183      +88866   -192         373    +1   26   1  140   +2   99   +1    0    0   0  0  0 L1C 71
```

5.3. VALIDACIÓN DEL MÉTODO COMMON-VIEW

Con el fin de validar que los resultados REFSYS del archivo CGGTTS generado a partir de las mediciones con el prototipo, son consistentes y aptos para el uso previsto, se compara con el resultado REFGPS del archivo CGGTTS propio del sistema de medición NIST TAI-1. Teniendo en cuenta que. tanto el prototipo como el NIST TAI-1 se encuentran conectados al mismo oscilador (UTC(INM)) se espera obtener los mismos resultados.

Esta comparación se realiza utilizando la herramienta *CGGTTS data analyser* (Vattikonda, n.d.), proporcionada por el BIPM para el análisis de datos para el método Common-View.

En las figuras 64 y 65 se presentan los resultados de REFSYS y REFGPS correspondientes a los sistemas de medición, y que para efectos de la validación se denominarán únicamente como REFSYS, que se obtienen a partir de la suma ponderada de las diferencias (UTC(INM) – GPS) de todos los satélites disponibles, con respecto a sus ángulos de elevación.

Al comparar las gráficas, pareciera existir una amplia diferencia entre ambas, sin embargo, se debe tener en cuenta que para el caso del sistema de medición prototipo, el inicio de las mediciones es posterior al del sistema de medición NIST TAI-1, en los recuadros rojos se presenta la época inicial desde la cual se tienen mediciones para ambos sistemas.

Figura 64.

Resultado del sistema de medición prototipo

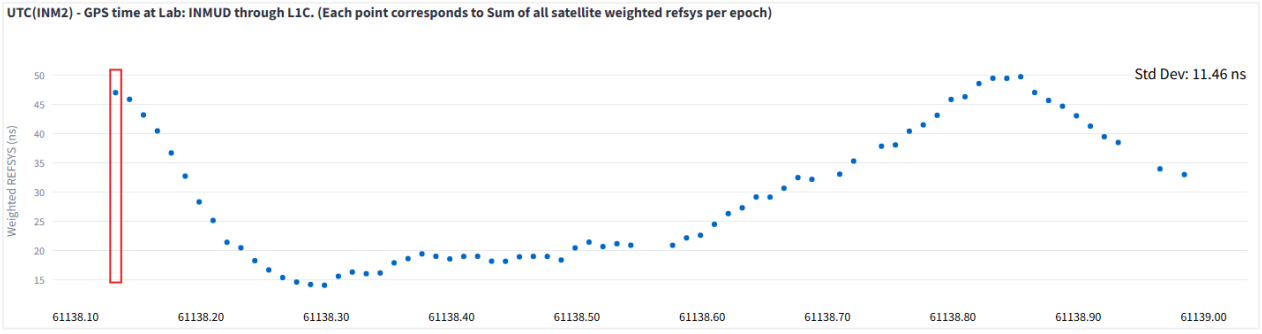
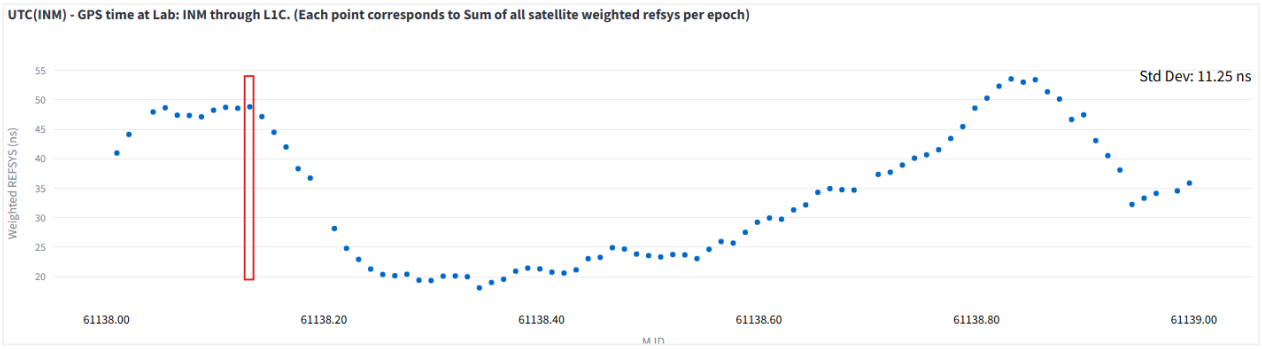


Figura 65.

Resultados del sistema de medición NIST TAI-1



Es posible observar que las gráficas mantienen una tendencia similar. Al detallar los resultados, se evidencia que la desviación estándar para el sistema de medición prototipo tiene un valor de 11.46 ns, mientras que para el sistema NIST TAI-1 la desviación es de 11.25 ns. Esto indica que la dispersión es similar en los dos sistemas.

En la Figura 66 y 67 se presenta la aplicación del método Common-View, donde se grafica el promedio de la diferencia de los resultados de los dos sistemas de medición para cada época.

Figura 66.

Satélites en vista común entre los sistemas de medición prototipo y NIST TAI-1.

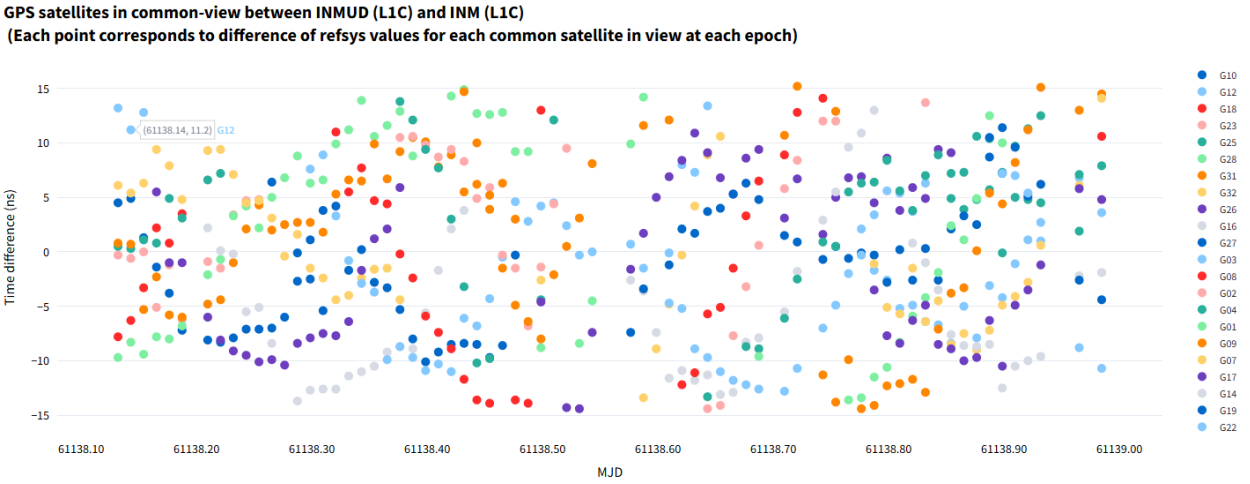
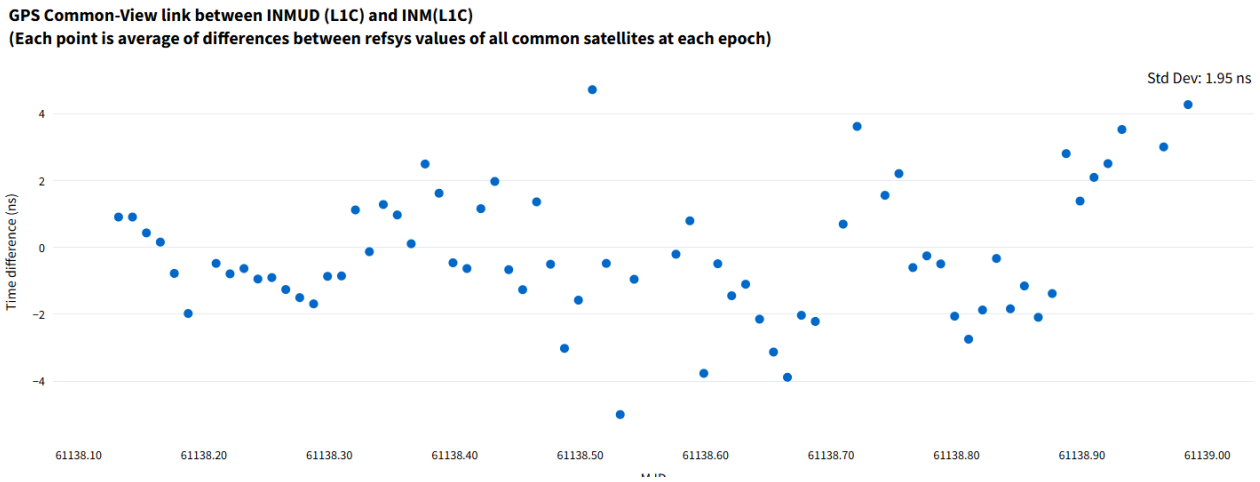


Figura 67.

Common View entre los sistemas de medición prototipo y NIST TAI-1.

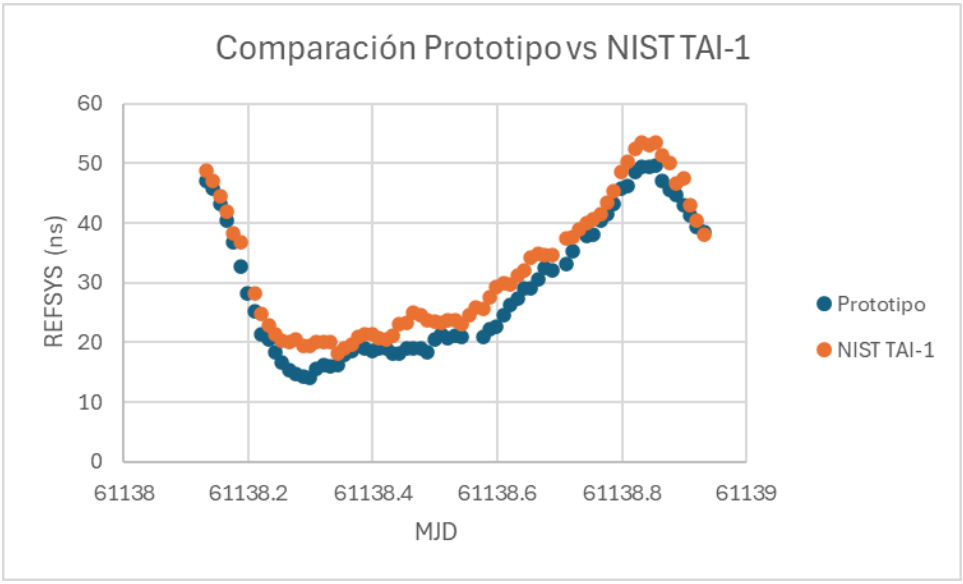


A partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la técnica de Common-View, se observa que la diferencia en tiempo entre los datos generados por ambos sistemas, calculada a partir de la ecuación *Ec.3*, se mantiene dentro de un intervalo comprendido entre −5 ns y 5 ns. Asimismo, la dispersión de los datos presenta una desviación estándar de 1.95 ns, lo cual evidencia un comportamiento estable.

En la Figura 68 se presentan los resultados de REFSYS para ambos sistemas de medición desde la época inicial de medición común. Se puede evidenciar que los valores para cada uno de los sistemas presentan una tendencia similar.

Figura 68.

Comparación de REFSYS para los sistemas de medición prototipo y NIST TAI-1.



Para validar el método de medición, se deben tener en cuenta los siguientes requisitos:

- De acuerdo con (CCTF-WGMRA, 2017), los institutos deben tener como objetivo realizar la escala de tiempo local UTC(k) y debe estar dentro de ±100 ns con respecto a UTC.
- Los resultados del sistema de medición prototipo deben ser compatibles y correlacionados con los resultados del sistema NIST TAI-1, dado que ambos se encuentran conectados al mismo oscilador (UTC(INM)).

Para comprobar que se cumplen los requisitos, se aplicarán unas herramientas estadísticas que permitan validar su uso.

Error de medición:

El error de medición está determinado por:

$$Error = Valor_{medido} - Valor_{referencia} \qquad \textit{Ec. 11}$$

Donde:

$Valor_{medido}$: Promedio de los resultados del sistema de medición prototipo.

$Valor_{referencia}$: Promedio de los resultados del sistema de medición NIST TAI-1.

Entonces, el error calculado corresponde a la diferencia (UTC(prototipo)-UTC(INM)):

$$Error = 29.15\,ns - 32.16\,ns = -3.01\,ns$$

Para calcular la incertidumbre tipo A se aplica la ecuación *Ec.12.*

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \qquad \textit{Ec.12}$$

Donde:

u_A: Incertidumbre tipo A

s: es la desviación estándar muestral

n: es la cantidad de datos

Entonces: $u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{2.25\,ns}{\sqrt{71}} = 0.27\,ns$

Ahora se calcula la incertidumbre expandida *U* de acuerdo con la ecuación *Ec. 13*:

$$U = k * u_A \qquad \textit{Ec.13}$$

Donde:

k: Factor de cobertura

u_A: Incertidumbre tipo A

Para hallar el factor de cobertura k se requieren los grados de libertad ν cuyo cálculo se realiza con la ecuación *Ec.14*:

$$\nu = (n - 1) \qquad \textit{Ec.14}$$

Sabiendo que n es la cantidad de datos, entonces $\nu = (71 - 1) = 70$

Ahora, para hallar k se aplica la función inversa de t-Student para una probabilidad del 95.45 % y 70 grados de libertad, obteniendo $k = 2.04$.

Entonces, la incertidumbre expandida calculada a partir de la ecuación *Ec. 13* es:

$$U = 2.04 * 0.27\ ns = 0.55\ ns$$

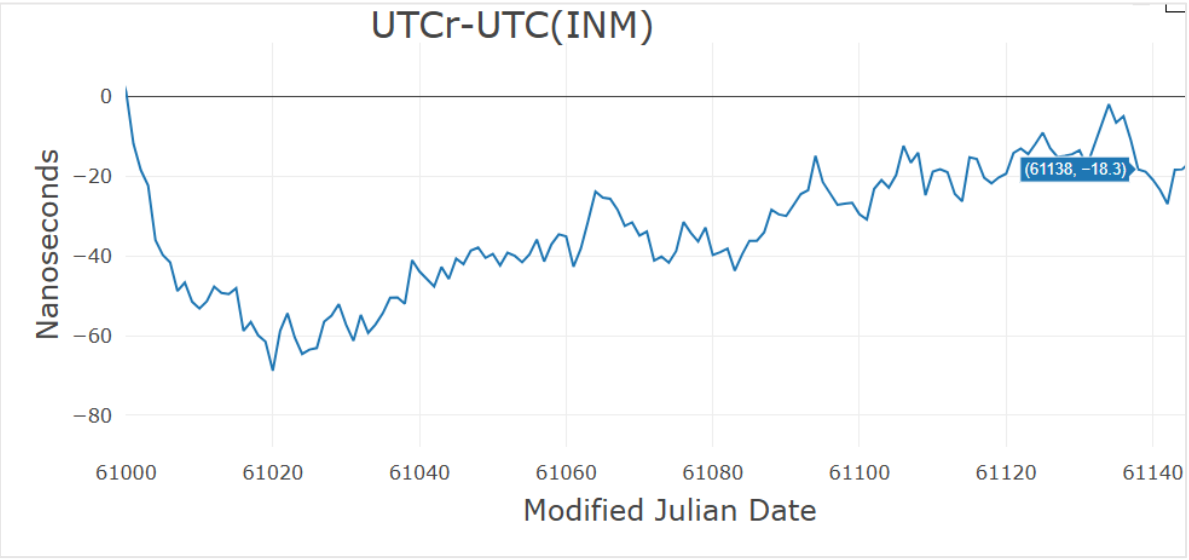
Dado lo anterior, se tiene que el error (UTC(prototipo)-UTC(INM)): es:

$$Error = (-3.01 \pm 0.55)\ ns$$

En la Figura 69 se muestra la comparación con UTC que corresponde a UTCr – UTC(INM) para el día MJD 61138 se tiene que es igual a -18.3 ns.

Figura 69.

Resultados UTCr – UTC(INM) usando el sistema NIST TAI-1.



- *Tomado de: https://webtai.bipm.org/database/canvas.html*

Se tienen los siguientes resultados:

$$UTC(prototipo) - UTC(INM) = -3.01\ ns$$

$$UTCr - UTC(INM) = -18.3\ ns$$

Restando las ecuaciones se tiene que:

$$UTCr - UTC(INM) - (\,UTC(prototipo) - UTC(INM))$$

$$UTCr - UTC(prototipo) = -18.3\,ns + 3.01\,ns = -15.29\,ns$$

A partir del resultado del error y su relación con UTC, se puede observar que no supera el límite del error máximo permitido de 100 ns especificado en el requisito. Por lo cual, se considera que el sistema de medición cumple con el requisito para el uso previsto.

Compatibilidad de los resultados:

Empleando la herramienta estadística del error normalizado presentada en la norma ISO 13528:2022, se establece si los resultados son compatibles. El E_n debe estar en el intervalo entre -1 y 1 para establecer que son compatibles.

$$E_n = \frac{x_{Lab} - x_{Ref}}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}} \qquad \textit{Ec.15}$$

x_{Lab}: Resultados de medición del laboratorio (promedio de mediciones del prototipo)

x_{Ref}: Resultados de medición de la referencia (promedio de mediciones del NIST TAI-1)

U_{Lab}: Incertidumbre expandida del laboratorio (prototipo)

U_{Ref}: Incertidumbre expandida de la referencia (NIST TAI-1)

$$E_n = \frac{29.15\,ns - 32.16\,ns}{\sqrt{(2.77\,ns)^2 + (2.71\,ns)^2}} = -0.77$$

El resultado del E_n es de -0.77, encontrándose dentro del intervalo requerido, por lo tanto, se puede concluir que los resultados del sistema prototipo versus los resultados del sistema NIST TAI-1 son compatibles. Así mismo, esto se puede evidenciar en la Figura 70 que presenta los valores promedio de las mediciones del prototipo y del NIST TAI-1 junto con su incertidumbre expandida.

Figura 70.

Compatibilidad de los resultados.

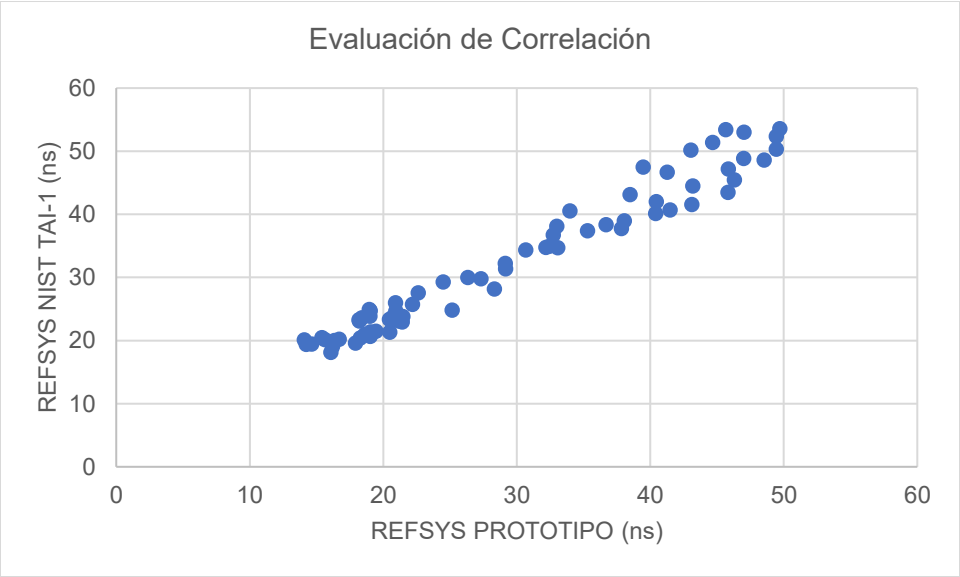


Evaluación de la correlación:

Se aplica una prueba estadística de correlación para evaluar si el comportamiento de ambos conjuntos de datos está relacionado. Si el coeficiente de correlación es 1 indica que están perfectamente correlacionados. El coeficiente de correlación es de 0.98 lo cual indica que están altamente correlacionados, en la Figura 71 se muestra la gráfica X-Y que relaciona los dos sistemas, evidenciándose la correlación ya que hay cierta tendencia lineal.

Figura 71.

Evaluación de correlación.



En consecuencia, los resultados obtenidos validan la correcta implementación del método Common-View en el sistema desarrollado y demuestran su capacidad para realizar comparaciones con exactitud en el orden de los nanosegundos, lo cual resulta adecuado para aplicaciones de sincronización y transferencia de tiempo en entornos de metrología y telecomunicaciones.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto permitió diseñar, implementar y validar un prototipo de sistema de medición para la comparación de osciladores atómicos mediante GNSS, de acuerdo con los objetivos y la metodología planteados. A partir del análisis de resultados, se comprobó que el sistema es capaz de adquirir, procesar y generar productos de medición compatibles con estándares internacionales, lo que confirma la viabilidad técnica del enfoque propuesto para aplicaciones como Common-View.

El software de adquisición desarrollado constituye un aporte fundamental, al integrar en una sola plataforma la captura, validación y preparación de datos GNSS. Su diseño permite garantizar la integridad de la información, la correcta alineación con el día UTC y la generación de archivos en formatos estándar, facilitando su uso en etapas posteriores de procesamiento y análisis. Adicionalmente, el almacenamiento de los datos en archivos CSV con su respectiva estampa de tiempo permite determinar las épocas correspondientes a los datos GNSS, facilita el cálculo y la aplicación de las correcciones necesarias en el procesamiento de las observaciones y refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

La validación del software y del método de medición confirmó que el sistema cumple con los requisitos técnicos establecidos, tanto en la correcta captura de datos como en la aplicación de las correcciones y la generación de resultados coherentes. La implementación del método Common-View permitió obtener diferencias temporales dentro del orden de nanosegundos, lo que demuestra la capacidad del sistema para realizar comparaciones temporales con un nivel de exactitud adecuado para aplicaciones en metrología del tiempo y la frecuencia, aun cuando no se cuenta con una calibración formal del receptor.

En cuanto al desempeño del sistema, los resultados obtenidos evidencian que el sistema de medición prototipo presenta un comportamiento adecuado y consistente frente al sistema de referencia NIST TAI-1, cumpliendo con los criterios de exactitud establecidos, dado que el error calculado se encuentra dentro del límite de ±100 ns definido para la diferencia UTC-UTC(k). Así mismo, el alto coeficiente de correlación obtenido indica una fuerte relación entre ambos sistemas. Y la evaluación de compatibilidad mediante el error normalizado E_n confirma que los resultados son compatibles, validando el funcionamiento del método de medición implementado. Sin embargo, la ausencia de una calibración formal del receptor puede estar generando errores sistemáticos, lo que resalta la importancia de realizar una campaña de calibración para fortalecer la exactitud del sistema.

Finalmente, el desarrollo del sistema de medición representa un avance significativo para el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del INM, al sentar las bases para la creación de nuevos servicios de calibración y sincronización dirigidos al sector de telecomunicaciones. Este proyecto no solo responde a una necesidad técnica específica, sino que también evidencia el impacto de la transformación digital en el INM, al incorporar herramientas tecnológicas que fortalecen la eficiencia, la innovación y la calidad de los procesos metrológicos, contribuyendo al posicionamiento institucional frente a los retos actuales y futuros en el campo de la metrología de Tiempo y Frecuencia.

7. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

A partir de los resultados obtenidos, se identifican oportunidades claras para fortalecer la confiabilidad metrológica del sistema y ampliar su alcance operativo. En primer lugar, se recomienda ejecutar un proceso formal de calibración del receptor GNSS y la medición de varios días, con el fin de caracterizar adecuadamente los retrasos instrumentales y establecer un modelo de incertidumbre adecuado. De manera complementaria, resulta fundamental realizar comparaciones con receptores de otros institutos y con equipos adicionales dentro del INM, lo que permitirá validar el desempeño del sistema bajo condiciones reales de operación y verificar la consistencia de los resultados en el contexto de la transferencia de tiempo.

En cuanto a la viabilidad de ejecución de los trabajos futuros, las mejoras propuestas son técnicamente alcanzables dentro de la infraestructura actual, con algunos requerimientos adicionales. El perfeccionamiento del algoritmo de detección de saltos del reloj interno del receptor, incorporando información directa de los satélites, representa una evolución natural del desarrollo realizado y permitiría mejorar la exactitud del sistema. También, se propone la extensión del procesamiento a señales en bandas L2 y L5 de GPS, junto con la inclusión de las demás constelaciones GNSS que soporta el receptor, esto será viable mediante la adquisición de una antena multibanda adecuada y el desarrollo de software adicional de acuerdo con las características de cada constelación. Estas mejoras tienen un alto potencial de impacto, ya que permitirían reducir errores sistemáticos, mejorar la estabilidad de las mediciones y acercar el sistema a estándares internacionales de mayor exactitud.

Por otra parte, la continuidad del proyecto se ve favorecida por la modularidad del desarrollo implementado, lo que facilita la integración de nuevas funcionalidades sin comprometer la arquitectura existente. En este sentido, la implementación de software para la generación de archivos CGGTTS en tiempo real y el desarrollo de una interfaz gráfica para el monitoreo continuo de la diferencia UTC(INM)–GPS constituyen extensiones o mejoras al sistema. Estas capacidades no solo mejorarían la operatividad del sistema, sino que también permitirían su integración con otros proyectos del laboratorio, como por ejemplo el desarrollo de la Escala de Tiempo generada a partir de varios osciladores atómicos. Adicionalmente, el sistema desarrollado presenta un alto potencial para la prestación de servicios de calibración orientados a empresas del sector de telecomunicaciones, donde la sincronización de redes constituye un requisito crítico para la operación y calidad del servicio.

En conjunto, las recomendaciones y trabajos futuros planteados evidencian que el sistema desarrollado no solo es viable en su estado actual, sino que posee un alto potencial de evolución hacia una plataforma más completa de medición y transferencia de tiempo, con impacto tanto a

nivel institucional como en el contexto de la cooperación internacional en metrología del tiempo y la frecuencia.

8. PRINCIPALES APORTES

El desarrollo del presente proyecto constituye un aporte significativo en la evaluación e implementación de soluciones de bajo costo para la medición y transferencia de tiempo mediante GNSS, alineado directamente con los objetivos planteados. En particular, se logró diseñar e implementar un prototipo funcional de sistema de medición, así como desarrollar herramientas de software para la adquisición y procesamiento de datos. Así mismo, la validación del software y del método permiten asegurar la coherencia entre el diseño propuesto y los requerimientos de exactitud y trazabilidad definidos inicialmente.

Uno de los aportes más relevantes del proyecto radica en la generación de conocimiento aplicado y en el desarrollo tecnológico, materializado en un prototipo que constituye un producto de I+D+i. Este prototipo no solo representa una solución funcional dentro del Instituto Nacional de Metrología (INM), sino que también se consolida como un producto de desarrollo tecnológico e innovación, contribuyendo al fortalecimiento de los grupos de investigación involucrados mediante la generación de capacidades en diseño, implementación y validación de sistemas de medición de alta exactitud. Así mismo, estos resultados establecen una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la metrología de tiempo y frecuencia. De manera complementaria, la producción académica derivada del proyecto, incluyendo la elaboración del documento de tesis, la posible publicación de artículos científicos y la participación en eventos especializados, refuerza la visibilidad y el posicionamiento de los grupos de investigación, promoviendo el crecimiento de sus líneas de trabajo y la consolidación de talento humano en el área.

Desde la perspectiva de impacto, el sistema desarrollado presenta un alto potencial de aplicación en empresas del sector de telecomunicaciones, al ofrecer una alternativa viable para la implementación de sistemas de sincronización con trazabilidad metrológica. Esto resulta especialmente relevante en contextos donde la sincronización es un requisito crítico para el funcionamiento de redes y servicios. De igual forma, el prototipo puede ser de utilidad para laboratorios acreditados y entidades que dispongan de osciladores de rubidio o GPS, ampliando el alcance de los beneficios del proyecto más allá del ámbito académico e institucional.

Finalmente, el proyecto contribuye al fortalecimiento de la capacidad científica e institucional mediante la formación de talento humano a nivel de maestría y la participación en grupos de investigación. La apropiación social del conocimiento se evidencia en la divulgación de los resultados a través de publicaciones y presentaciones en eventos científicos, lo que favorece la transferencia de conocimiento y la visibilidad del trabajo desarrollado. En conjunto, estos aportes

demuestran la pertinencia del proyecto y su capacidad de generar impacto tanto en el ámbito científico como en aplicaciones prácticas de alto valor.

9. REFERENCIAS

Allan, D. W., & Weiss, M. A. (1980). Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite. *34th Annual Symposium on Frequency Control*, 334–346. https://doi.org/10.1109/FREQ.1980.200424

BIPM. (2019). *The International System of Units (SI)*. https://doi.org/https://doi.org/10.59161/AUEZ1291

CCTF-WGMRA. (2015). *Guideline 7: Participation in the ongoing key comparison in time CCTF-K001.UTC*. https://www.bipm.org/documents/20126/30132363/cc-publication-ID-367/c553e61a-f6de-73ab-379d-3aa80a85e4ab

CCTF-WGMRA. (2017). *Guideline 8: Technical requirements for the time laboratories for the participation in UTC*. http://webtai.bipm.org/database/

Costa, R., Orgiazzi, D., Pettiti, V., Sesia, I., & Tavella, P. (2004). *GPS Common view data processing algorithm*. http://www.ien.it/tf/time/datigps.html;

Defraigne, P., & Petit, G. (2015). CGGTTS-Version 2E : an extended standard for GNSS Time Transfer. *Metrologia*, *52*(6), G1–G1. https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/6/g1

Department Of Defense USA. (2020). *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. *5th Edition*. https://www.gps.gov/technical/ps/

Department Of Defense USA. (2022). *Timing*. https://www.gps.gov/applications/timing/

International GNSS Service. (n.d.). *International GNSS Service - Files*. Retrieved August 23, 2025, from https://files.igs.org/pub/station/general/

International GNSS Service. (2018). *RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04*. https://files.igs.org/pub/data/format/rinex304.pdf

Kamas, G., Lombardi, M. A., Mosbacher, R. A., & Lyons, J. W. (1990). *Time and Frequency User's Manual*.

Levine, J. (1999). Introduction to time and frequency metrology. *Review of Scientific Instruments*, *70*(6). http://ojps.aip.org/rsio/rsicr.jsp

Lombardi, M. A. (2002). *Fundamentals of Time and Frequency*.

Lombardi, M. A., Novick, A. N., Lopez, J. M., Jimenez, F., De, E., Lopez, C., Boulanger, J.-S., Pelletier, R., Carvalho, R. J. De, Solis, R., Sanchez, H., Quevedo, C. A., Pascoe, G., Perez, D., Bances, E., Administracion, L. T., Usinas, N. De, & Electricas, T. (2010). The SIM Time

Network. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, *116*(2), 557–572. https://doi.org/https://doi.org/10.6028/jres.116.005

Lombardi, M. A., Novick, A. N., Neville-Neil, G., & Cooke, B. (2016). Accurate, traceable, and verifiable time synchronization for world financial markets. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, *121*, 436–463. https://doi.org/10.6028/jres.121.023

Lombardi Michael A., Novick Andrew N., & Zhang Victor S. (2014). A low-cost time transfer receiver for contributions to coordinated universal time. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, *119*, 583–601. https://doi.org/10.6028/jres.119.024

Montare, A. A., Novick, A. N., & Sherman, J. A. (2024). Evaluating Common-View Time Transfer Using a Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receiver. *Proceedings of the 55th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, 127–135. https://doi.org/https://doi.org/10.33012/2024.19586

National Institute of Standards and Technology. (n.d.). *Time and Frequency from A to Z. .* Retrieved November 13, 2023, from https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/popular-links/time-frequency-z

Observatoire Royal de Belgique. (2018). *R2CGGTTS* (8.8). ORB.

Panfilo, G., & Arias, F. (2019). The Coordinated Universal Time (UTC). *Metrologia*, *56*(4). https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab1e68

Rodriguez Claudia Fernanda, Gutiérrez Alexander, Sotelo Daniel Eduardo, & Hernández Liz Catherine. (2021). First Measurement Service Applied to Event Dating for Reliable Business Transactions: Metrology for Digital Transformation Using Colombian Legal Time. In Stone Linda (Ed.), *Metrologist* (Vol. 14, pp. 36–47). NCSL International.

Septentrio. (2025). *mosaic-T GNSS timing module receiver*. https://www.septentrio.com/en/products/gnss-receivers/gnss-receiver-modules/mosaic-t

Sparkfun Electronics. (n.d.). *GNSS Timing Breakout – ZED-F9T (Qwiic)*. Retrieved April 12, 2025, from https://www.sparkfun.com/sparkfun-gnss-timing-breakout-zed-f9t-qwiic.html

U-blox. (2024, April). *ZED-F9T-00B High accuracy timing module Professional grade - Data sheet*. https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9T-00B_DataSheet_UBX-18053713.pdf

Vattikonda, B. (n.d.). *CGGTTS data analyser* (1.0). BIPM.