

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO ELECTRONICA
VALPARAISO-CHILE



“SINCRONISMO EN REDES 3G, 4G Y EVOLUCION DE LA RED BACKHAUL”

XAVIER ANTOINE PARTARRIEU MIRANDA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRÓNICO, MENCIÓN TELECOMUNICACIONES

PROFESOR GUÍA: WALTER GROTE

JUNIO 2015

SINCRONISMO EN REDES 3G, 4G Y EVOLUCION DE LA RED DE RETORNO

Xavier Antoine Partarrieu Miranda

Memoria de Titulación para optar al Título de Ingeniero Civil Electrónico,
Mención Telecomunicaciones

Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía: Walter Grote

Mayo 2015

RESUMEN

Actualmente los usuarios de telefonía móvil no solo utilizan el teléfono para realizar llamadas, sino que, lo usan como puntos de acceso, para realizar video llamadas y descargas de contenido web, entre otros. Esto se traduce en que las redes de telefonía móvil deben actualizar su red de retorno para abarcar una demanda creciente de ancho de banda. La respuesta actual a estos requerimientos es el uso de una red basada en tecnología Gigabit Ethernet (GbE), en reemplazo de las redes existentes basadas en tecnología plesiócrona con portadores E1. Sin embargo, la aplicación de la tecnología GbE trae asociado un problema de sincronismo entre nodos que puede provocar que no haya una continuidad en los servicios ofrecidos al usuario móvil, cuando éste se desplaza.

Este proyecto se enmarca dentro de un contexto de memoria de titulación realizada en la empresa Alcatel-Lucent y contempla un estudio del estado del arte en protocolos de sincronismo de red, la determinación de requisitos mínimos para asegurar sincronismo, la selección de una de las alternativas tecnológicas a base de los requisitos establecidos y el desarrollo de un procedimiento de pruebas para lograr sincronizar la red de un cliente según los estándares internacionales. Luego, se describe las mediciones realizadas y se analizan los resultados obtenidos. Se concluye que las pruebas realizadas permiten asegurar que la red cumple con los requerimientos establecidos por el protocolo de sincronismo 1588v2 de la UIT.

Palabras Claves: Telecomunicaciones, Sincronismo en redes de acceso para comunicaciones móviles, Precision Time Protocol PTP 1588v2, Mobile Backhaul.

SYNCHRONISM IN 3G, 4G NETWORK AND BACKHAUL EVOLUTION

Xavier Antoine Partarrieu Miranda

Final Project Report towards the fulfillment of Ingeniero Civil Electrónico,
Mayor in Telecommunications degree (6 year engineering program).

Universidad Técnica Federico Santa María

Advisor: Walter Grote

May 2015

Abstract

Currently, users not only use their mobile phones to make voice calls, but also use it as a router, to make video calls and download web content, among others. Therefore mobile phone providers need to update their backhaul network to appropriately react to a growing demand for bandwidth. The current response to these requirements is the use of a web-based Gigabit Ethernet (GbE) technology, replacing existing networks based on PDH technology with E1 network carriers. However, the application of GbE technology can cause a loss of continuity of services offered to the mobile user, associated to the lack of synchronization between nodes.

This text summarizes an engineering degree project performed in Alcatel-Lucent and includes a study of the state of art in network timing protocols, determination of minimum requirements to ensure proper network synchronization, selection of one of the possible technological alternatives based on the fulfillment of the requirements and, finally, developing a test procedure to synchronize a customer network. Measurements made and results obtained are described to be later analyzed. It is concluded that the tests ensure that the network meets the requirements established by the 1588v2 synchronization protocol ITU.

Keywords: Telecommunications access network synchronization for mobile communications, 1588v2 Precision Time Protocol PTP, Mobile Backhaul

GLOSARIO

1588v2	Precision Time Protocol 1588v2
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
ACR	Adaptative Clock Recovery
ANT-20	Advanced Network Tester – 20
Any G	Any Generation
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BC	Boundary Clock
BMCA	Best Mastery Clock Algoritm
BTS	Base transceiver station
BW	Bandwidth
CDMA	Code Division Multiple Access
CE	Clock Equipment
CES	Circuit Emulation Services
CSR	Cell Site Router
E1	E-carrier
EVDO	Evolution Data Optimized / Only
FDD	Frequency Division Duplex
GM	Grand Master
GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HFC	Hybrid Fiber Coaxial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IP-RAN	Internet Protocol Radio Access Network
IPv4	Internet Protocol Version 4

ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
MBH	Mobile Backhaul
MPD	Mean Path Delay
MPLS	Multiple Protocol Layer Switching
MTIE	Maximun Time Interval Error
NTR	Network Time Reference
OAM	Operation and Management
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PDV	Packet Delay Variation
PPB	Parts Per Billion
PPM	Parts Per Million
PRC	Primary Reference Clock
PTP	Precision Time Protocol
PWE	Pseudowire
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAN NC	Radio Access Network Network Controller
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SEC	SDH Equipment Clock
SMS	Short Message Service
SONET	Synchronous Optical Networking
STM - X	Synchronous Transport Module, para SDH
STS - X	Synchronous Transport Signal, para SONET
SyncE	Synchronous Ethernet
T1	T-carrier (T-CXR)
TDD	Time Division Duplex
TDEV	Time Deviation
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access

TIE	Time Interval Error
ToP	Timing Over Packet
TP5000	Time Provider 5000
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications system
UTC	Coordinated Universal Time
VLAN	Virtual Local Area Network
WDMA	Wavelength-Division Multiple Access

Contenido

RESUMEN	ii
Abstract	iii
GLOSARIO	iv
Capítulo 1	Introducción y Objetivos..... 12
1.1	Objetivos..... 12
1.2	Contribuciones del Proyecto de Título. 13
1.3	Estructura del documento 14
Capítulo 2	Estado del Arte..... 15
2.1	Tecnología Actual..... 16
2.1.1	Nuevas Tecnologías..... 16
2.1.2	Características adicionales..... 18
Capítulo 3	Sincronismo, Marco Teórico. 22
3.1	Precision Time Protocol..... 24
3.2	Proceso de sincronización..... 30
Mensajes de eventos	 31
Capítulo 4	Criterios de Diseño. 34
4.1	Estructura de la Red..... 35
4.2	Criterios de sincronismo para redes LTE..... 36
4.3	Características mínimas del PRC..... 36
4.4	Características mínimas para SDH Equipment Clock. 37
4.5	Capacidad de Holdover del CSR. 38
Capítulo 5	Procedimientos para realizar las Pruebas de Estabilidad..... 40
5.1	Instrumentación..... 41

5.1.1	Brilliant Instrument - BI220.....	42
5.1.2	Advanced Network Tester - ANT-20	42
5.2	Medición estabilidad de Frecuencia en el PRC.	44
5.3	Medición estabilidad de Frecuencia en el CSR.	46
5.4	Medición capacidad de Holdover en el CSR.	48
Capítulo 6	Resultados de Mediciones y Análisis de Datos.	50
6.1	Análisis de datos para medición de estabilidad en PRC con referencia a GPS.	50
6.2	Análisis de datos para medición de estabilidad en interfaz SEC.	52
6.3	Análisis de datos para medición de Holdover en el CSR.	54
CONCLUSIONES		56
BIBLIOGRAFÍA		58

Contenido de Figuras.

Figura 3-1 Sincronismo Temporal [7].	22
Figura 3-3 Sincronismo en Frecuencia, [7].....	23
Figura 3-4 Sincronismo de Fase, [7].....	23
Figura 3-5 Jerarquía Maestro – Esclavo para sincronismo PTP [8].	25
Figura 3-6 Jerarquía Maestro – Esclavo con enlaces cíclicos [8].....	26
Figura 3-7 Diagrama general de la estructura de una trama PTP [8].....	27
Figura 3-8 Mensajería PTP sobre UDP sobre IP sobre Ethernet [8].	28
Figura 3-9 Intercambio de mensajería básica de sincronización [8].....	32
Figura 4-1 Topología utilizada por el Cliente.....	35
Figura 4-2 Función MTIE de una observación en un periodo τ en una interface PRC, [11].	37
Figura 4-3 Función MTIE de una observación en un periodo τ en una interface SEC, [12].	38
Figura 4-4 Representación gráfica de las ecuaciones para el límite de ruido en un periodo de observación τ en una interface de 2048 kbit/s, [12].	39
Figura 5-1 Topología de red utilizada para las mediciones.	41
Figura 5-2 – Tarjeta Brilliant Instruments BI220 para analizador de intervalos de tiempo.	42
Figura 5-3 Instrumento de Medición ANT20.	43
Figura 5-4 Máscara de límite para contrastar la medición a la salida del PRC.	44
Figura 5-5 Diagrama de prueba de medición en PRC.	45
Figura 5-6 Máscara de límite para contrastar las mediciones a la salida del CSR.	46
Figura 5-7 Puntos de medición para verificar estabilidad de frecuencia en el CSR.....	47

Figura 5-8 Topología de Red utilizada para medición de Holdover.....	48
Figura 5-9 Máscara de límite para las mediciones de Holdover.....	49
Figura 6-1 Gráfica obtenida de la medición TIE para interfaz PRC.....	50
Figura 6-2 Gráfica obtenida de la medición MTIE para Interfaz PRC.....	51
Figura 6-3 Medición TIE en el CSR para la estabilidad de Frecuencia en interfaz SEC.	52
Figura 6-4 Medición MTIE en el CSR para la estabilidad de Frecuencia en interfaz SEC.....	53
Figura 6-5 Medición TIE para la prueba de Holdover.....	54
Figura 6-6 Resultados de la medición MTIE para Holdover del equipo.	55

Contenido de Tablas.

Tabla 2-1 Tipo de Backhaul según la Generaciones utilizada [4].	17
Tabla 2-2 – Recomendaciones que analizan desplazamientos de frecuencia (inglés: wander) en TDM y Ethernet, [2].	19
Tabla 2-3 – Valores requeridos para lograr estabilidad de frecuencia y fase de los estándares para redes de acceso. [2].	20
Tabla 3-1 Características PTP.....	24
Tabla 3-2 Lista de Mensajes PTP	30
Tabla 3-3 Mensajes PTP del modo Delay Request-Response.	31
Tabla 3-4 Tasa de Mensajería en el CSR para Maestro y Esclavo.	31

Capítulo 1 Introducción y Objetivos.

Las necesidades del usuario de servicio de telefonía móvil se han ampliado desde la ya tradicional conversación telefónica y envío de mensajes cortos (SMS) a enviar imágenes, videos (“stream” de video), juegos de video, entre otros [1]. En este documento se reporta de qué forma se implementa una red de sincronismo de referencia para los nodos 3G y 4G para una red de servicio de un proveedor de servicios móviles de Chile, de manera que los usuarios puedan mantener la conectividad en todo momento y lugar a grandes velocidades de transmisión (100 Mbps al desplazarse) como actualmente lo requieren las aplicaciones.

Además, debido a que en la actualidad no se cuenta con una red capaz de cumplir con estas necesidades de altas tasas de transmisión, se especifica la evolución que se requiere realizar en la red de retorno MBH (por su sigla en inglés Mobile Backhaul) para transmitir estas grandes cantidades de datos que las aplicaciones generan. Se desea soportar un gran Ancho de Banda utilizando redes Giga Ethernet al menor costo para el usuario, garantizando en todo momento la calidad de servicio [1].

1.1 Objetivos.

Este proyecto tiene como objetivo principal validar la instalación de un equipamiento que permita implementar la sincronización de los nodos 3G, 4G, Any-G mediante el protocolo PTP 1588v2 (por su sigla en inglés, “Precision Time Protocol”) de modo que pueda ser utilizado en una red de retorno y lograr así una calidad de servicio igual o incluso mejor a la entregada en la actualidad.

Los objetivos específicos que permiten lograr el objetivo expuesto son:

1. Describir por qué es necesaria la sincronización de la red de retorno, cuáles son los estándares internacionales y los requerimientos mínimos que se deben cumplir y cuáles son los efectos de no cumplir con el sincronismo requerido.
2. Describir la red actualmente existente y de qué forma se puede mejorar el funcionamiento actual.

3. Describir las alternativas tecnológicas que permiten resolver el problema y sus ventajas y desventajas relativas.
4. Describir el protocolo seleccionado y sus estándares asociados.
5. Describir el escenario de pruebas de las mediciones a realizar.
6. Diseñar las pruebas a realizar para validar que la red diseñada responde a los requerimientos del protocolo de sincronismo 1588v2.
7. Determinar los puntos/lugares críticos donde se debe realizar una medición según los estándares.
8. Seleccionar los instrumentos necesarios para el tipo de medición que se desee realizar según la topología utilizada.
9. Realizar las mediciones recomendadas y analizar sus resultados.

En definitiva, las evaluaciones a realizar se enfocan al funcionamiento del sincronismo, verificando que se distribuya correctamente a los nodos correspondientes en la red, comprobando que los nodos permanecen sincronizados para permitir realizar el traspaso (handover) del servicio de un nodo a otro, es decir, que el sistema permita la movilidad que los usuarios requieren hoy en día. Para esto se evaluarán algunas de las alternativas existentes y que son recomendadas por organizaciones reconocidas mundialmente.

1.2 Contribuciones del Proyecto de Título.

Este proyecto contribuye facilitando el procedimiento de implementación de una nueva red de retorno móvil basada en redes Gigabit Ethernet sincronizadas para las empresas de telefonía en Chile, aportando con el procedimiento para medir y comprobar la calidad del sincronismo en la red. La implementación de una tecnología de este tipo permitirá que las empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones móviles puedan ofrecer un servicio continuado (en inglés “seamless”) a sus clientes, a pesar de la movilidad. Entregar también un servicio de mejor calidad sin aumentar los costos de estos debido a la nueva Red implementada.

1.3 Estructura del documento

En el capítulo 2 se analiza el estado del arte: Se expone la tecnología actual utilizada en las redes móviles, como lo es ATM (del inglés, “Asynchronous Transfer Mode”) sobre SONET/SDH (“Synchronous Optical Network” y “Synchronous Digital Hierarchy” respectivamente), y la problemática de sus capacidades de transmisión y costo en la actualidad. Se expone sobre la red necesaria para cumplir con los requerimientos cada vez mayores de los usuarios. Se explica cómo el sincronismo es entregado en la actualidad a los nodos de la red y qué ocurre con éste al hacer el cambio de la red de retorno. Se expone sobre la transición que es posible realizar para no generar un cambio drástico en la red de retorno.

En el capítulo 3 se presentan los tipos de sincronismo (frecuencia, tiempo y fase). Además, se describe el protocolo seleccionado, la arquitectura y mensajería utilizada, las ventajas y desventajas del protocolo, y finalmente se explica el proceso realizado para la sincronización de los relojes.

En el capítulo 4 se hace mención a los criterios que se deben considerar, se describe la estructura de red del cliente, además de las características y los límites de los diferentes tipos de relojes utilizados según la jerarquía.

En el capítulo 5 se describen los procedimientos para realizar las pruebas correspondientes, también se describen las 2 opciones de herramientas para realizar la medición.

En el capítulo 6 se analizan y validan los resultados obtenidos de las pruebas.

Capítulo 2 Estado del Arte

Para analizar los problemas relacionados con la pérdida de sincronismo en el contexto de transmisión en banda ancha de archivos de gran tamaño en redes con terminales móviles, es necesario establecer la evolución de la arquitectura de la red de retorno (“Backhaul”) y el sincronismo necesario para tecnologías de tercera (3G) y cuarta (4G) generación. En la actualidad se cuenta con redes de transporte SONET/SDH, Ethernet y ATM basada en E1. Sin embargo, las capacidades de transporte de información de las tramas E1 están siendo superadas por las necesidades de transporte asociadas a archivos de imágenes, video y video juegos, entre otros [1]. Además el transporte de información debe ser lo más fluido posible, por lo tanto una red 4G pretende ser netamente IP. Esto se debe a que IP es escalable a nivel del ancho de banda, es decir, lo que se pretende realizar es transportar cualquier tipo de información encapsulada en IP sobre una tecnología móvil (any G) independientemente de su origen y sobre cualquier medio, ya sea Ethernet, Óptico, Microwave, etc.

Al realizar este cambio aparece otro problema: se pierde la cadena de sincronismo que genera la trama E1/T1 en la actualidad, la que se reparte junto a la trama SDH. En consecuencia, para que sea posible el transporte de paquetes IP mediante las redes 4G, el sincronismo debe ser incorporado a la red. Por lo tanto, se requiere comprender tanto el sincronismo tradicional como el sincronismo para redes IP:

- ▶ Dentro del sincronismo tradicional principalmente se tiene: SONET/SDH, GPS, NTR.
- ▶ Para sincronismo en redes IP: SyncE (Synchronous Ethernet), 1588v2 (Precision Time Protocol - PTP), ACR.

Específicamente se deben comprender los criterios de diseño e Implementación de sincronismo 1588v2 en redes de retorno (MBH - Mobile Backhaul). Este es uno de los dos protocolos recomendados por organizaciones mundiales estándares que dan solución a sincronismo en redes IP.

Adicionalmente, se deben considerar los criterios de calidad que rigen para el transporte de información IP en redes 3G/4G en lo relativo a ancho de banda, retardos, variaciones de retardo y pérdida de paquetes. El proyecto debe establecer los estándares que aplican y los métodos para

que estos estándares se cumplan. Es decir, debe contemplar procedimientos de medida que permitan verificar que se está cumpliendo con esos requerimientos.

2.1 Tecnología Actual.

En los documentos de Metro Ethernet Forum [2] y [3] se describen algunos aspectos que son fundamentales respecto de la necesidad de sincronizar la red. Uno de los formatos actuales es la transmisión de ATM sobre SONET/SDH. Para mantener el sincronismo en SONET/SDH al momento de querer multiplexar/demultiplexar para alcanzar mayores tasas de transmisión (desde STS-1/STM-0: 51.840 Mbps hasta STS-768/STM-256: 39813.120 Mbps) se requiere tener sincronizado todos los nodos de la red, es decir, se envía una señal de sincronismo junto a la trama SDH permitiendo a los siguientes nodos tener una referencia temporal. Para una Red de retorno (MBH, por sus siglas en inglés), la entrega de la frecuencia de sincronización es importantísima para la sincronización de los nodos, por lo cual se han desarrollado y desplegado nuevos protocolos, como ya se hizo mención, por ejemplo, PTP 1588v2.

2.1.1 Nuevas Tecnologías.

Con el cambio de transportar cualquier tecnología móvil por una única red de retorno, debido a que las redes basadas en E1 (“Legacy Networks”) no son escalables (considerando su restringido ancho de banda), se presenta la necesidad de entregar el sincronismo a cada una de las diferentes tecnologías (2G TDM, 3G ATM/Ethernet y 4G IP/Ethernet) dentro de la red, ya que al perder el sincronismo entre los nodos (entre estaciones bases, BS: Base Stations, en inglés) el intercambio de información entre ellos no podría ser posible (en otras palabras, no se pueden comunicar en forma correcta debido a que se comunican a destiempo) y todo esto termina afectando los servicios de los usuarios conectados, ya que se ve afectada la conexión, aumentando la tasa de errores y la hace poco estable. El usuario no se podría desplazar de una celda a otra sin que la llamada (o servicio cualquiera sea éste) se interrumpa o tenga una calidad baja de la voz [4].

En el documento “Mobile Backhaul Network” [4] se explica el cambio que se ha de realizar para pasar de las redes actuales (Legacy) a una red Ethernet (proyectando LTE como 4G). Se requiere realizar una transición para mantener la compatibilidad de ambos sistemas hasta lograr una migración a la nueva red Gigabit Ethernet. Es por esto que se presenta un paso intermedio de una

Red híbrida donde no necesariamente se deben tener los 2 sistemas, sino que se puede emular los servicios TDM con “Pseudo Wire” (PWE) en una red Ethernet. A continuación se describen los tipos de BTS:

- a) **BTS sin soporte Ethernet:** En este caso las BTS sólo soportan la tecnología Legacy, por lo tanto, conectar la BTS con RAN NC se puede realizar de 2 formas:
 - I. Manteniendo los 2 “backhaul” en paralelo, enviando la voz por el “backhaul” TDM y los datos por el “backhaul” Ethernet (por asunto de escalabilidad).
 - II. Emulando los servicios nativos Legacy sobre la red Ethernet gracias a los pseudo wires de emulación de servicios. Aquí la información es transportada por la nueva mobile backhaul. Se puede encontrar mayor información respecto a Emulación de circuitos de servicio (CES, Circuit Emulation Services) en [1].
- b) **BTS con soporte Ethernet y Legacy:** En este caso los nodos RAN soportan TDM/ATM y tráfico de paquetes. La idea principal es enviar la información de baja prioridad y de alto consumo de ancho de banda (best effort) por la red Ethernet. Este tipo de BTS es comúnmente llamado duales. (Similar al caso anterior).
- c) **BTS con soporte Ethernet:** En este caso la BTS y el RAN NC soportan Ethernet y se conectan directamente a la Red. Todo el tráfico es transportado por la Red Ethernet.

Tabla 2-1 Tipo de Backhaul según la Generaciones utilizada [4].

Generación	Tecnología	Soporte del Nodo b	Soporte del Backhaul
2G	GPRS/TDMA/CDMA	TDM Canalizado	PDH/SDH
3G	UMTS	ATM	ATM
3G/4G	EVDO/UMTS/WiMAX/ LTE	IP/Ethernet	IP/MPLS/Ethernet

2.1.2 Características adicionales.

Otros aspectos que han sido tomados en cuenta del documento “Mobile Backhaul Network” [4] para implementar un nuevo Mobile Backhaul se describen brevemente a continuación:

VLANS: el tráfico que ingresa al Backhaul puede ser separado por tipo de Servicios y/o por Zonas gracias al Cell Site Router ya que las BTS no soportan esta característica.

Calidad de Servicio (QoS): esta característica permite dar prioridades a los paquetes dentro del Mobile Backhaul, caracterizar y programar el orden de éstos. De esta forma es posible priorizar entre un paquete de señalización de reloj antes que un paquete de dato. En general, la red debe soportar los diferentes tráficos a diferentes prioridades como: Voz, Video, Señalización de la red, mantenimiento y Best Effort (otros datos). Dando prioridad a la señalización del PRC evitamos perder sincronismo y a la vez bajamos el ratio de paquetes perdidos.

Servicios: La nueva red implementada con MPLS permite la implementación de pseudo wires. Estos permiten escalabilidad en comparación a una red Capa 2 pura, mientras que por otro lado, los servicios Capa 3 entregan con facilidad QoS, OAM, Sincronismo y robustez a la red.

Sincronismo: Una forma de realizar la entrega de sincronismo sobre redes Ethernet es utilizando MPLS. Esto se puede lograr utilizando colas de QoS adecuadas, en la configuración de los router en la red de retorno. Detalle de esto se puede encontrar en el documento del MPLS Forum, [5]. Además en el documento del Metro Ethernet Forum [2] entrega información importante respecto a cómo se debe implementar el protocolo IEEE 1588v2 y se pueden encontrar algunas pruebas realizadas como:

Rendimiento de IEEE 1588v2: Esta prueba se realiza para comprobar la robustez de la operación en la red. Con esto se comprueba que la recuperación del reloj y la frecuencia se realicen con éxito y sin errores en el CSR (Cell Site Router) en el extremo final.

Por lo tanto, la tendencia es trabajar sobre una red Ethernet IP/MPLS con el fin de reducir los costos de los proveedores de servicios para no traspasarlo a sus clientes, manteniendo la calidad actual de los servicios proveídos por una red Legacy. El desafío aquí es transportar el sincronismo a los nodos de la red. Como la nueva red es una red asíncrona pero de bajo costo,

aparece el desafío de entregar a la red el sincronismo obtenido desde un Reloj externo (PRC, Primary Reference Clock) utilizando los paquetes transmitidos (ToP, Timing over packet). Algunas recomendaciones que se toman en cuenta se pueden encontrar en el documento de IP/MPLS Forum [5], en donde se describe el tipo de sincronismo necesario, Precisión de Frecuencia para la interface de Radio, y sincronización de Tiempo/Fase según la tecnología utilizada. Estas recomendaciones han sido acordadas en la ITU-T [6].

Tabla 2-2 – Recomendaciones que analizan desplazamientos de frecuencia (inglés: wander) en TDM y Ethernet, [2].

	Equipo de Red independiente	Red Completa
TDM	ITU-T G.813	ITU-T G.823/824/825
Ethernet	ITU-T G.8262	ITU-T G.8261 más recomendaciones independiente G.813 y G.8262 EQ

Como la sincronización consiste en distribuir una señal de tiempo de referencia a todos los nodos de la Red para que éstos se alineen, se debe trabajar con la Calidad de Servicio (QoS) en el transporte de la señal. Lo anterior es así porque ésta se ve afectada por el retardo variable de recepción de paquetes (PDV: Packet Delay Variation) ya que esta información se envía en los mismos paquetes que son vulnerables al retardo. Este caso particular se especifica técnicamente en documento del MPLS Forum [5], donde se puede encontrar 3 casos tanto para la distribución de la frecuencia, como del tiempo:

- I. El primero es para cuando la señal de referencia es entregada directamente al CE, vía GPS, por ejemplo.
- II. La segunda es una solución End-to-End donde el PRC entrega el sincronismo a través de la red al CE (de forma transparente) y sólo los elementos que se encuentran en la RAN recuperan y distribuyen esta mensajería.

- III. La tercera solución es similar a la solución II. Opera en modo Stand-Alone, donde la referencia es distribuida por un reloj dentro de la Red MPLS hacia los nodos.

Según los tres casos anteriores, se procederá a trabajar en una arquitectura de red del cliente para la entrega de sincronismo “End-to-End”. Se utiliza el método de distribución del caso II.

Además, la estabilidad de sincronismo del sistema es esencial debido a que la falta de ésta produciría errores de bit. La siguiente tabla define los valores máximos posibles de la señal de sincronismo según la tecnología utilizada:

Tabla 2-3 – Valores requeridos para lograr estabilidad de frecuencia y fase de los estándares para redes de acceso. [2].

Tecnología Móvil	Estabilidad de Frecuencia	Fase/Tiempo
CDMA 2000	±50 ppb	<10 [us] por al menos 8 horas con respecto al tiempo CDMA.
GSM	±50 ppb	N/A.
WCDMA-FDD	±50 ppb	N/A.
WCDMA-TDD	±50 ppb	2,5 [us]
TD-SCDMA	±50 ppb	Diferencia de fase 3 [us] entre estaciones bases.
LTE (FDD)	±50 ppb	N/A.
LTE (TDD)	±50 ppb	Celdas pequeñas 3 [us] de diferencia de fase, 10 us para celdas grandes.
MBMS	±50 ppb	Diferencia de 1 [us] entre estaciones bases.
WiMAX TDD	±2 ppm absoluto. ±50 ppb entre estaciones base	Entre 1 y 1,5 [us]

En la práctica, estar sincronizado al PRC asegura la correcta entrega de la referencia con precisión en partes por billón (ppb: part per billion= 10^{-9}) en Redes Ethernet y TDM. Sin embargo, si un dispositivo pierde el sincronismo hacia el PRC, los estándares especifican que éste puede seguir entregando una referencia de reloj (hacer de Master hacia otro equipo) por un periodo de tiempo con una precisión de ± 4.6 parte por millón (ppm: parts per million= 10^{-6}).

Capítulo 3 Sincronismo, Marco Teórico.

En este capítulo se describe el protocolo seleccionado para el desarrollo de esta memoria. Principalmente se describen las formas básicas de sincronismo existentes, para luego pasar a detallar las características importantes del protocolo a utilizar, PTP (Precision Time Protocol, por sus siglas en inglés).

El sincronismo es esencial en los sistemas de comunicación móvil, debido a que se necesita que los nodos b (BTS) de la red estén sincronizados para permitir al usuario final poder enviar (Uplink) y/o recibir (Downlink) información, realizar handover/handoff, entre otros. Por lo tanto, a continuación se presentarán los tipos de sincronismo existentes.

- **Sincronismo de Tiempo:** Comúnmente llamado “time-of-day”, cuando los relojes tienen el mismo tiempo base, por ejemplo UTC (Coordinated Universal Time).

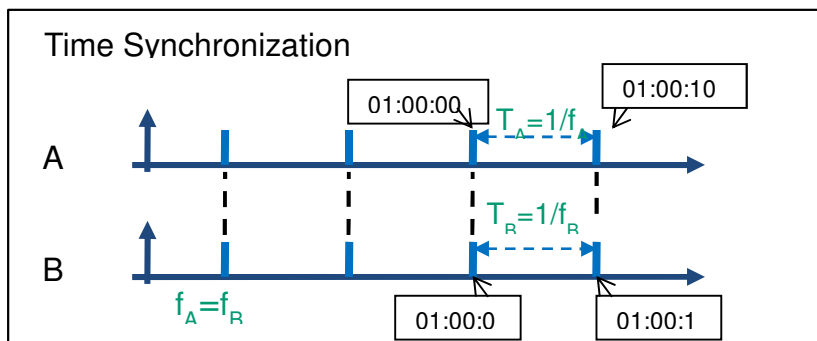


Figura 3-1 Sincronismo Temporal [7].

- **Sincronismo de Frecuencia:** Este sincronismo ocurre cuando los relojes están alineados en la misma frecuencia, pero pueden presentar desfase.

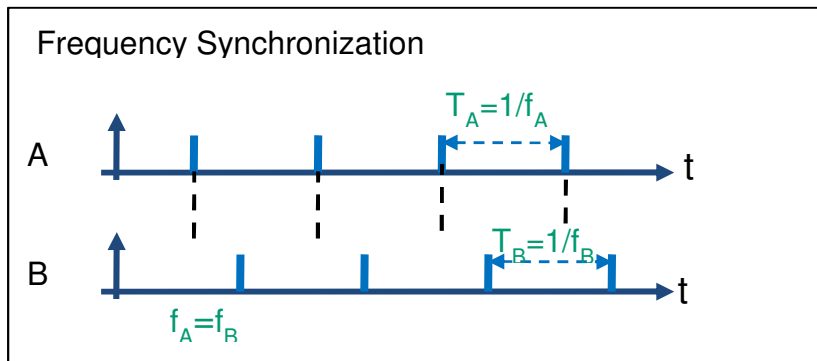


Figura 3-2 Sincronismo en Frecuencia, [7].

- **Sincronismo de Fase:** Se da cuando los relojes están coordinados en fase.

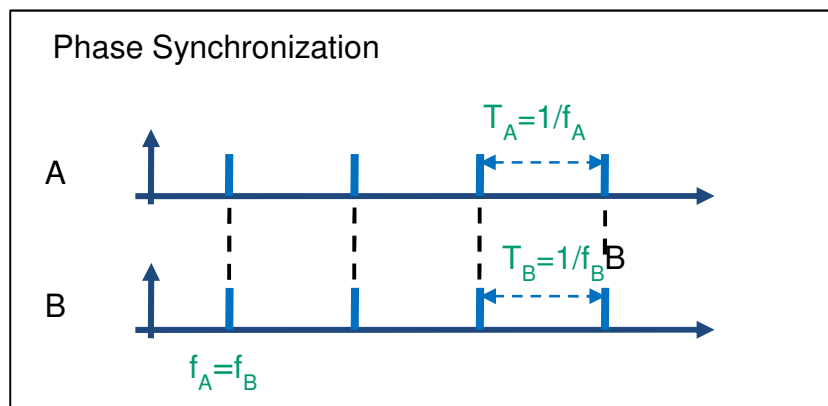


Figura 3-3 Sincronismo de Fase, [7].

Si se tiene sincronismo en tiempo y fase, necesariamente se tiene sincronismo en frecuencia.

3.1 Precision Time Protocol.

El protocolo a utilizar es el ya mencionado 1588v2-2008, también llamado PTP (del inglés Precision Time Protocol), método estandarizado por la ITU-T G.8265 para sincronizar relojes en tiempo real en redes Gigabit Ethernet. Algunas de las características que son propias de este protocolo se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 3-1 Características PTP.

Capacidad	Sincronismo en Frecuencia, Fase y Tiempo.
Distribución	Paquetes 1588 dentro de Banda
Esquema	Punto-Multipunto
Medio de Transporte	Ethernet, SHDSL, Microwave
Interoperabilidad	Gran Maestro – Esclavo
Estándares	IEEE 1588v2, ITU G.8261/3/5

El método de cómo este protocolo se transmite es estableciendo una jerarquía Maestro-Esclavo. Esta jerarquía es necesaria debido a que los relojes a sincronizar (BC, Boundary Clock) pueden recibir diferentes referencias de relojes y/o la misma referencia, pero por caminos diferentes. Es por esto que el BC tiene un estado, y este estado varía según la mejor referencia que se recibe y esto depende de cada puerto del BC, es decir, cada puerto del BC utiliza el algoritmo llamado BMCA (Best Master Clock Algorithm) el cual permite identificar la mejor señal obtenida por los puertos del BC y se elige ésta como la apropiada para la Red. En este proceso se utilizan unos mensajes de anuncio (Announce Message en inglés) que contienen información de las capacidades del Reloj.

De esta forma se establece un orden/estructura para realizar una comunicación bidireccional entre los relojes seleccionados (Entre el Maestro Elegido con el algoritmo mencionado y el Esclavo, el cual realiza el proceso de dicho algoritmo), debido a que esta mensajería entre dichos

Relojes contiene referencias de tiempo (Time Stamps) que son utilizadas por el Esclavo para sincronizarse mediante un procesamiento detallado más adelante y el cual es de gran importancia, ya que si el proceso de sincronismo es realizado con una mala referencia, se estaría sincronizando en base a un dato no confiable y es muy probable que se produzcan errores.

Un ejemplo de la arquitectura para el protocolo 1588v2 se puede ver en la Figura 3-4.

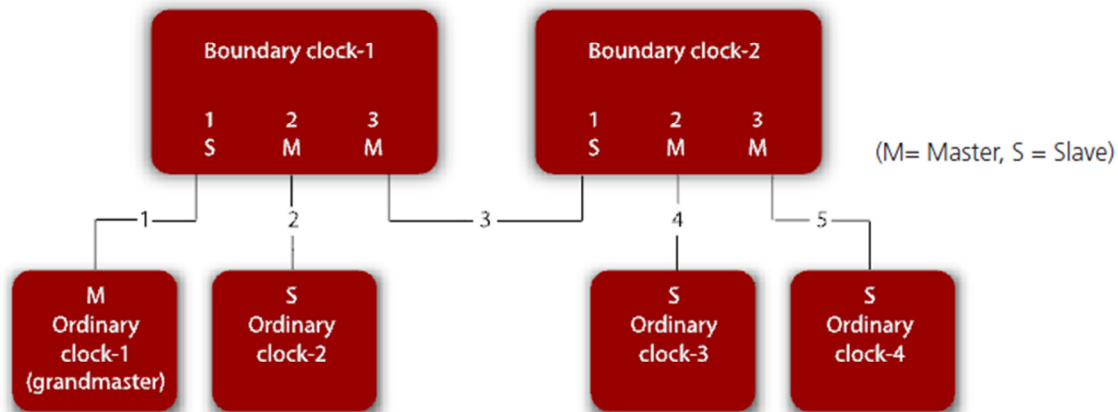


Figura 3-4 Jerarquía Maestro – Esclavo para sincronismo PTP [8].

Cabe mencionar que los relojes tipo BC solo pueden tener un puerto “Activo” como Maestro, esto debido a que es imposible sincronizar uno o más relojes mediante dos referencias y pueden tener tantos esclavos como puertos restantes lo requieran. Adicionalmente, en esta jerarquía de Maestro/Esclavo, es importante advertir que se deben evitar los ciclos/redundancias como se muestran en la Figura 3-5, debido a que se recibe la referencia del mismo maestro por dos rutas distintas. Evitar esto se logra aplicando protocolos de control. Dos protocolos existentes son:

- a) Filtros
- b) Rutas Estáticas

Las rutas estáticas no se consideran por su poca escalabilidad, considerando la magnitud de las redes, particularmente donde se considera la aplicación de este trabajo.

En cambio, los filtros permiten bloquear mediante IPs la mensajería proveniente y así “obligar” a que sólo se reciba la referencia por uno de los caminos disponibles, ya que se pueden configurar varios puertos hacia varios PRC pero solo uno va a ser el que se utilice para sincronizar el reloj interno del equipo (el que tenga la mejor referencia gracias al BMCA).

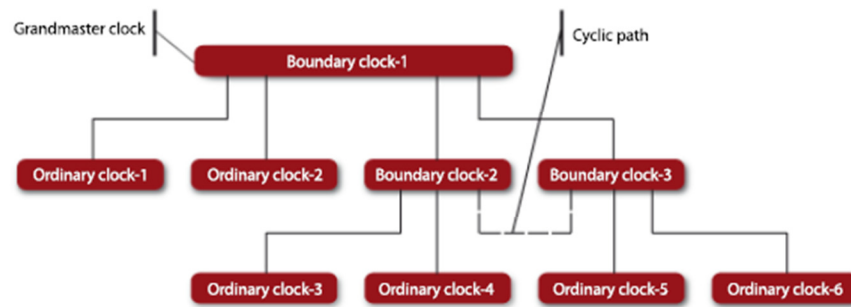


Figura 3-5 Jerarquía Maestro – Esclavo con enlaces cíclicos [8].

Otro aspecto importante del protocolo 1588v2-2008, es que su solución se basa en paquetes, es decir, transporta la señal de sincronismo como parte de la carga útil. Esta solución permite eliminar la necesidad de un plano paralelo de sincronismo (mantener una E1 donde se transmite una secuencia de bits de referencia), se disminuyen los costos y es más efectiva, es decir, si bien se utiliza una cantidad de bits para enviar esta información, no se realiza de forma constante, pero sí de forma periódica, por lo cual hay una disminución del uso de la red de transporte.

Por otro lado, es un sistema que depende del estado de la red, es decir, si hay mucho tráfico en la red los paquetes de sincronismo enviados se ven afectados a retardos, para lo cual existen diferentes mecanismos para asegurar la entrega de la información de reloj. Algunos de estos son el “Boundary Clock” y “Transparent Clock” [2][8], MPLS en redes Ethernet con clases de servicios, entre otros, [5].

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el “Boundary Clock” se utiliza para dispositivos con múltiples conexiones y pueden operar como Maestro y Esclavo a la vez (en diferentes puertos). La información de referencia es intercambiada entre maestro (fuente) y esclavo (destino) mediante marcas de tiempo (“timestamps”), que son los datos utilizados para recuperar

la frecuencia y/o tiempo/fase, por lo cual se requiere de un intercambio de información entre el Maestro y el Esclavo. Esto se verá en detalle más adelante.

La estructura de una trama PTP se forma por un encabezado, un cuerpo y un sufijo. Esto se puede ver en la Figura 3-6.

Header: El encabezado es común a todos los mensajes PTP e indica a qué tipo de mensaje corresponde (ver Tabla 3-2).

Body: El cuerpo del mensaje varía según el tipo de mensaje, ya que contiene la información importante a entregar. (ver Tabla 3-2).

Suffix: Esta parte de la trama es opcional. Se indica en el encabezado si la trama contiene un sufijo, indicando el largo total de la trama. (ver Tabla 3-2).

Para más detalle sobre el contenido de esta trama, véase el documento de JDSU [8].

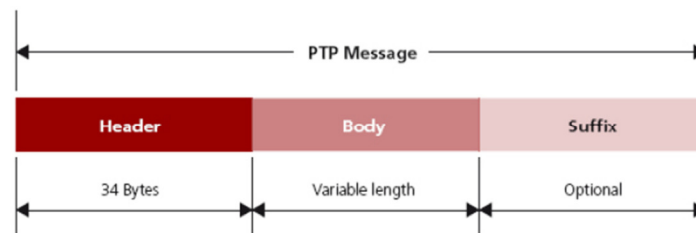


Figura 3-6 Diagrama general de la estructura de una trama PTP [8].

En la Figura 3-7 se aprecia la encapsulación de la trama PTP sobre IPv4 para permitir el transporte sobre Ethernet, para otros tipos de transporte, ver referencia [8].

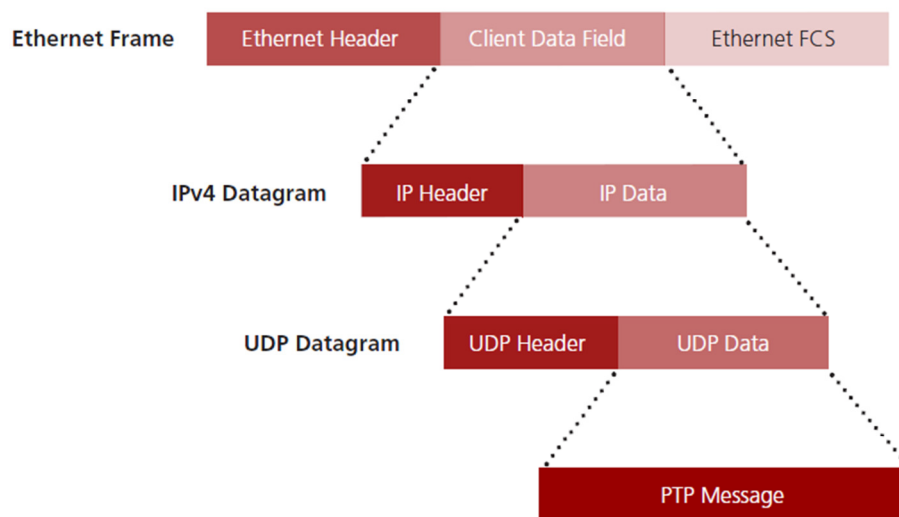


Figura 3-7 Mensajería PTP sobre UDP sobre IP sobre Ethernet [8].

La contraparte de sincronizar la red de esta manera (sobre paquetes) es que hace a este protocolo sensible al comportamiento de la Red, por lo que la precisión depende del algoritmo de recuperación del reloj y de las variaciones de retardo (en inglés: Jitter/Wander) que tenga el paquete recibido, conocido comúnmente como variación de retardo en la entrega de paquetes (en inglés: PDV, Packet Delay Variation). Si bien la sincronización en frecuencia es relativamente fácil, la sincronización en fase suele ser más sensible al “PDV”. Por ello, existen dos mecanismos para combatir esta degradación (reducen el Jitter mejorando el rendimiento en saltos largos): un reloj transparente (“Transparent Clock”) y un reloj de borde/frontera (“Boundary Clock”). El enfoque que se dará en este proyecto será de usar el “Boundary Clock”, ya que permite contabilizar el tiempo (retardos) que se producen por la propagación. Esto, a diferencia de un “Transparent Clock” que permite contabilizar el tiempo en que un paquete reside por un router. Este último es menos relevante ya que en la red donde se implementará este protocolo se trabaja con QoS, por lo que al dar prioridad a este tipo de tráfico, el impacto de los retardos en filas de espera es disminuido. Además el equipamiento del cliente cuenta sólo con relojes tipo “Boundary”.

Ventajas de 1588v2.

- Provee referencia de Frecuencia y Tiempo/Fase.
- Solución dentro de Banda (Los “timestamps” utilizan ancho de Banda de la red)
- No necesariamente todos los nodos de la red deben soportar 1588v2. (Path Support)

Desventajas de 1588v2.

- Depende de la carga que hay en la Red.
- La naturaleza asimétrica y dinámica de los paquetes afectan la precisión de la red produciendo PDV (diferencias entre el recorrido de ida y vuelta afectan al cálculo de sincronización del reloj).
- Es sensible al PDV (Packet Delay Variation).

3.2 Proceso de sincronización

En esta sección del documento se explica el proceso de sincronismo realizado por el BC para ajustar su reloj con el de su Maestro. Para esto, se declaran los mensajes utilizados en el proceso para luego describir el proceso de sincronismo completo. En forma resumida, el proceso de sincronización consta de dos etapas:

- I. Se establece la arquitectura Maestro-Eslavo, lo cual ya fue explicado en la sección 3.1.
- II. Se sincronizan los relojes utilizando **Delay Request-Response**.

Este mecanismo consta del intercambio de mensajería entre los relojes Maestro y Esclavo con el objetivo de calcular el retardo (delay) existente entre ellos y el Corrimiento (offset) que pueda tener el Esclavo respecto a su Maestro.

La mensajería utilizada en estas dos etapas se declara en la Tabla 3-2 y es utilizada para los diferentes mecanismos existentes:

Tabla 3-2 Lista de Mensajes PTP

Mensajes de eventos	Mensajes Generales
Sync	Announce
Delay_Req	Follow_Up (2 step clock)
Pdelay_Req	Delay_Resp
Pdelay_Resp	Pdelays_Resp_Follow_Up
	Management
	Signaling

La mensajería de importancia para este trabajo, es la utilizada por el mecanismo “Delay Request-Response”, ya que los relojes del equipamiento (Routers) utilizado cuentan con este mecanismo que considera sólo los siguientes mensajes:

Tabla 3-3 Mensajes PTP del modo Delay Request-Response.

Mensajes de eventos	Mensajes Generales
Sync	Announce
Delay_Req	Delay_Resp
	Management
	Signaling

Para tener información detallada sobre la estructura de los mensajes, revisar el documento de JSDU [8].

Adicionalmente, en la Tabla 3-4 se pueden ver la cantidad de mensajes que pueden ser enviados por el tipo de reloj según las especificaciones del equipo.

Tabla 3-4 Tasa de Mensajería en el CSR para Maestro y Esclavo.

Mensajería	Esclavo		Maestro	
	Tasa Mínima	Tasa Máxima	Tasa Mínima	Tasa Máxima
Announce	1/8s	1/s	1/16s	8/s
Sync	64 Sync/s	128 Sync/s	1 Sync / 16s	128 Sync/s
Delay Response	64 Delay/s	128 Delay/s	1 Delay / 16s	128 Delay/s

Una vez realizado el primer proceso de establecer la arquitectura Maestro-Esclavo según la mejor referencia de reloj, se procede a la fase de Sincronización de Reloj.

Primero, se realiza el algoritmo para elegir al mejor “Master Clock” comparando la información (como la estabilidad y precisión del reloj) y el estado de estos relojes (estado que pueda adquirir el puerto, ya sea Maestro, Esclavo, Pasivo) para luego proceder con la sincronización de este par de relojes (en jerarquía Maestro-Esclavo). Se inicia una secuencia de mensajería, la cual consiste en calcular el retardo (delay) promedio que existe en el enlace entre los dispositivos y calcular la corrección del corrimiento entre relojes. Esto depende del ancho de banda disponible del enlace y el retardo que pueda tener dicha mensajería, ya sea por estadía en el “Router”, pérdidas de paquetes u otro factor.

Un ejemplo del intercambio de mensajería utilizada para sincronización se puede ver en la Figura 3-8, en donde se puede apreciar claramente que el Esclavo guarda todos los tiempos de la mensajería para luego proceder a realizar los cálculos para ajustar el corrimiento y estimar el retardo correspondiente.

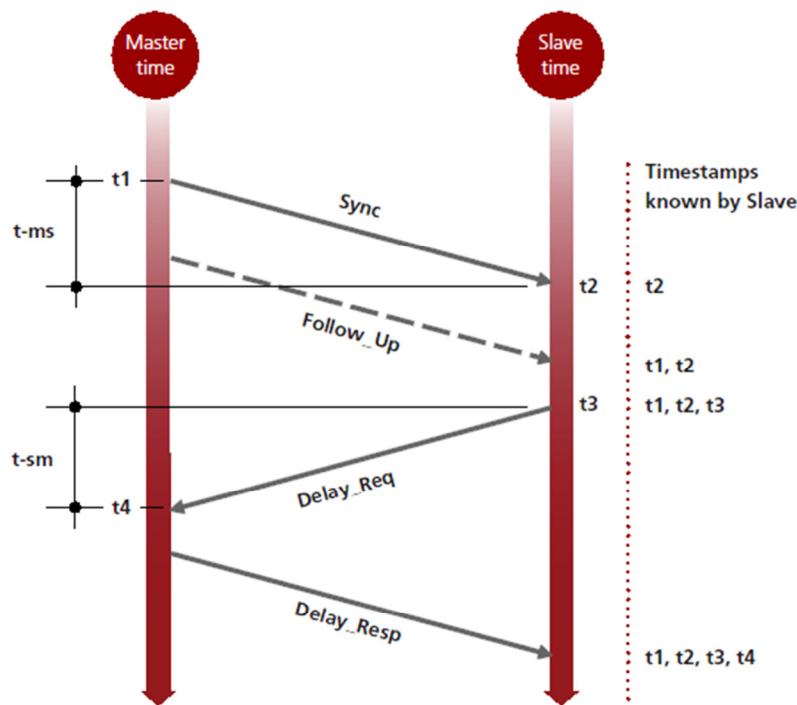


Figura 3-8 Intercambio de mensajería básica de sincronización [8].

El proceso de sincronismo se indica a continuación según la mensajería utilizada.

1. El Maestro envía un mensaje Sync, el cual contiene el tiempo (time-stamp t_1) indicando el tiempo en que este mensaje es enviado y lo recibe el Esclavo correspondiente.
2. En respuesta a esto, el Esclavo guarda este tiempo (t_1) y guarda el tiempo (t_2) en que recibió el mensaje. Luego genera otro mensaje de Requerimiento de retardo (Delay_Req) hacia el Maestro y guarda el tiempo (t_3) en que este mensaje es enviado.
3. En respuesta al Delay_Req enviado por el Esclavo, se genera un mensaje de respuesta de retardo (Delay_Resp) por parte del Maestro el cual indica el tiempo en que el mensaje de requerimiento de retardo (Delay_Req) es recibido (t_4).
4. Finalmente, el Esclavo conoce los cuatro tiempos indicados en el proceso gracias al intercambio de mensajería. Con esto se pueden obtener los valores del Retardo en dicho enlace y además se puede corregir el corrimiento presente entre dichos relojes ya que se obtiene el valor de éste.

El cálculo del Retardo Medio del enlace por parte del Esclavo se realiza a partir de las marcas de tiempo (Time-stamps) como se indica en la siguiente fórmula:

$$Delay = \text{Retardo promedio del enlace (MPD)} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (3-1)$$

También es posible calcular el offset existente entre el reloj del esclavo respecto al Maestro con la siguiente fórmula:

$$Offset = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} = t_2 - t_1 - MPD \quad (3-2)$$

Para mayor detalle sobre el proceso de sincronización ver el documento de G. Garner [10].

Capítulo 4 Criterios de Diseño.

Para definir las pruebas a realizar, primero se requiere conocer los requerimientos mínimos de un PRC (Primary Reference Clock por sus siglas en inglés) o también conocido como GM (Grand Master) en lo que corresponde al protocolo PTP1588v2 para redes de sincronismo, para luego determinar si las condiciones de reloj y mensajería del 1588v2 cumplen con lo establecido en los estándares propuestos por la ITU-T G.811, G.823 y G.8260/G.8261. Esto se realizará en una red IP-RAN (Internet Protocol - Radio Access Network) en donde sus elementos de red son “Routers” que soportan el protocolo mencionado, IEEE PTP1588v2 (pueden no soportarlo). Además, se evaluará si el reloj de tipo “Boundary Clock” cumple con las recomendaciones de diseño.

Como todo equipo genera ruido al transmitir una señal y ésta se va degradando a medida que avanza en la red en su trayecto hacia otro equipo, es necesario fijar los límites a este ruido para evitar la aparición de bits erróneos, deslizamientos u otras anomalías en la red, por lo tanto, se describirán los criterios para las diferentes interfaces y relojes que se utilizarán en esta red de retorno.

El criterio que se va a utilizar es un análisis de “Wander” expresado en una medición MTIE (del inglés: Maximum time interval error) para establecer si una prueba es exitosa o no lo es, ya que una medición MTIE es uno de los dos análisis de una medición del corrimiento (Wander). El otro método para expresar esta medición es mediante ecuaciones o gráficas de desviación temporal de la señal TDEV (del inglés: Time DEVIation).

Las ventajas de realizar una medición MTIE sobre TDEV son:

- El comportamiento de esta medición es independiente del periodo de muestreo.
- Caracteriza el tamaño del buffer del equipo medido.

Como éste es un proyecto que se aplicará sobre la red del Cliente, se describe a continuación la estructura de la red.

4.1 Estructura de la Red

La estructura de la red en la que se requiere implementar este protocolo de sincronismo forma parte en la RAN (Radio Access Network) del cliente y consiste en una red de tipo anillo como se indica en la Figura 4-1 y será descrita a continuación.

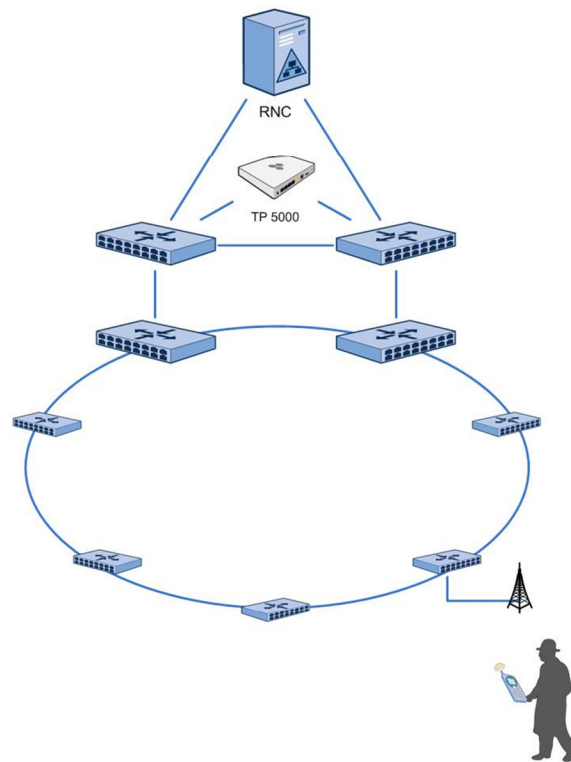


Figura 4-1 Topología utilizada por el Cliente.

El RNC (Radio Network Controller, por sus siglas en inglés) se conecta a dos “Routers” en la parte del RAN que son llamados “High-RAN”. Estos “routers” están en la parte central (“Core”) de la RAN y tienen una mayor capacidad de procesamiento y transferencia de la información. Estos a su vez se conectan con dos “Mid-RAN”. En estos “Routers” nacen los anillos de la red que son conformados por no más de cinco “Low-RAN” o CSR (Cell Site Router) los cuales deben recibir y entregar sincronismo a los Nodos b y eNode-b..

Un anillo físico consiste básicamente en una malla de fibra óptica existente para la Red HFC y la red corporativa, sobre la cual el cliente realizó un análisis de convergencia, acceso y factibilidad

de interconexión con los sitios móviles donde se encuentran las estaciones Bases 2G, 3G y LTE a futuro.

Para realizar las pruebas se considera una maqueta simulando una estructura de red con tres CSR conformando el anillo, esto permite que las pruebas sean lo más cercano a la realidad.

4.2 Criterios de sincronismo para redes LTE.

Los criterios a tomar en cuenta en la red consideran los requerimientos de sincronismo para una Red LTE FDD. Estos son los más estrictos en lo que se refiere a las tecnologías utilizadas por el cliente (2G, 3G y LTE) y por ende, cumple con el resto de los requerimientos.

Los requerimientos mínimos los podemos encontrar en la referencia [9], donde se indican los que son válidos para LTE FDD dentro de la Red Backhaul (± 16 ppb) e Interfaces de Aire (± 50 ppb). Estos requerimientos son los mismos que encontramos en la referencia [3].

Por lo tanto, se debe conocer el rendimiento de la red Backhaul existente para confirmar si la cantidad de saltos a realizar en la estructura de la red actual permiten el funcionamiento del PTP ya que la red donde se requiere implementar este proyecto es en la red RAN la cual pertenece a la Red de retorno y abarca un rango más preciso de 16 ppb.

4.3 Características mínimas del PRC

Las características a considerar para nuestra Referencia de Reloj Primaria (PRC) se describen en el documento de la ITU G.811. Se trata de un reloj autónomo, que debe asegurar una entrega de sincronismo casi perfecto. Estos límites son los más estrictos debido a que al tratarse de la referencia de reloj primaria. Varios elementos de la red van a depender de él. Es más, si no se tiene al reloj principal sincronizado, toda la red no lo estará, afectando los servicios que se ejecuten en los equipos dependientes del reloj primario de referencia. Adicionalmente, se considera un PRC a un reloj que se ajusta recibiendo sincronismo desde un sistema satelital (GPS por ejemplo).

Se indica que el offset aceptable a largo plazo para la frecuencia de un reloj de “Stratum” 1 es de 1×10^{-11} cuando sólo un PRC está operando en la Red.

Para las pruebas y para la red en la que se pretende aplicar este proyecto, la referencia para el PRC será obtenida mediante GPS. De esta forma, se obtiene una precisión mejor a la que se logra desde una fuente alternativa de 2MHz o recuperada de una red SDH.

Los límites que no pueden ser sobrepasados para el ruido generado a la salida de la interfaz medida en el equipo que entregará sincronía, están definidos para una medición MTIE, para cumplir con los requerimientos mínimos de estabilidad del PRC para una medición del retardo (Wander) a un tiempo determinado de la medición.

Las relaciones que representan estos límites para el ruido están representadas gráficamente en la Figura 4-2.

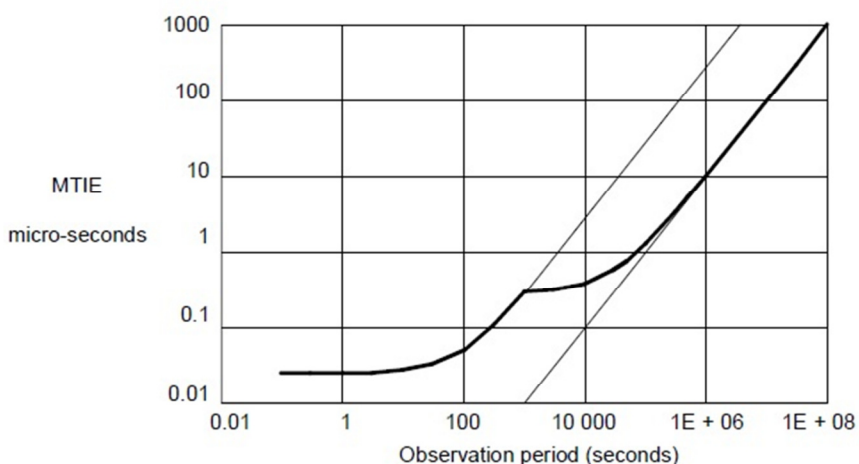


Figura 4-2 Función MTIE de una observación en un periodo τ en una interface PRC, [11].

En forma resumida, al realizar una medición MTIE, la curva esperada debe estar por debajo de la curva estandarizada en la Figura 4-2 para que el reloj del PRC esté dentro del margen permitido y la prueba resulte satisfactoria. De esta forma se confirma la entrega de una referencia estable y confiable para los demás elementos de la red que van a utilizar esta referencia de sincronismo.

4.4 Características mínimas para SDH Equipment Clock.

Los requerimientos para el CSR se describen en el documento de la ITU G.823 para redes jerárquicas de 2048 Kbit/s, sección 6.2.3. Esto debido a que se debe sincronizar en la última milla a través de una trama E1 hacia el nodo b. Si bien el sincronismo se entrega mediante

paquetes dentro de la red de retorno, el salto de última milla se realiza mediante una interfaz de trama E1.

Los límites para el ruido generado a la salida del CSR también están definidos y se representan en la Figura 4-3:

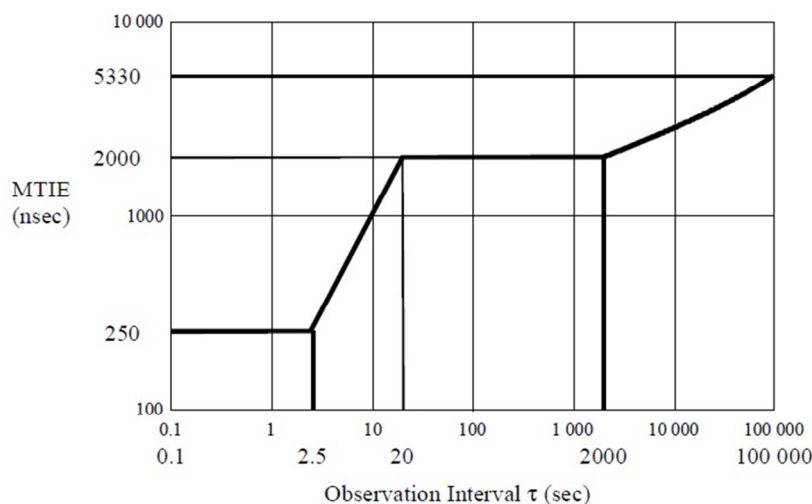


Figura 4-3 Función MTIE de una observación en un periodo τ en una interface SEC, [12].

Esto quiere decir que al realizar una medición MTIE, la curva esperada debe estar por debajo de la curva estandarizada en la Figura 4-3 para que el reloj esté dentro del rango permitido y la interfaz (tipo SEC) cumpla los requerimientos establecidos, entregando así una referencia estable y confiable para los demás elementos de la red que utilizarán esta referencia de sincronismo (Nodo b).

4.5 Capacidad de Holdover del CSR.

Para el caso de esta prueba, el CSR hace de maestro hacia el Nodo b. a su vez éste cuenta con un reloj de Stratum 3 en caso de que todas las referencias configuradas fallen. Para esta prueba un reloj de Stratum 3 no puede superar un corrimiento mayor a 4.6 ppm o perderá la sincronía. Es por esto que esta prueba permite medir el tiempo en que el “Router” es capaz de entregar una señal de referencia estable hacia el Nodo b luego de perder la referencia primaria.

En esta prueba se simula una falla en la red, aislando al equipo luego de que éste haya iniciado una sesión PTP estable con su referencia primaria (PRC).

La máscara con la cual se han de contrastar los datos que se obtengan en esta prueba es la que pone los límites al ruido para una señal de 2048 kbit/s. Con esto se mide la degradación temprana de la señal.

Cabe mencionar que estos valores son los mismos que han sido definidos por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute), institución equivalente a la ITU. Por lo tanto, se debe cumplir con ciertos valores teóricos para obtener resultados aceptables en las pruebas.

Los límites de ruido para una señal de 2048 kbit/s están indicados en la Figura 4-4.

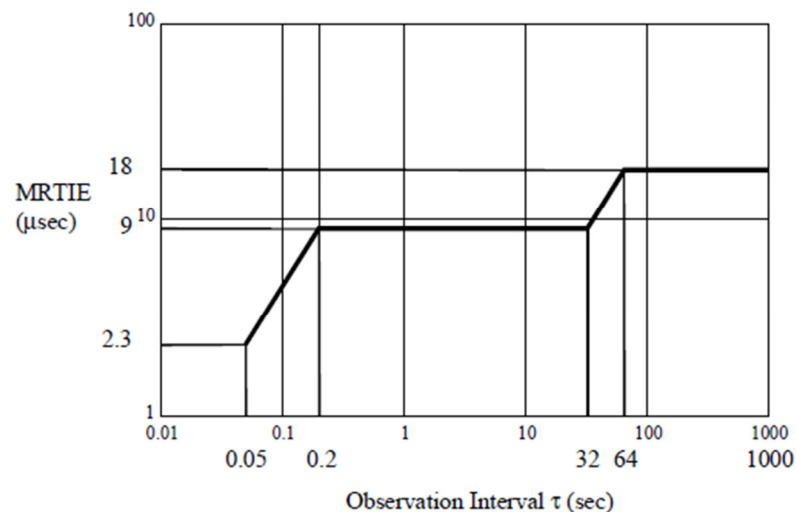


Figura 4-4 Representación gráfica de las ecuaciones para el límite de ruido en un periodo de observación τ en una interface de 2048 kbit/s, [12].

Capítulo 5 Procedimientos para realizar las Pruebas de Estabilidad.

Es este capítulo se explica el procedimiento para realizar las pruebas correspondientes:

- Estabilidad de frecuencia en el PRC.
- Estabilidad de frecuencia en el CSR enganchado al PRC (con referencia).
- Estabilidad de frecuencia en el CSR en modo “Holdover” (sin referencia).

Se debe respetar el orden de las pruebas, ya que éstas son dependientes de las anteriores y se deben mantener las referencias sincronizadas. En caso de que esto no suceda, las pruebas siguientes pueden resultar con las mediciones erróneas y los resultados no serán como los esperados para este proyecto.

Hasta ahora ya se han aclarado los límites que tienen los dos tipos de relojes para entregar un sincronismo acorde a la red y aplicaciones que se requieren. A continuación se describen las pruebas a realizar para comprobar que se cumplan estos requerimientos mencionados en la red de retorno. El principal objetivo es confirmar que el Reloj es válido para operar como fuente confiable hacia el Nodo b en la entrega de sincronismo. Por lo tanto, se pretende comprobar la estabilidad de frecuencia en el PRC y los CSR (Cell Site Router) ya que éstos son los que hacen de referencia para los Nodos b. Estas mediciones son requeridas debido a que un Nodo b tomará el sincronismo desde el CSR próximo, por lo que se requiere que el sincronismo entregado por los CSR sea una referencia estable y confiable. Así mismo se medirá la capacidad de Holdover que tiene el CSR. Esta otra prueba se realiza para comprobar que se cumple con el tiempo mínimo para que el CSR se mantenga con una frecuencia estable a pesar de no tener una referencia establecida.

Además de lo anterior, se debe considerar la topología de la red que se utiliza, ya que es una red anillada tal como lo indica la Figura 4-1 pero, para la realización de las pruebas, se utilizará una maqueta que simula la red operativa, la cual se puede apreciar en la Figura 5-1 de este documento.

El motivo por el cual se utiliza esta topología es debido a que el Cliente requiere mejorar su red de retorno, lo cual implica que se ha de instalar un “Router” de Agregación de Servicio en donde se requiera, respetando la topología, de forma que el “Router” agregue todo el tráfico TDM/E1 proveniente de las BTS/BS y LTE a futuro.

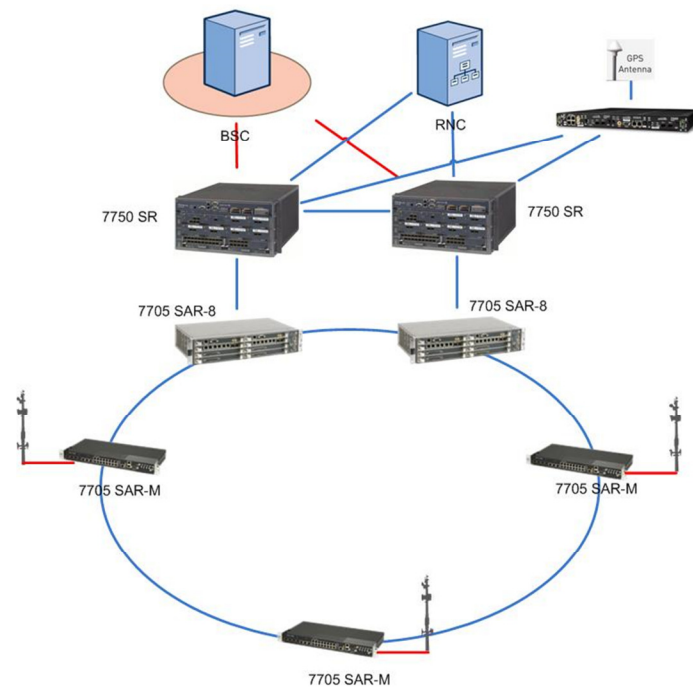


Figura 5-1 Topología de red utilizada para las mediciones.

5.1 Instrumentación.

Como se ha mencionado con anterioridad, se debe verificar la correcta entrega de la señal de referencia. Es por esto que se requiere utilizar un instrumento de medición que permita medir las variaciones de frecuencia (Wander) de la señal recibida. Adicionalmente, se requiere procesar esta información medida para obtener los valores de una medición TIE y/o MTIE pero, hoy en día existen en el mercado variados instrumentos que permiten esta función de forma automática en simples pasos, para lo cual se presentan 2 instrumentos que permitirán realizar la medición y dicho análisis.

5.1.1 Brilliant Instrument - BI220

Este equipamiento consiste en una tarjeta de conexión PXI, PCI o PCIe que puede ser instalada en una computadora y con el software correspondiente se pueden realizar las mediciones requeridas para este proyecto. La adquisición de esta herramienta se descarta debido a los costos del mismo, porque es más costoso. Otros factores que afectan a la decisión es que no permite mucha movilidad debido al tamaño de una computadora, por lo que se descarta esta alternativa principalmente debido a que a futuro se deben realizar pruebas en sitios operativos.



Figura 5-2 – Tarjeta Brilliant Instruments BI220 para analizador de intervalos de tiempo.

5.1.2 Advanced Network Tester - ANT-20

Un instrumento que permite realizar las mediciones requeridas es el ANT-20 (Advanced Network Tester) de JSDU y se puede adquirir como arriendo o compra. Es un equipo compacto y portable por lo que permite movilidad. Los análisis que se pueden realizar con este instrumento van desde un análisis de Jitter/Wander en redes SDH/SONET de velocidades de STM-64/OC-192 hasta realizar pruebas de sincronismo. Además, este equipo permite realizar un análisis TIE, MTIE y TDEV ya que dispone de una pantalla a color y memoria interna, evitando tener que transferir los datos a una computadora para luego recién ser procesados/analizados, es decir, entrega una medición en línea. Este equipo en sus características indica que tiene una precisión para medir el “wander” según los requisitos establecidos por la ITU-T en su recomendación

O.172 donde se indica la frecuencia de muestreo mínima para tener una precisión en las mediciones.

De esta forma, el ANT20 permitirá comparar la señal de referencia (la señal en el PRC) con la señal muestreada, obteniendo los valores MTIE para la red los cuales deberán ser contrastados con los valores teóricos establecidos por la ITU (característica que este equipo puede realizar comparando directamente con las máscaras teóricas establecidas por la ITU).



Figura 5-3 Instrumento de Medición ANT20.

En resumen, en este proyecto se utilizará el instrumento ANT20 por las siguientes razones:

- Movilidad y portabilidad, debido a que el cliente requiere realizar pruebas en sitios en funcionamiento.
- Es más asequible económicamente, debido a que se puede hacer arriendo del equipo por el periodo que duren las pruebas.
- No se requiere la compra o arriendo de una licencia de software.

5.2 Medición estabilidad de Frecuencia en el PRC.

En esta prueba se verificará la estabilidad de frecuencia requerida en el PRC. El PRC es la referencia que permite a la red operar correctamente evitando los errores por falta de sincronismo, por lo tanto, debe entregar una referencia estable y confiable. (Esto debido a que todos los CSR dependen de esta referencia y a su vez los Nodos b dependen de la referencia de los CSR).

Los límites de máximo error de tiempo (MTIE) para esta medición fueron establecidos en la sección 4.3.

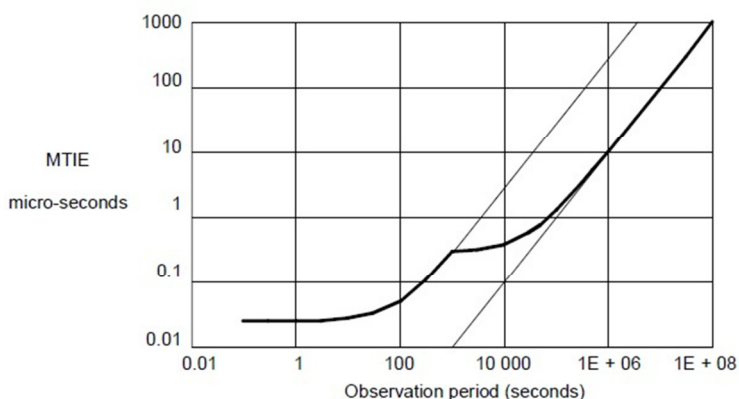


Figura 5-4 Máscara de límite para contrastar la medición a la salida del PRC.

La medición se debe realizar en una de las interfaces del PRC que van hacia el CSR y la señal proveniente de la red GPS, para comparar y confirmar que la señal de referencia que el PRC entrega al CSR es correcta y permitirá que el CSR y en definitiva, todos los elementos de la red, se mantengan sincronizados con una referencia confiable.

Para la realización de esta prueba, se debe mantener sincronizado previamente el PRC a la Red GPS (en este caso se utiliza un equipo TP5000 el cual será nuestro PRC y recibirá como referencia externa primaria la señal desde GPS) y se debe verificar (mediante comandos) que el PRC se encuentra enganchado al momento de realizar la medición (como una forma básica de demostrar estabilidad).

La medición se realizará en 2 puntos y consiste en comparar la señal entregada por GPS hacia el PRC con la señal entregada por el PRC hacia la red por una duración superior a 12 horas, con el

fin de tener una muestra de datos confiable. Un punto es a la salida de una de las interfaces del PRC y el otro punto es en la recepción directa a la red GPS. Tal como se indica en la Figura 5-5. La interfaz a la salida del PRC ha de ser configurada para que entregue la señal de referencia. Ambos puntos de medición serán capturados por el equipo de medición ANT-20 el cuál procesará estos datos y nos entregará la gráfica MTIE para su posterior comparación con los datos teóricos.

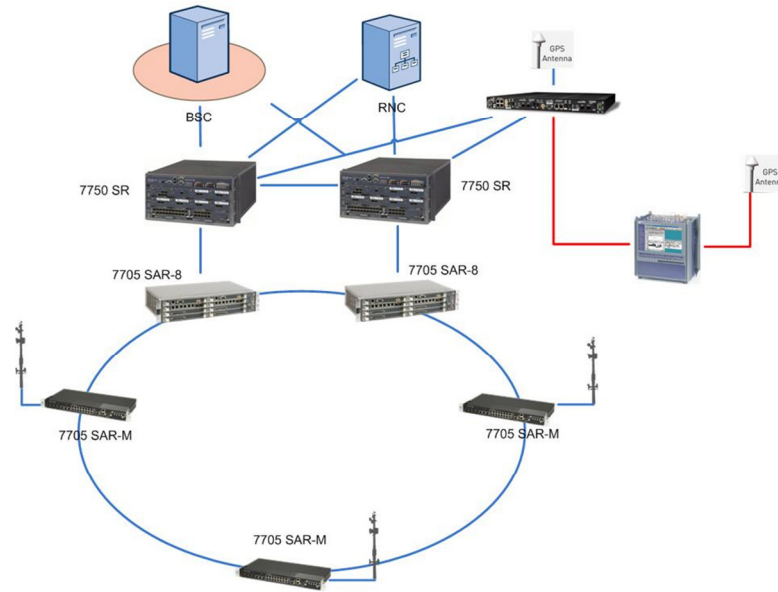


Figura 5-5 Diagrama de prueba de medición en PRC.

Al realizar el registro del ruido derivado de la variación de las dos señales medidas (Wander), se procede a generar una gráfica MTIE que debe estar bajo los valores de la curva ya indicada en la sección 4.3. Cumpliendo con esos requisitos la referencia es considerada estable y la prueba se puede finalizar satisfactoriamente.

De no cumplir con estos requisitos, el resto de las pruebas no son viables debido a que se estaría trabajando sobre una base errada, por lo tanto es primordial que esta prueba resulte satisfactoria.

5.3 Medición estabilidad de Frecuencia en el CSR.

En esta prueba se pretende verificar la estabilidad de frecuencia requerida en el CSR. Es decir, la señal que será entregada desde el “router” hacia el Nodo b. De forma similar a la prueba anterior, se debe tener sincronizado el PRC con la red GPS y a su vez el CSR con el PRC, en donde la medición se realiza en la salida del CSR (puerto de trama E1 configurado previamente) la cual será contrastada con la señal GPS de referencia. En este caso también se utiliza un equipo TP5000 como PRC. Sin embargo, en este caso se opera con una máscara menos estricta que en el caso anterior y esto es debido a que el CSR tiene otro tipo de reloj interno (Stratum 3) el cual es menos preciso para seguir la referencia. Adicionalmente esto es posible porque los elementos de la red que dependerán de este reloj son mucho menos y sus requerimientos son menos estrictos. Esto se puede apreciar claramente en la Figura 5-7, por lo que puede ser medida en el “router” que tenga un salto desde el PRC o en el “router” al final del recorrido.

Cabe destacar que la prueba anterior debe tener un resultado satisfactorio para poder realizar esta segunda prueba, debido a que si el PRC no entrega una señal de sincronismo estable hacia el CSR, este último difícilmente podrá pasar la prueba ya que los resultados obtenidos ya vendrán erróneos, por lo tanto, al contrastarlos con la máscara correspondiente difícilmente estarán dentro del rango permitido.

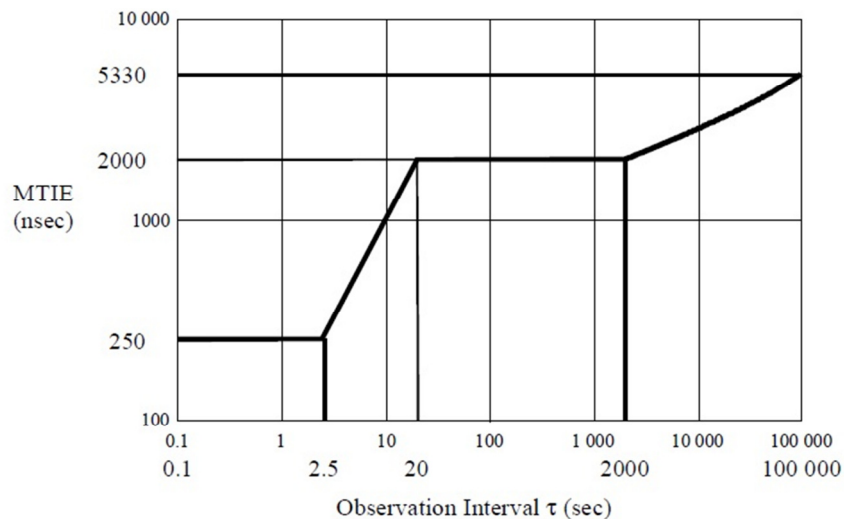


Figura 5-6 Máscara de límite para contrastar las mediciones a la salida del CSR.

Para realizar esta prueba se debe configurar el “Router” (CSR) iniciando una sesión PTP con el TP5000 (PRC) directa, de forma que el “Router” utilice el BMCA para identificar al PRC como maestro. Además, se debe configurar un puerto del “Router” para habilitar la entrega de la señal de sincronismo a través de una trama E1 hacia el equipo ANT-20 utilizado para realizar la medición. Esta señal debe ser muestreada en conjunto con la señal directa recibida a través de GPS (ver Figura 5-7). Se acuerda realizar esta prueba por lo menos durante 4 horas, para luego realizar el análisis MTIE que permite generar una gráfica cuyos valores deben estar bajo los indicados en la máscara para interfaces SEC, Figura 5-6.

Adicionalmente, se verifica que el estado del CSR sea “Locked”, lo cual indica que el “Router” se mantiene sincronizado hacia su referencia.

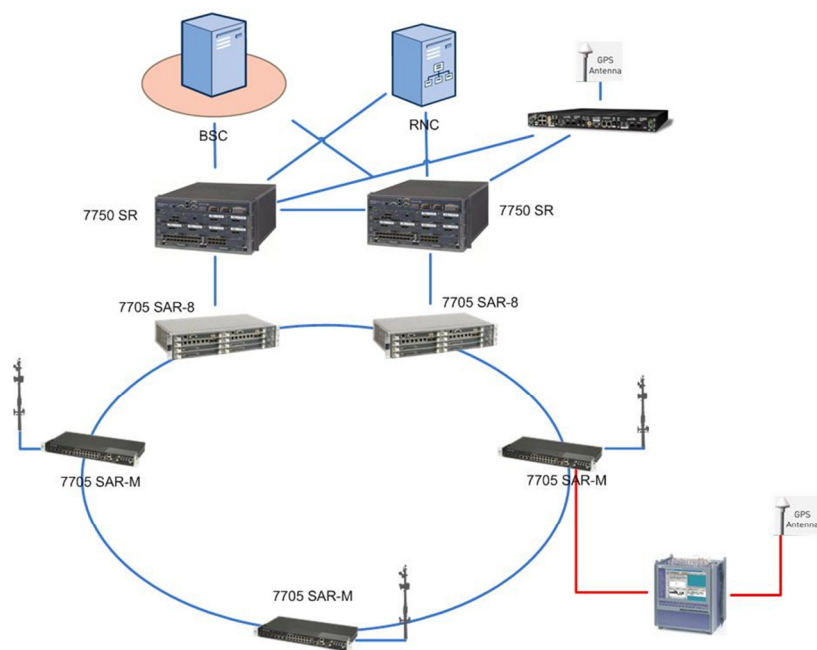


Figura 5-7 Puntos de medición para verificar estabilidad de frecuencia en el CSR.

En esta prueba también se mide la estabilidad en frecuencia del CSR, pero en este caso se debe medir el tiempo que éste es capaz de mantener una frecuencia estable respecto al PRC, es decir, que no varíe más de 4.6 ppb según lo establecido, sin estar sincronizado hacia otro Reloj Maestro. Para realizar esta prueba se debe tener previamente sincronizado el CSR hacia el PRC de forma de evitar que exista offset de frecuencia entre el reloj Maestro-Esclavo. A su vez el PRC deberá estar sincronizado con la red GPS.

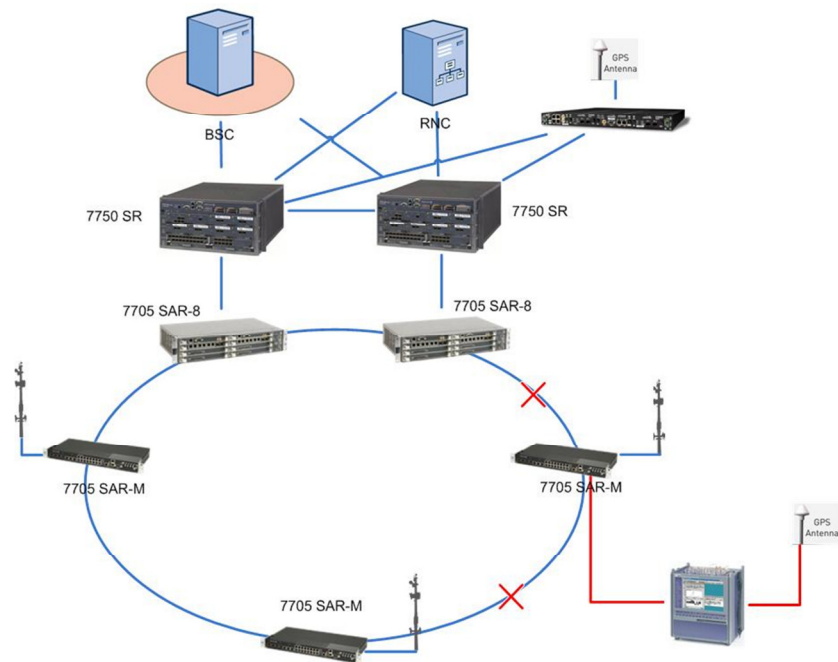


Figura 5-8 Topología de Red utilizada para medición de Holdover.

Esta prueba se realizará desconectando la sesión PTP en el CSR para que pierda la referencia hacia el PRC (una forma simple de realizar esto es aislándolo de la red desconectando los puntos indicados en la Figura 5-8, simulando una falla/corte en la Red): De esta forma queda operando con su propio reloj (interno) y debe entrar en estado “Holdover”, para luego dar inicio a la medición. De esta forma se debe comparar la señal medida a la salida del CSR respecto a la señal

de referencia GPS. Para esto se utilizará un puerto de una trama E1 a la salida del CSR y la señal directa del GPS como referencia (recuperada con un equipo ANT-20) al igual que en las pruebas anteriores.

Para esta prueba se utiliza la máscara G.813 de la ITU-T donde se indican los límites. El resultado esperado es el mayor tiempo posible que el equipo pueda mantenerse sincronizado por sí mismo. La máscara límite a contrastar se indica a continuación:

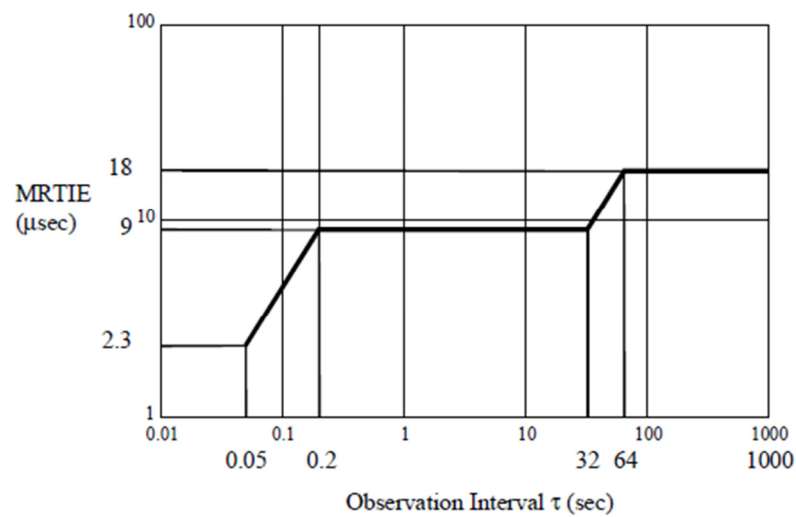


Figura 5-9 Máscara de límite para las mediciones de Holdover.

Capítulo 6 Resultados de Mediciones y Análisis de Datos.

En este capítulo se analizan los datos/gráficas obtenidas en las mediciones realizadas con el fin de determinar si el equipo en cuestión es apto para la entrega de sincronismo a los demás elementos de la red que lo requieren. Por lo tanto, para validar los resultados se aplicarán todos los criterios ya mencionados en los capítulos anteriores.

6.1 Análisis de datos para medición de estabilidad en PRC con referencia a GPS.

Los resultados de la medición que permite medir la calidad de la señal de sincronismo entregada por el PRC (en este caso el TP5000 utilizado) se muestran a continuación, en la Figura 6-1 para la medición TIE y en la Figura 6-2 para la medición MTIE. Se compara la medición MTIE con la máscara indicada en el Capítulo 4. Las muestras tomadas son procesadas por el mismo instrumento de medición, el cual permite contrastar inmediatamente las muestras con la máscara seleccionada, en este caso se utiliza la máscara G.811 para interfaces de PRC. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 6-2.



Figura 6-1 Gráfica obtenida de la medición TIE para interfaz PRC

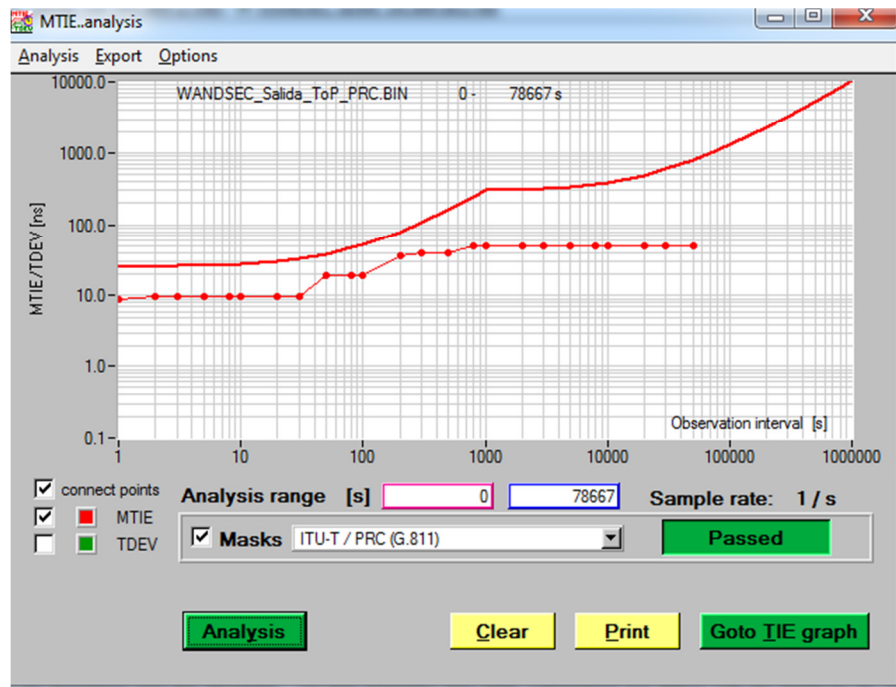


Figura 6-2 Gráfica obtenida de la medición MTIE para Interfaz PRC.

En la Figura 6-2 podemos ver dos gráficas: la gráfica roja con puntos es la curva que representa las muestras tomadas de la medición y debe tener valores inferiores a los de la curva de la máscara, la cual está indicada con una línea roja continua.

Se puede apreciar que al comienzo de la medición, la diferencia entre la señal teórica y la señal medida está cerca de los límites permitidos, pero a medida que avanza la prueba el equipo se estabiliza y la señal se mantiene estable, quedando muy por debajo de los rangos permitidos.

Como se trata de una medición MTIE, la señal analizada solo puede mantenerse o aumentar, ya que se está midiendo el máximo intervalo de error, por lo tanto, esta prueba tiene una muy buena respuesta.

Este resultado permite aprobar la prueba y validar el equipo (en este caso el TP5000). Este equipo se considera apto para la entrega de sincronismo ya que la señal entregada es estable al estar por debajo de los límites mencionados, por lo tanto, es un “Grand Master” apropiado para sincronizar la red.

6.2 Análisis de datos para medición de estabilidad en interfaz SEC.

Los datos obtenidos en esta medición se muestran en la Figura 6-3 para la medición TIE y en la Figura 6-4 para la medición MTIE.

Al igual que en el caso anterior, la medición TIE muestra el desfase de la señal a medir (en este caso, la del equipo) en relación a la señal de referencia (la obtenida mediante GPS), pero para poder analizar los resultados se debe utilizar la medición MTIE como lo indica la ITU, la cual muestra el valor máximo de desfase que se ha detectado en un intervalo de tiempo.

La señal de sincronismo entregada por la interfaz del “router” se procesa y se representa de forma sencilla en el gráfico MTIE (Figura 6-4), donde se aprecia el valor máximo que adquiere el error a medida que transcurre el tiempo de medición. La Figura 6-4 tiene dos curvas, la de línea continua es la gráfica teórica propuesta en el capítulo 4.4 (ver Figura 4-3) y la punteada son los datos obtenidos en la medición.

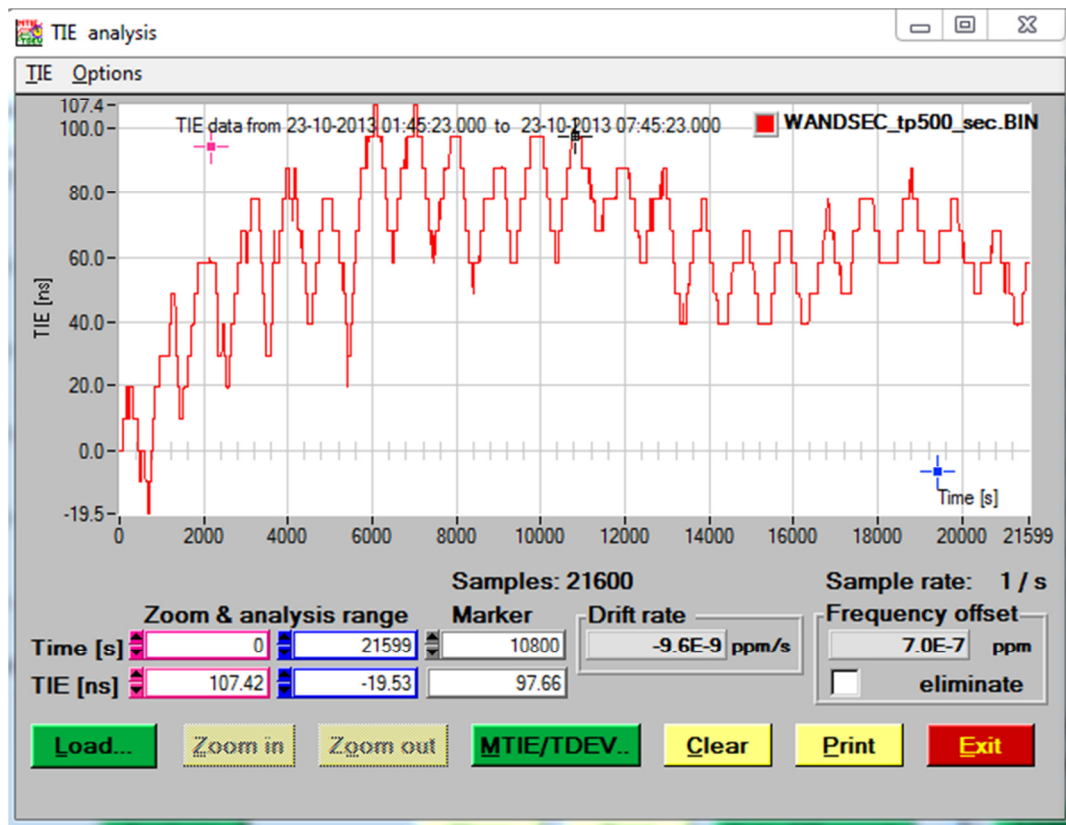


Figura 6-3 Medición TIE en el CSR para la estabilidad de Frecuencia en interfaz SEC.

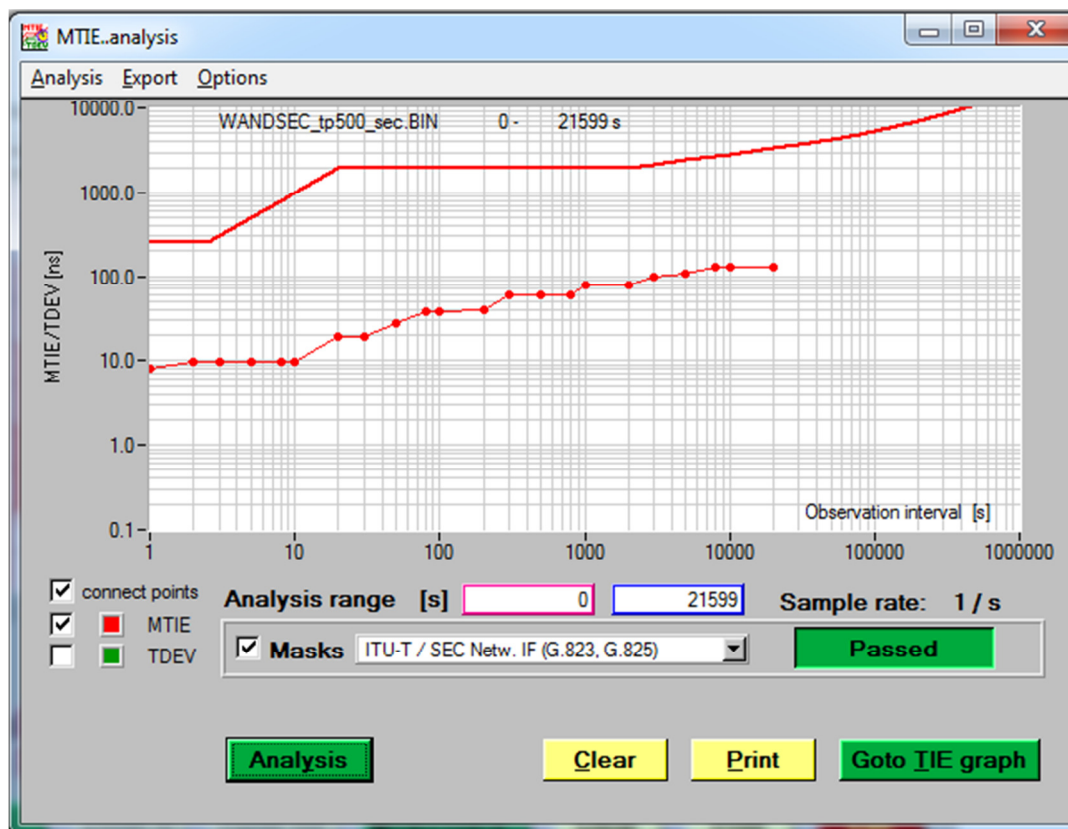


Figura 6-4 Medición MTIE en el CSR para la estabilidad de Frecuencia en interfaz SEC.

Los valores de la medición se encuentran bajo la máscara, por lo tanto, se deja en evidencia que el equipo entrega una señal de referencia estable, sin embargo, la estabilidad del reloj de este equipo es menor al del PRC (medición anterior). Esto se aprecia claramente debido a que el valor máximo de error no se estabiliza, dejando en evidencia que es un reloj de menor calidad, y si bien aumenta el error, éste se mantiene dentro de los valores permitidos.

Este resultado refleja que la señal de sincronismo entregada por el CSR es correcta ya que entrega una referencia confiable, estable y acorde a los parámetros necesarios para lograr una estabilidad hacia el siguiente elemento de la red (en este caso el Nodo B). De esta forma, se confirma que la entrega de sincronismo mediante el protocolo PTP es confiable, ya que, se cumple con los requisitos mínimos necesarios.

6.3 Análisis de datos para medición de Holdover en el CSR.

La tercera prueba mide la duración en que la calidad de la referencia entregada por el Reloj del CSR hacia el Nodo b es estable al momento en que se pierde la conexión con la referencia. Un método simple de lograr esto es desconectando el CSR de la red (aislándolo) y realizar la medición en este punto y tomar la señal de referencia de la señal GPS.

Al desconectar el CSR de la red, éste pierde la sesión con el GM y se inicia la medición ya que pasa a estado “Holdover”. Esta medición se realiza por aproximadamente 25 horas tal como se aprecia en la Figura 6-5. Por decisiones del cliente se solicita realizar esta prueba, no en la maqueta de laboratorio, sino que en un sitio en operaciones, por lo que se realizan ésta y la siguiente prueba en “terreno”, motivo por el cual no es posible participar en la realización de la misma. Por esta razón, las imágenes de esta prueba (difusas) no son las obtenidas directas del equipo ANT-20, sino que fueron facilitadas por el ingeniero Sergio Rojas Möller en formato PDF, a quién se agradece por esta gestión.

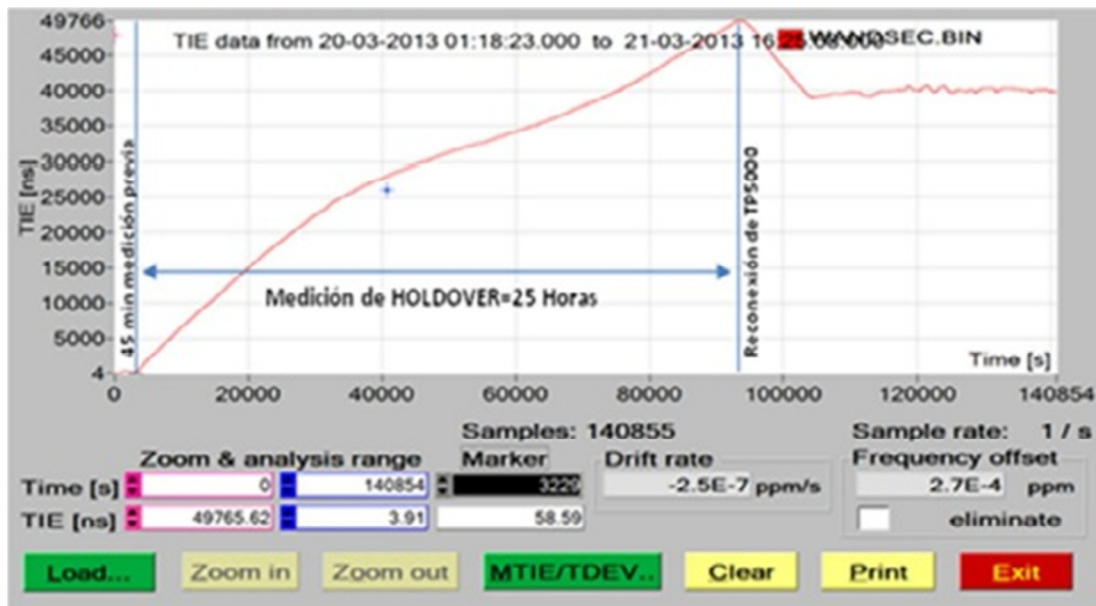


Figura 6-5 Medición TIE para la prueba de Holdover.

Adicionalmente, se obtiene la medición MTIE, la cual nos permite comparar inmediatamente con la máscara indicada en el marco teórico en el capítulo 4.5. Este resultado se puede apreciar en la Figura 6-6:

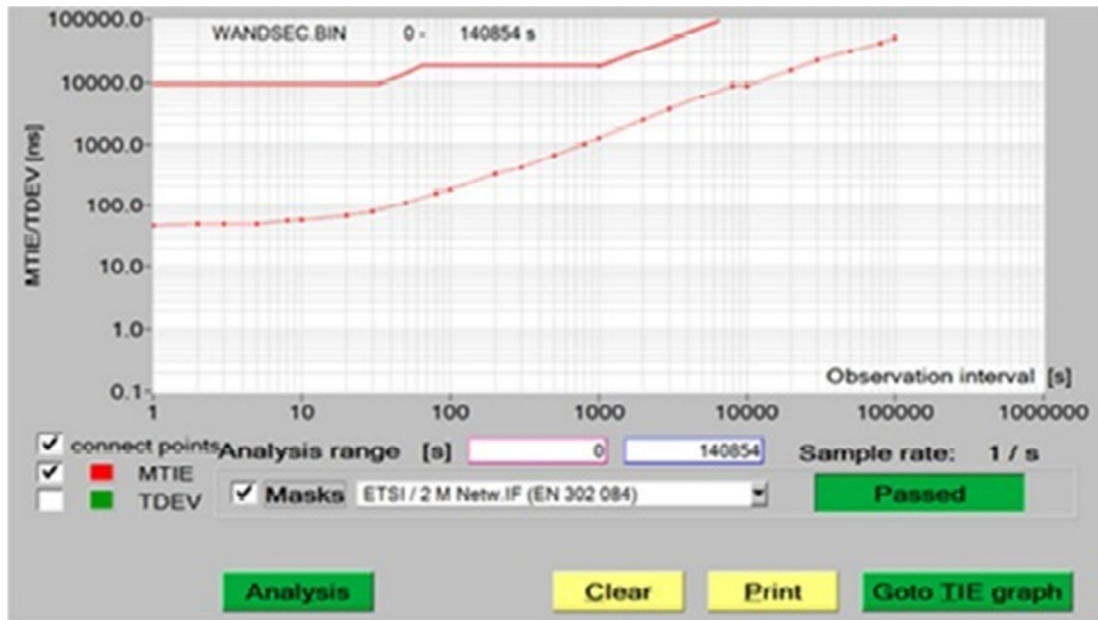


Figura 6-6 Resultados de la medición MTIE para Holdover del equipo.

Como se puede concluir de los resultados, los valores de la señal están dentro del rango permitido, es decir, la señal es estable y es apta para la entrega hacia el Nodo b y permitir a éste seguir funcionando a pesar de que el equipo presente problemas de conexión a la red. Obviamente hay que mencionar que hay que tener sincronizado al equipo para que su referencia esté “enganchada” previo a la falla. Si bien no se calcula el tiempo exacto en que el equipo permanece entregando una señal de referencia estable, el cliente queda conforme con que el equipo permanezca estable al menos 24 horas y que el cliente cuente con un reloj capaz de mantener la calidad de la señal de sincronismo. (Cabe mencionar que se realiza una medición no formal de la estabilidad del equipo y se observa que hay estabilidad por lo menos durante 2 días).

CONCLUSIONES

El actual incremento del tráfico en la telefonía móvil hace necesario el cambio de la red de retorno a una de mayor capacidad y la solución tecnológica actual a este problema es una red Giga Bit Ethernet. Sin embargo, el uso de Ethernet implica la pérdida de sincronismo entre nodos, situación que no es tolerable en conexiones móviles que exigen traspaso de conexiones de un nodo B de la plataforma comunicacional a otro para no perder la cobertura de un terminal móvil. En este proyecto de título se considera como solución para alcanzar el sincronismo deseado el uso de Precision Time Protocol (PTP).

Para ello se describe el funcionamiento del PTP, destacando sus ventajas y desventajas respecto de otras alternativas y se prueba un procedimiento para validar los equipos a utilizar en esta nueva red Ethernet. Este procedimiento considera el estándar IEEE 1588v2 para la tecnología de sincronismo basado en paquetes y en el cual se detalla los requerimientos mínimos que se deben cumplir respecto de la precisión de la señal de reloj recibida, respetando los niveles de ruido permitidos a la salida de las interfaces que entregan sincronismo. Se considera en todo momento la topología de la red a utilizar, indicando así los puntos estratégicos a medir, con el criterio de mantener siempre un muestreo de la señal de referencia “nueva” y la señal de referencia original.

Para la medición de este tipo de señales se selecciona el instrumento de medición ANT-20, diseñado para operar hasta 10Gbps con diferentes protocolos – como SDH/SONET, ATM y Ethernet, con el fin de determinar el jitter y wander acorde a las recomendaciones de la ITU-T O.172. La solución permite realizar las pruebas en cualquier sitio del cliente, un proveedor de servicios de comunicaciones para terminales móviles de la región metropolitana de Santiago.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas sobre una red de 3 nodos, tanto en el reloj primario como en los de equipo, permite establecer el cumplimiento de ésta con los límites de ruido generado a la salida de la interfaz. Adicionalmente se puede destacar que luego de realizar una prueba para verificar la correcta entrega de sincronismo a la red, se deben analizar los resultados obtenidos inmediatamente, ya que realizar toda la secuencia de pruebas sin este análisis puede llevar a un resultado erróneo, donde un Nodo b puede aparecer como “sincronizado” al revisar su estatus, pero al analizar las mediciones MTIE estas no cumplen con

los requerimientos. En resumen, hay que tener precaución al capturar este tipo de pruebas ya que al tomar las muestras del reloj principal, y luego realizar las siguientes pruebas sin analizar los resultados de las pruebas anteriores, suceden este tipo de errores que conllevan a tener que reiterar las pruebas fallidas.

Una prueba pendiente y no menor, es analizar la cantidad de “saltos” de equipos que se pueden realizar desde la fuente al destino, ya que en nuestra estructura de red la cantidad de equipos no implicó gran problema, pero para otra estructura de red debería aplicar esta prueba.

Relacionado a lo anterior, y no menos importante, es que estas pruebas son válidas para calificar cualquier equipamiento que se desee utilizar para la entrega de sincronismo en la red de retorno, si y solo si los resultados son satisfactorios y no superan los valores límites.

La siguiente fase del proyecto que lleva adelante la empresa considera la integración de eNodes-B para la implementación de sitios LTE, fase que no contempla la descripción de este documento, pero que actualmente se encuentra operando exitosamente, gracias a los resultados obtenidos en este proyecto. Contar con esta solución facilita la negociación con otras empresas, ya que se puede reportar la implementación exitosa en la red del cliente donde se efectuó este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pramila A, Sasindran M. Prabhu, “Migrating to Carrier Ethernet in Mobile Backhaul”. Julio 2009.[en línea]
<http://www.techmahindra.com/Documents/WhitePaper/Whitepaper_CEinBackhaul_10Jul.pdf>
[consulta: 5 Mayo 2013]
- [2] Metro Ethernet Forum, “Packet Synchronization over Carrier Ethernet Networks for Mobile Backhaul”, Enero 2012. [en línea]
<http://metroethernetforum.org/PDF_Documents/MEF-for-Mobile/Package%20Synchronization%20over%20Carrier%20Ethernet%20Networks%20for%20MBH%202012021.pdf> [consulta: 5 Mayo 2013]
- [3] Metro Ethernet Forum, “Synchronization for Mobile Backhaul”, Diciembre 2010. [en línea]
<http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/MEF-MBH_Synch_HaughHirdRam-Draft_101208_1725_1.pdf> [consulta: 5 Mayo 2013]
- [4] R.G. Kaduskar, A.D. Kavishwar, “Mobile Backhaul Network”, 2011. [en línea]
<<http://www.ipcsit.com/vol4/39-ICINT2011T30357.pdf>> [consulta: 5 Mayo 2013]
- [5] IP/MPLS Forum Technical Committee, “MPLS in Mobile Backhaul Networks, Framework and Requirements, Technical Specification”, Octubre 2008. [en línea]
<<http://www.broadband-forum.org/technical/download/ipmpls/IPMPLSForum20.0.0.pdf>>
[consulta: 5 Mayo 2013]
- [6] ITU-T G.8261, “Timing and Synchronization aspects in packet networks”.
- [7] Metro Ethernet Forum, “Optimizing Mobile Backhaul”, Enero 2012. [en línea]
<http://metroethernetforum.org/PPT_Documents/CarrierEthernetforMobileBackhaul.ppt>
[consulta: 5 Mayo 2013]
- [8] Calnex Solution Ltd, JSDU. “Implementing IEEE 1588v2 for use in the mobile backhaul”, 2009. [en línea]

<http://www.jdsu.com/ProductLiterature/IEEE1588v2_wp_cpo_tm_ae.pdf> [consulta: 5 Mayo 2013]

[9] Barry Dropping, Symmetricom. "Synchronization Distribution Architecture for LTE Networks", Mayo 2012. [en línea]

[10] G. M. Garner, "IEEE 1588 Version 2", September 2008. [en línea]

<<http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2008/as-garner-1588v2-summary-0908.pdf>>
[consulta: 5 Mayo 2013]

[11] ITU-T, G.811 "Timing characteristics of primary reference clocks", Seccion 6-1, 1997.

[12] ITU-T, G.823 "The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy", 2000.