

ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**“CRITERIOS DE DISEÑO Y PLANEAMIENTO DE
REDES DE SINCRONISMO EN SERVICIOS DE
TELECOMUNICACIONES”**

ERWIN ANTONIO BARRIGA PÉREZ

**Sangolquí - Ecuador
2008**

CERTIFICACION

Certificamos que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por el Señor Erwin Antonio Barriga Pérez, bajo nuestra dirección como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Electrónico.

Quito, Febrero de 2008

Ing. Carlos Usbeck W.

DIRECTOR

Ing. Fabián Sáenz

CODIRECTOR

RESUMEN

El presente proyecto tiene como fin establecer los criterios necesarios para el diseño y planeamiento de las redes de sincronismo en los sistemas de telecomunicaciones investigando los requerimientos de sincronismo así como las distintas alternativas tecnológicas disponibles para la sincronización de redes de telecomunicaciones.

Para esto se analizaron los conceptos básicos que de una u otra manera están involucrados en la sincronización de redes y que fundamentan la necesidad de sincronizarlas. Se plantearon los distintos requerimientos particulares de sincronismo que tienen los diversos tipos de redes de telecomunicaciones así como las estrategias desarrolladas para afrontarlos.

Además se estudiaron las distintas arquitecturas existentes para las redes de sincronismo donde se precisaron los elementos que las componen y la manera de enlazarlos. También se presentaron las normas internacionales, tanto europeas como americanas, que rigen a las redes de sincronización.

Finalmente se especificaron las pautas necesarias a considerarse para el diseño y planeamiento de una red de sincronismo basándose en las recomendaciones internacionales que definen los requerimientos de sincronismo de las redes SDH. También se tomo en cuenta dentro de los parámetros para el diseño los conceptos de gestión y seguridad de red. Además, se expusieron dos ejemplos de redes sincronizadas.

DEDICATORIA

A mis padres Erwin y Tania, a Lillian Payor y a Jean Vogel

AGRADECIMIENTO

A mi familia, en especial a mis padres por el apoyo, dedicación, cariño y los genes.

Al Jefe, el Ing. Carlos Usbeck por el inmenso apoyo y confianza que a tenido en mi persona y por toda su ayuda y guía para la elaboración de este proyecto, muchas gracias.

Al Ing. Fabián Sáenz, Codirector de tesis por su ayuda para la realización de este trabajo.

A todos mis amigos y demás personas que de una u otra manera me han brindado su colaboración y estímulo permanente.

NO GRACIAS A

Quien haya decidido concatenar Geometría Descriptiva con Análisis

Matemático

PRÓLOGO

La sincronización de redes ha ido ganado importancia progresivamente en las telecomunicaciones a través de los últimos 30 años, especialmente desde que los sistemas de transmisión y conmutación evolucionaron a un entorno digital. De hecho, la calidad de la mayoría de servicios de valor agregado brindados por las operadoras de telecomunicaciones a sus clientes tales como video en tiempo real, accesos de alta velocidad a internet, videoconferencia, intercambio de datos encriptados entre Bancos, aplicaciones de multimedia, etc., se ve afectada por el desempeño de sus redes de sincronismo.

El despliegue de redes de datos basados en la conmutación de circuitos y en ISDN demandaron la necesidad de requerimientos más severos en el sincronismo. La sincronización de redes se convirtió luego en un aspecto trascendental para los operadores de red con el despliegue de redes SDH/SONET, las cuales impusieron nuevos y más complejos requerimientos en la estabilidad de los sistemas de sincronismo.

Más recientemente, se ha reconocido que la importancia de la sincronización de redes va más allá que satisfacer las necesidades de las redes SDH/SONET. Las redes ATM y de telefonía celular como CDMA, GSM, GPRS, UMTS son predominantes ejemplos donde se ha demostrado que la disponibilidad de referencias de sincronismo afecta la calidad del servicio.

La sincronización de redes consiste en la distribución de una referencia de tiempo y frecuencia a lo largo de una red de relojes, inclusive sobre un área geográfica extensa. El objetivo es de alinear las escalas de tiempo y frecuencia de todos los relojes, usando las capacidades de comunicación de los enlaces que los unen.

INDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	CONCEPTOS BÁSICOS.....	2
1.2.1	Señales de Reloj y señales Digitales.....	2
1.2.2	Relaciones de Tiempo entre señales digitales.....	4
1.2.3	Jitter y Wander.....	5
1.2.4	Modos de Transferencia Síncrono y Asíncrono.....	9
1.2.5	Taxonomía de las Técnicas de Multiplexado.....	10
1.3	SINCRONIZACIÓN EN LAS TELECOMUNICACIONES.....	11
1.3.1	Sincronización de Portadora.....	13
1.3.2	Sincronización de Símbolo.....	14
1.3.3	Sincronización de Trama.....	15
1.3.4	Sincronización de Bit.....	19
1.3.5	Sincronización de Paquetes.....	20
1.3.6	Sincronización de Redes.....	23
1.3.7	Sincronización de Multimedia.....	24
1.3.8	Sincronización de relojes de Tiempo Real.....	24
2	ARQUITECTURA DE LAS REDES DE SINCRONISMO.....	27
2.1	REQUERIMIENTOS DE SINCRONISMO DE LAS REDES DE TELECOMUNICACIONES.....	27
2.1.1	Requerimientos de sincronismo en redes FDM Analógicas.....	28
2.1.2	Requerimientos de sincronismo en redes digitales PDH.....	29
2.1.3	Requerimientos de sincronismo en las redes digitales SDH/SONET.....	33
2.1.4	Requerimientos de sincronismo de las redes de transporte ATM.....	36
2.1.5	Requerimientos de sincronismo de las redes telefónicas celulares inalámbricas.....	38
2.2	ESTRATEGIAS PARA LA SINCRONIZACIÓN DE REDES DE TELECOMUNICACIONES.....	40
2.2.1	Sincronización Plesiócrona.....	41
2.2.2	Sincronización Maestro – Esclavo.....	41
2.2.3	Sincronización Mixta Plesiócrona/Síncrona.....	44

2.2.4	Sincronización Mutua.....	45
2.3	ARQUITECTURAS ESTANDARD DE LAS REDES DE SINCRONIZACIÓN	46
2.3.1	Arquitectura de ETSI e UIT-T para las redes de sincronismo	47
2.3.2	Arquitectura de ANSI para las Redes de Sincronismo.....	53
3	ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA SINCRONIZACIÓN DE LOS	
	SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES	56
3.1	RELOJES	56
3.1.1	Fuentes de Frecuencia y Fuentes de Tiempo.....	57
3.1.2	Conceptos Básicos de la Calidad de los Relojes	57
3.1.3	Estabilidad	57
3.1.4	Exactitud.....	58
3.2	OSCILADORES DE CRISTAL DE CUARZO.....	59
3.2.1	Osciladores de Cristal Simples.....	60
3.2.2	Osciladores de Cristal controlados por Voltaje.....	63
3.2.3	Osciladores de Cristal de Temperatura Ambiente y Compensados en Temperatura.....	63
3.2.4	Osciladores de Cristal Controlados por Horno.....	65
3.2.5	Características y Desempeño de los Osciladores de Cristal.....	66
3.3	ESTÁNDARES DE FRECUENCIA ATÓMICOS.....	69
3.3.1	Principio de Operación Físico	69
3.3.2	Estándar de Frecuencia basado en el Haz de Cesio.....	71
3.3.3	Estándar de Frecuencia basado en el MASER de Hidrógeno	73
3.3.4	Estándar de Frecuencia basado en la Celda de Gas de Rubidio	75
3.3.5	Desempeño y características de los estándares atómicos de frecuencia.....	76
3.4	SISTEMAS DE POSICIÓN GLOBAL (GPS).....	77
3.4.1	Principio de operación de los GPS	77
3.4.2	Segmento Espacial	78
3.4.3	Segmento de Control NAVSTAR	81
3.4.4	Segmento del Usuario	82
3.4.5	Señales GPS NAVSTAR.....	83
3.4.6	Servicios de Posicionamiento NAVSTAR Estándar y Preciso	84
3.4.7	GPS Diferencial.....	85
3.4.8	Uso del GPS para la difusión de la Hora y de la Frecuencia.....	85

4	PARAMETROS PARA LA PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE SINCRONISMO	88
4.1	INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN DEL SINCRONISMO	88
4.1.1	Pautas Generales.....	89
4.1.2	Distribución de Sincronismo Intranodo: El concepto SSU/SASE/BITS	91
4.1.3	Pautas para la Distribución de Sincronismo Internodo	93
4.2	REQUERIMIENTOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE SINCRONISMO	94
4.2.1	Sincronización de las Redes de Transporte	95
4.2.2	Sincronización de la Redes Privadas	99
4.3	PLANIFICACIÓN DEL SINCRONISMO PARA REDES SDH.....	105
4.3.1	Distribución de la señal de referencia de sincronismo.	105
4.3.2	Requerimientos del reloj SSU	105
4.3.3	Requerimientos de los relojes de los elementos de red SDH	106
4.4	GESTION DE LAS REDES DE SINCRONISMO.....	106
4.4.1	Áreas Funcionales y Niveles de Abstracción de la Gestión de Red.....	107
4.4.2	Monitoreo del Desempeño de una Red de Sincronismo.....	110
4.4.3	Métodos para el Monitoreo del Desempeño de una Red de Sincronismo	111
4.5	PROTECCIÓN DE LA RED DE SINCRONIZACIÓN	113
4.5.1	Criterios para el Diseño de un Algoritmo de Protección de Sincronismo	114
4.5.2	Mensajes de Estado de Sincronismo	114
4.5.3	Mensajes de Estado de Sincronismo en Redes SDH.....	115
4.5.4	Mensajes de Estado de Sincronismo en Redes PDH.....	117
4.5.5	Ejemplo de una Protección Automática de Sincronismo en un Anillo SDH usando SSM.....	117
4.6	EJEMPLOS DE REDES SINCRONIZADAS	119
4.6.1	La red de Sincronismo de AT&T (USA).....	119
4.6.2	La Red de Sincronismo de Telecom-Argentina	121
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
6	ANEXOS	126
	ANEXO 1 – Introducción a la Sincronización de Tiempo Real.....	127
	ANEXO 2 – AAL ATM Adaptation Layer	133
	ANEXO 3 – General GPS Antenna Information	138
	ANEXO 4 – Datasheet SSU US5Ge Gillam-FEi	143
7	BIBLIOGRAFÍA	154

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.	Características Típicas y Datos de Desempeño de algunos Osciladores de Cuarzo (XO, RTXO, TCXO).	68
Tabla 3.2.	Características Típicas y Datos de Desempeño de algunos Osciladores de Cuarzo controlados por horno (OCXO).	68
Tabla 3.3.	Características Típicas y Datos de Desempeño de los Estándares de Frecuencia Atómicos.	76
Tabla 4.1.	Mensajes SSM para el uso en redes SDH según la UIT-T Rec. G.707.....	116

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Señales de reloj regular e irregular.....	3
Figura 1.2.	Taxonomía de las diferentes relaciones de tiempo entre las señales digitales.	5
Figura 1.3.	Señal Digital afectada por el Jitter.....	6
Figura 1.4.	Modulación de fase indeseada.....	6
Figura 1.5.	Modo de Transferencia Síncrono.	9
Figura 1.6.	Modo de Transferencia Asíncrono	9
Figura 1.7.	Taxonomía de las Técnicas de Multiplexado.	10
Figura 1.8.	Sincronización de símbolo en un receptor binario bandabase.....	14
Figura 1.9.	Delineación de trama en un flujo de bits	15
Figura 1.10.	Modelo de estrategia de alineamiento Markov – Chain.....	17
Figura 1.11.	Estrategia de sincronismo de trama en los sistemas SDH.....	18
Figura 1.12.	Jitter de paquetes a través de una red de conmutación de paquetes	20
Figura 2.1.	Transferencia de reloj a lo largo de la cadena de transmisión PDH.....	30
Figura 2.2.	Sincronización de bit y trama en la etapa de entrada de una central de conmutación digital PDH	31
Figura 2.3.	Sincronización de los equipos de conmutación digital para las redes PDH... ..	32
Figura 2.4.	Sincronización de dos centrales digitales a través de la cadena de transmisión PDH.	32
Figura 2.5.	Sincronización de dos centrales digitales usando unidades de distribución de sincronismo (SSU) a través de la cadena de transmisión PDH.	33
Figura 2.6.	Sincronización de los equipos de conmutación digital y transporte para las redes SDH.....	34
Figura 2.7.	Sincronización de dos centrales digitales usando unidades de distribución de sincronismo (SSU) a través de la cadena de transmisión SDH.	35
Figura 2.8.	Arquitectura general de las redes telefónicas inalámbricas celulares.....	38
Figura 2.9.	Estrategia de sincronismo Plesiócrona	41
Figura 2.10.	Estrategia de sincronización Maestro – Esclavo, topología de árbol y estrella	42
Figura 2.11.	Estrategia de sincronización jerárquica Maestro – Esclavo	43
Figura 2.12.	Sincronización Mixta Plesiócrona/Síncrona.....	44
Figura 2.13.	Sincronización Mutua.....	45
Figura 2.14.	Sincronización Mutua/Jerárquica.	46

Figura 2.15. Arquitectura para la distribución intranodo.....	50
Figura 2.16. Arquitectura para la distribución internodo.....	51
Figura 2.17. Cadena de Referencia de Sincronización de la ETSI e UIT-T.....	53
Figura 3.1. Ejemplos de estabilidad a largo y a corto plazo	58
Figura 3.2. Principios del efecto Piezoeléctrico.....	59
Figura 3.3. Graficas de Frecuencia vs. Temperatura para los tipos de corte más comunes	61
Figura 3.4. Curva de Estabilidad a Largo y a Corto plazo.....	62
Figura 3.5. Variación de la frecuencia con respecto a la temperatura de algunos RTXO... 64	
Figura 3.6. Ajuste de un TCXO para cumplimiento con las especificaciones a 25 °C..... 65	
Figura 3.7. Punto de mínimo cambio basado en la curva característica del cristal. 65	
Figura 3.8. Esquema del principio de funcionamiento del Haz de Cesio. 72	
Figura 3.9. Esquema del principio de funcionamiento del MASER de Hidrógeno activo . 74	
Figura 3.10. Esquema del principio de funcionamiento de la Celda de Gas de Rubidio.... 75	
Figura 3.11. Ubicación de las estaciones de monitoreo GPS NAVSTAR..... 81	
Figura 4.1. Lazo de Sincronización	90
Figura 4.2. Conexión típica de Repetidores Enlazados	92
Figura 4.3. Configuración de un reloj de referencia primaria.....	97
Figura 4.4 Errores en cadena de sincronismo en las redes privadas	101
Figura 4.5. Cambio dinámico de la distribución de sincronismo	104
Figura 4.6. Áreas funcionales y niveles jerárquicos de abstracción de la gestión de red	109
Figura 4.7. Monitoreo del desempeño del sincronismo en un reloj SSU/BITS de acuerdo con las estrategias (a) descentralizadas y (b) centralizadas.....	112
Figura 4.8. Protección del sincronismo en un anillo SDH usando SSM	118
Figura 4.9. Representación de la topología de la red de sincronismo de AT&T	120
Figura 4.10. Arquitectura de la Red de Sincronismo de Telecom-Argentina.....	122

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Muchas de las operaciones en los sistemas digitales deben obedecer una relación de precedencia. Si dos operaciones siguen alguna precedencia, entonces la sincronización se asegura de que estas operaciones sigan un orden correcto. A nivel de hardware, la sincronización se logra distribuyendo una señal común de referencia de tiempo a todos los módulos del sistema. A un nivel más alto de abstracción, procesos de software se sincronizan mediante intercambio de mensajes.

Dependiendo del campo de aplicación, se adoptan diferentes sistemas de abstracción, estructurados de manera jerárquica, donde cada nivel de abstracción se soporta sobre las características del nivel de abstracción inmediato inferior y esconde detalles innecesarios del nivel inmediato superior.

Los sistemas de hardware digital, a menudo se los estructura en niveles o capas de abstracción como la capa física, en donde el diseñador se preocupa de las leyes físicas que gobiernan las propiedades de los semiconductores; a nivel de circuitos, donde se trabaja con transistores, resistencias, etc.; a nivel de elementos, donde se enfoca en compuertas, puertos lógicos, etc.; a nivel de módulos, donde los elementos se agrupan en entidades más complejas como memorias, unidades lógicas, CPU's etc.

Los protocolos de comunicación, por otro lado, son implementados mediante módulos de software, estructurado en un modelo de capas también. Las pilas de protocolos son construidas de manera que un protocolo en un nivel determinado provee servicios a los protocolos de nivel superior y utiliza los servicios de los protocolos de

nivel inferior. En el modelo de referencia OSI, definido por la ISO, se apilan siete niveles de abstracción.

Estándares de nivel 1 (capa física) definen las interfaces físicas y entramado básico de bits, es decir específica como bits lógicos (1 y 0) son transmitidos por un medio físico, para proveer un canal de transmisión punto a punto. Estándares de nivel 2 (capa de enlace de datos) definen los protocolos que proveen por ejemplo un canal digital punto a punto libre de errores, basados en el canal digital de capa 1 a través de la retransmisión de tramas erradas o de técnicas de corrección de errores. Los protocolos de niveles superiores proveen, a un nivel de abstracción más alto, servicios de enrutamiento de red (capa de red), servicios de transporte a través de la red (capa de transporte) y así hasta llegar a los servicios provistos por las aplicaciones directamente al usuario final.

Sin importar el criterio de abstracción utilizado para describir el hardware y software del sistema, muchas son las entidades mutuamente correlacionadas, a cualquier nivel, cuyo correcto desempeño se basa en una coordinación temporal. Así es como, entidades de diferente nivel de abstracción, en sistemas de hardware y software, normalmente requieren funciones de sincronización diferentes e independientes. Por ejemplo, la sincronización de procesos de protocolos a cualquier nivel es en principio independiente de las actividades de sincronización de los procesos de nivel inferior. Se hace, entonces, evidente que las necesidades y las técnicas de sincronismo pueden ser completamente diferentes de acuerdo al nivel de abstracción y a la naturaleza de los elementos o procesos a ser sincronizados.

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS

1.2.1 Señales de Reloj y señales Digitales

Una señal de reloj puede ser definida como una señal periódica o pseudo periódica y es usada para coordinar las acciones de dos o más circuitos. Una señal de reloj oscila entre dos estados, un estado en alto y otro en bajo. Los circuitos que usan esta señal para sincronización se activan ya sea en los flancos ascendentes o descendentes, o en ambos.

La recuperación de reloj es entonces, el proceso de extracción de la señal de reloj asociada a una señal digital recibida.

Una señal de reloj cumple su objetivo al accionar eventos, es decir, controla el tiempo de procesos controlados. Desde esta perspectiva, una señal de reloj puede ser modelada como una serie de pulsos espaciados en intervalos de T , a instantes especiales llamados *instantes significativos*. La señal de reloj acciona los procesos controlados en esos instantes. Instantes significativos convenientes pueden ser identificados, por ejemplo, en los instantes donde la señal cruza con el cero.

Una señal digital *isócrona* es una señal digital en donde los intervalos de tiempo entre instantes significativos tienen, al menos en promedio, la misma duración o duraciones que son múltiplos enteros de la más baja. Inversamente, una señal digital *anisócrona* es una señal no-isócrona.

Una señal de reloj regular (ver figura 1.1 (a)), es usualmente denotada como una señal isócrona con todos sus instantes significativos espaciados uniformemente en el tiempo. Todas las señales digitales transmitidas a través de enlaces de red están sincronizadas por señales de relojes regulares. Contrariamente, una señal de reloj irregular (ver figura 1.1 (b)) es generalmente derivada de un reloj regular pero con “agujeros” en algunos de los espacios donde una señal regular se manifestaría con un pulso. Una señal de reloj irregular es considerada también como una señal isócrona. Su frecuencia promedio es más baja que la del reloj regular de donde fue derivada, sin embargo, tiene el mismo periodo básico. Este tipo de señales son usadas para sincronizar la inserción de bits tributarios en una señal multiplexada, de acuerdo con algún tipo de mapeo.

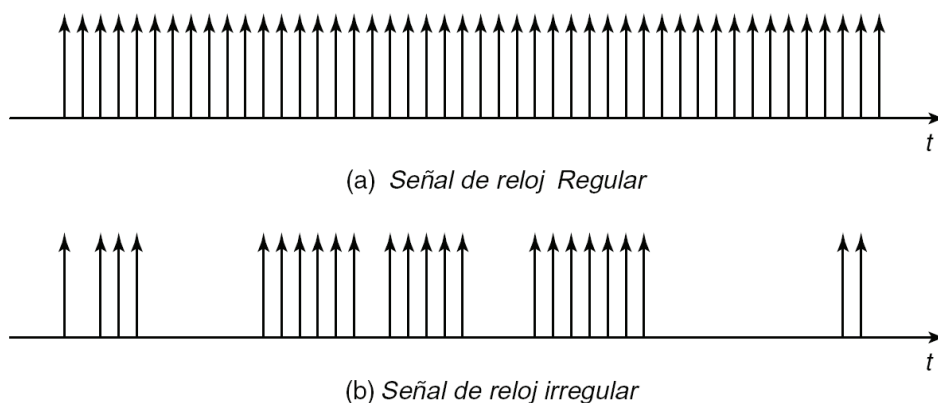


Figura 1.1 Señales de reloj regular e irregular.

Un *Intervalo de Unidad* es definido como el intervalo de tiempo nominal entre instantes significativos consecutivos de una señal isócrona.

1.2.2 Relaciones de Tiempo entre señales digitales

Dos señales *síncronas* son señales digitales isócronas cuyas respectivas señales de tiempo tienen la misma frecuencia, al menos en promedio, y una relación de fase controlada de manera precisa (es decir, con un offset de fase constante). Contrariamente, dos señales digitales son *asíncronas* si estas no son síncronas.

Dos señales *mesócronas* son señales digitales isócronas asíncronas cuyas respectivas señales de tiempo tienen la misma frecuencia, al menos en promedio, pero no tienen control en la relación de fase.

Dos señales *pleiócronas* son señales digitales isócronas asíncronas cuyas respectivas señales de tiempo tienen los mismos valores de frecuencia nominales. En realidad es permitido que sus valores frecuencia difieran un poco dentro de un rango permitido. (Por ejemplo, dos señales de 2.048 Mbps generadas por dos equipos diferentes e independientes).

Dos señales *heterócronas* son señales digitales isócronas asíncronas cuyas respectivas señales de tiempo tienen diferentes valores de frecuencia nominales. (Por ejemplo, una señal de 2.048 Mbps PCM y una señal de 8.448 Mbps PDH).

En la figura 1.2 se muestra un resumen de la taxonomía de las diferentes relaciones de tiempo entre las señales digitales.

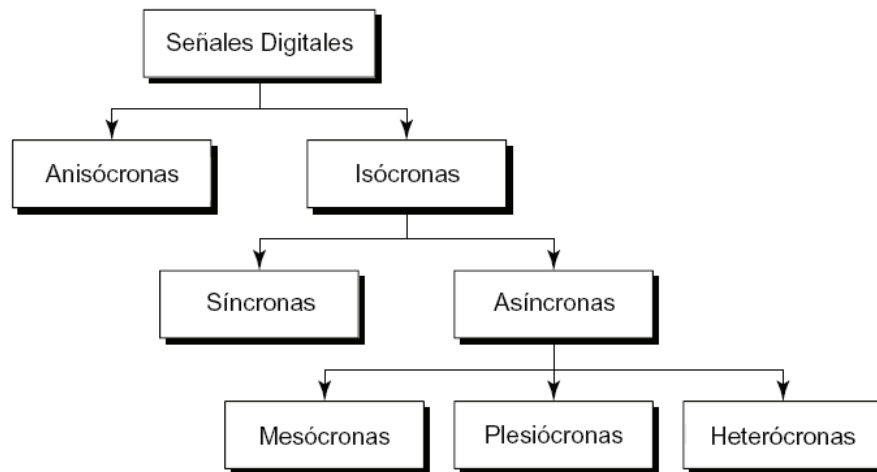


Figura 1.2. Taxonomía de las diferentes relaciones de tiempo entre las señales digitales.

1.2.3 Jitter y Wander

El jitter es un fenómeno que degrada las transmisiones digitales. Tanto el jitter como el wander son denominaciones comúnmente utilizadas para referirse a cualquier tipo de ruido de fase que afecta a los símbolos digitales (es decir, fluctuaciones en el eje del tiempo de los símbolos transmitidos). Los ruidos de amplitud y fase son los dos componentes básicos ortogonales de ruido que afectan a las señales digitales y que se acumulan a lo largo de las líneas de transmisión.

Las transmisiones digitales teóricamente tienen la habilidad de evitar la degradación de la señal producto de un ruido inducido acumulativo. Una razón por la que las transmisiones digitales no cumplen esta expectativa es la diferencia de tiempo que ocurre dentro de los equipos transmisores. Cuando esta diferencia se vuelve muy grande, se producen errores que causan que el sistema quede inutilizado. Inclusive cuando la diferencia de tiempo es pequeña, la sensibilidad a pequeñas variaciones de amplitud y fase aumenta y el desempeño se degrada.

Tanto el Jitter como el Wander son definidos como variaciones de corto y largo plazo respectivamente de los instantes significativos de una señal digital con respecto a su posición ideal en el tiempo. Pueden ser entendidos como una señal digital que está variando constantemente su posición en el tiempo con respecto a una señal de reloj ideal.

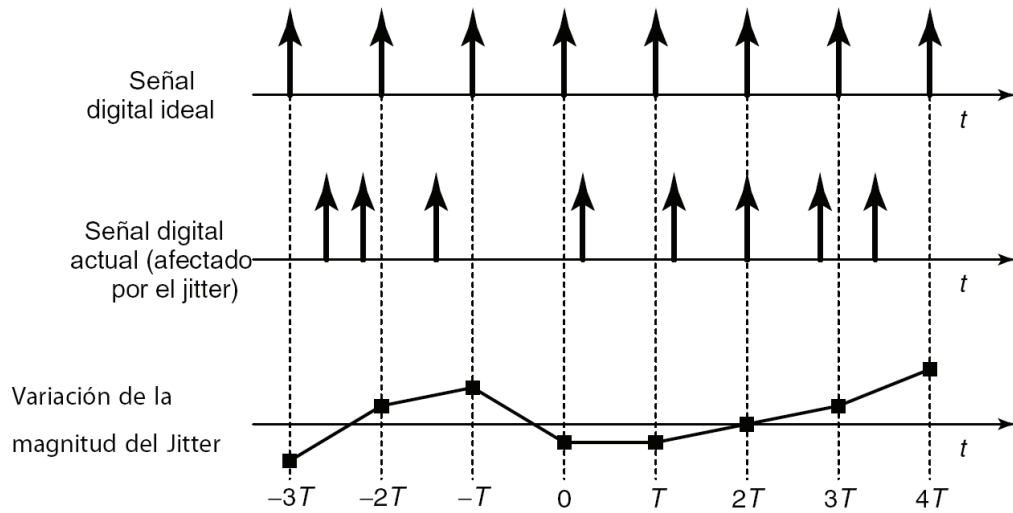


Figura 1.3. Señal Digital afectada por el Jitter.

Las variaciones lentas de la magnitud del jitter se las conoce como *wander*. La división se la hace si la variación es menor a 10 Hz. Se considera jitter si la variación es superior a los 10 Hz.

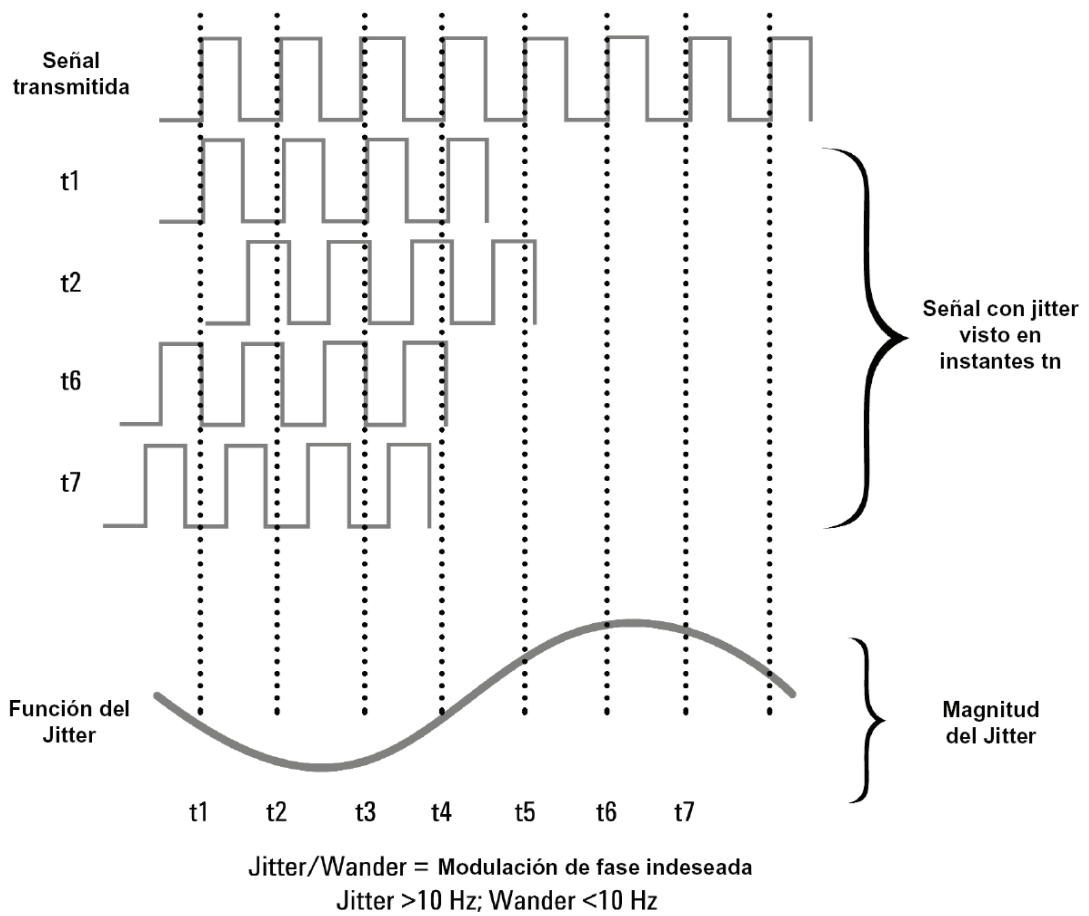


Figura 1.4. Modulación de fase indeseada.

La amplitud del jitter esta especificada en *Intervalos de Unidad* (Interval Units (UI)), tal que una unidad UI de jitter es igual a un ancho de bit de datos, independientemente de la tasa de datos. Por ejemplo, a una tasa de 2048 Kbps, una UI equivale a 480 ns mientras que a una tasa de 155.52 Mbps, una UI equivale a 6.4 ns.

Estándares internacionales de jitter y wander especifican tres límites para los equipos y las interfases de red digitales.

- *Tolerancia al Jitter*, es decir, la mínima amplitud del jitter que el equipo debe ser capaz de tolerar en las interfases de entrada digitales para una recepción libre de errores. (Un jitter alto puede causar errores en la etapa de decisión de símbolos debido a una recuperación de reloj inexacta).
- *Función de transferencia del jitter*, es decir, la relación entre la amplitud de jitter en la salida y la amplitud de jitter en la entrada sobre un rango de frecuencias. (Esta prueba se la realiza alimentando al equipo con una señal sinusoidal con jitter de prueba a determinadas frecuencias).
- *Jitter de salida*, es decir, el máximo jitter permitido en las interfases digitales de salida (para limitar el jitter generado por el equipo).

Las principales fuentes de jitter y wander en los sistemas de transmisión digitales son los regeneradores, multiplexores y las líneas de transmisión.

Un regenerador recibe una señal entrante y transmite una nueva señal regenerada que copia la señal original tanto como le sea posible. Para regenerar la señal, la información de tiempo debe ser conocida para que el pulso regenerado pueda ser transmitido con los intervalos correctos entre ellos. Los regeneradores mas utilizados son los regeneradores *self-timed* que extraen la información de tiempo directamente de la señal entrante usando un circuito de extracción. Debido a que el proceso de extracción es imperfecto, el pulso transmitido no suele ser una copia idéntica del pulso original, pero contiene la modulación de fase indeseada que llamamos jitter.

Normalmente, la señal de entrada llega al receptor corrompida por ruido aditivo y con pulsos que contaminan los time slots adyacentes, causando una interferencia Inter-Símbolo (ISI). Así, el circuito de extracción de tiempo debe trabajar sobre un pulso ruidoso y disperso. Esto resulta en un jitter inherente en la salida del regenerador. El jitter se acumula a lo largo de las cadenas de regeneradores en cascada.

Los Multiplexadores digitales combinan varias señales de tasa de transmisión baja en una señal con una tasa de transmisión más alta usando multiplexación por división de tiempo (TDM). Para lograr esto, los pulsos de baja velocidad deben ser sincronizados bit a bit a una velocidad común. Existen tres esquemas de sincronización de bits que se usan en las redes modernas:

- *Slip Buffering*, usado por ejemplo en las etapas de entrada de las centrales digitales.
- *Justificación de bit*, usado en los multiplexores digitales asincrónicos PDH y en la adaptación de tributarios asincrónicos en los contenedores SDH.
- *Punteros*, usados en las redes SDH donde las secciones de los multiplexadores son terminadas.

Cuando los tributarios de baja velocidad son demultiplexados, se ven afectados por un jitter. También los sistemas en cascada de multiplexado/demultiplexado hacen que el jitter se acumule en los tributarios transportados de manera que el control del jitter se hace necesario.

En lo referente con las líneas de transmisión, la principal causa del jitter y del wander es la variación de la temperatura, ya que la velocidad de propagación de las señales en un medio depende de la temperatura (especialmente en los cables de cobre). Las variaciones de temperaturas diurnas y anuales siguen una tendencia pseudo-periódica, que producen los llamados wander diurno y wander anual.

1.2.4 Modos de Transferencia Síncrono y Asíncrono

El modo de transferencia describe la manera en que varias fuentes envían información, si son mutuamente dependientes en decidir los instantes para comenzar la transmisión de las unidades de información o no. Los dos modos fundamentales de transmisión son:

- *Modo de transferencia Síncrona (STM)*, donde las fuentes de información están sincronizadas mutuamente, es decir, estas pueden enviar su información solamente en time-slots preasignados.

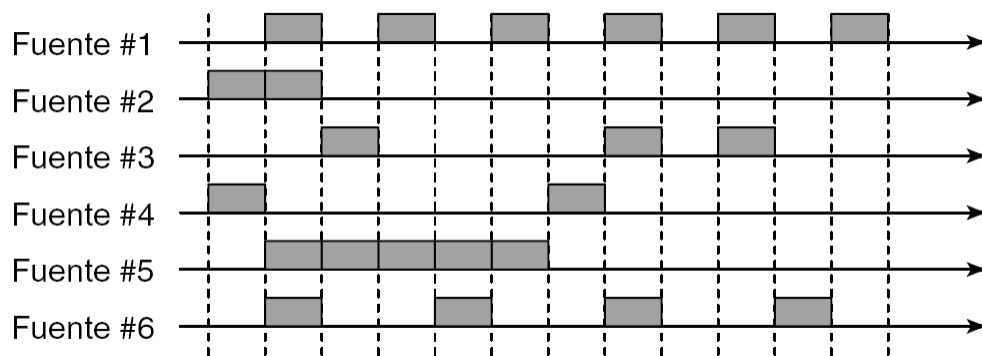


Figura 1.5. Modo de Transferencia Síncrono.

- *Modo de Transferencia Asíncrona (ATM)*, donde las fuentes de información son mutuamente asíncronas y la información es segmentada en unidades de información, la cual es enviada por las fuentes en instantes independientes, con el intervalo dependiente de la demanda de la fuente.

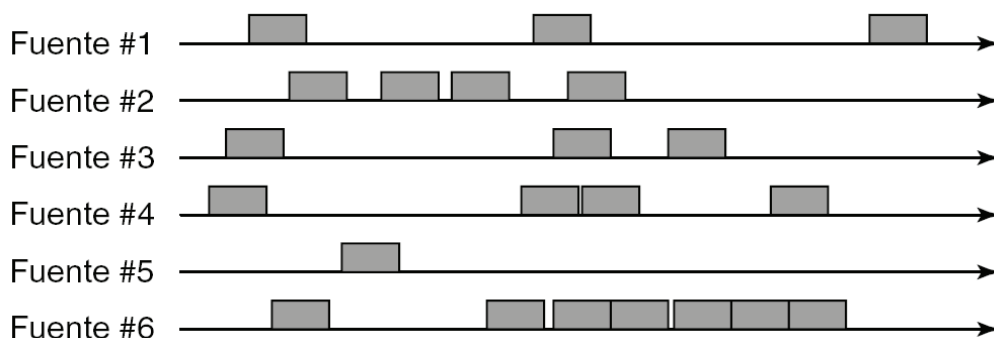


Figura 1.6. Modo de Transferencia Asíncrono

1.2.5 Taxonomía de las Técnicas de Multiplexado

La transmisión se basada en el multiplexado, es decir, la transmisión de varias señales sobre un mismo medio de transmisión compartido. Haciendo referencia a la Figura 1.7, las distintas técnicas de multiplexado están divididas en tres clases básicas, dependiendo el dominio en el cual las distintas señales son multiplexadas: frecuencia, tiempo y código.

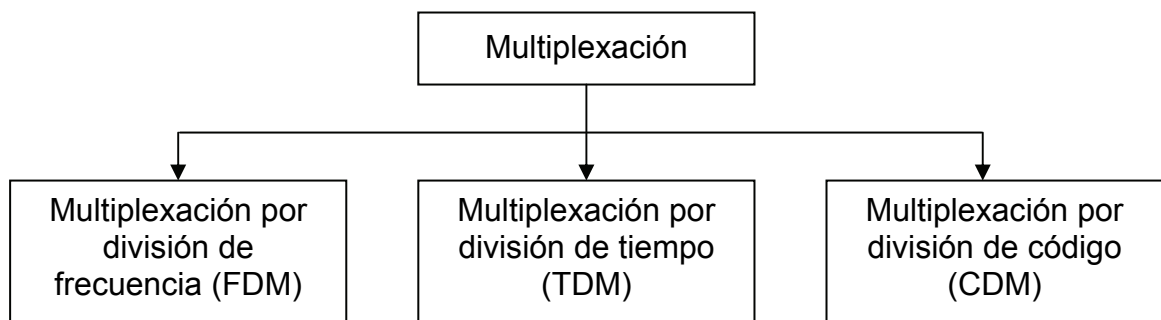


Figura 1.7. Taxonomía de las Técnicas de Multiplexado.

1.2.5.1 Multiplexación por división de frecuencia (FDM)

La multiplexación por división de frecuencia ha sido el cimiento de las redes telefónicas analógicas desde hace algún tiempo. El principio de la multiplexación por división de frecuencia consiste en separar cada canal tributario en el dominio de la frecuencia en diferentes sub-bandas del espectro de la señal multiplexada. Si las sub-bandas están separadas lo suficiente entonces se evita que exista interferencia co-canal y facilita la extracción de canales individuales de la señal multiplexada usando filtros pasa-banda.

1.2.5.2 Multiplexación por división de tiempo (TDM)

La multiplexación por división de tiempo corresponde a la técnica equivalente de FDM pero en el dominio del tiempo. Varias señales son intercaladas en el tiempo para la transmisión sobre un canal común.

El principio de TDM se aplica a las líneas telefónicas muestreadas con una tasa de muestreo igual a 8 KHz ($T_S = 125 \mu\text{s}$) y consiste en asignar un time slot por cada T_S correspondiente a un canal según el esquema de multiplexación utilizado, así todos los canales son atendidos por el multiplexor TDM y cada uno de ellos envía un muestreo cada T_S .

1.2.5.3 Multiplexación por división de Código (CDM)

La multiplexación por división de código, también conocida como espectro ensanchado, es la tercera técnica de transmisión que en los últimos años ha ganado mucha importancia en muchas aplicaciones (principalmente en las redes telefónicas móviles).

Consiste en transmitir simultáneamente en la misma banda de frecuencia un conjunto de N señales multiplexadas cada una por un código particular $ci(t)$, esto permite la separación de los canales individuales de la señal multiplexada. Si los N códigos $ci(t)$ son ortogonales o se aproximan a eso, entonces la demultiplexación logra una interferencia mutua nula entre las señales, como sucede en FDM y TDM que son intrínsecamente ortogonales.

1.3 SINCRONIZACIÓN EN LAS TELECOMUNICACIONES

Si bien el significado del término *sincronización* es comúnmente asociado con el proceso de adquisición y seguimiento de una señal de reloj en el receptor (sincronización de portadora o sincronización de símbolo), su significado se extiende dependiendo los niveles de abstracción y del contexto en las telecomunicaciones en el que se use la palabra sincronización.

La demodulación coherente de una señal modulada en amplitud está basada en la reconstrucción de la portadora, es decir, la extracción de una señal coherente con la portadora tanto en frecuencia como en fase (sincronización de portadora)

La modulación digital en cualquier caso requiere, sin importar si la demodulación sea coherente o no, identificar los tiempos de muestreo y decisión para extraer la

información lógica de la señal analógica recibida, así decidiendo, si un '1' o un '0' fue transmitido por ejemplo (sincronización de símbolo).

Una vez que la información lógica ha sido extraída, el siguiente paso, a un nivel más alto de abstracción, es reconocer las tramas dentro del flujo constante de bits recibidos (sincronización de trama). La sincronización del comienzo de la trama permite que el equipo receptor interprete los bytes que se encuentran en diferentes posiciones en las tramas recibidas (por ejemplo, los 30 o 31 canales asignados a diferentes llamadas telefónicas en el sistema E1 PDH).

Cuando la información es dividida en paquetes que son transmitidos por rutas independientes a su destino (red de conmutación de paquetes), el receptor debe ser capaz de ecualizar los diferentes retrasos de los paquetes recibidos (packet jitter), y así reconstruir el flujo de bits original para que parezca que este hubiese sido transmitido a través de una red de conmutación de circuitos. La ecualización de estos retrasos (sincronización de paquetes) se lo logra recuperando la información original del tiempo de la secuencia de paquetes recibidos a través de técnicas adaptativas o procesando la información del tiempo explícitamente escrita en la cabecera de los paquetes (time stamps).

Estos conceptos descritos tratan con los varios niveles de sincronización en una transmisión punto a punto. Otro nivel de sincronización es la *sincronización de red* que se enfoca en la operación de todo el sistema de nodos de red. Puede resultar ventajosa la distribución de una señal de tiempo común a todos los nodos de la red, para que cada elemento de red pueda operar sincronizadamente con los otros.

A un nivel de abstracción mas alto, la *sincronización de multimedia* que trata con la orquestación de elementos heterogéneos (imágenes, texto, audio, video, etc.) en una comunicación multimedia en diferentes niveles de integración.

Un tipo diferente de sincronización en la *sincronización de relojes en tiempo real* a través de la red, en donde se trata la distribución de un tiempo absoluto en toda la red principalmente con propósitos de gestión.

1.3.1 Sincronización de Portadora

La modulación en amplitud es equivalente en el dominio de la frecuencia a la traslación del espectro de la señal modulada a la frecuencia de la portadora f_0 . En realidad, el espectro de una señal AM es redundante, como dos imágenes de espejo alrededor de la frecuencia portadora f_0 . La modulación de banda lateral única (SSB) consiste en transmitir solo una de las dos imágenes de manera que se logra una mejor eficiencia espectral. La demodulación de banda lateral única debe ser coherente; el alineamiento de fase de portadora reconstruida es inclusive más crítico, debido a que cualquier desplazamiento de fase produce una distorsión de la señal demodulada.

La demodulación coherente es basada en la reconstrucción de la portadora, es decir, en la recuperación de una señal coherente con la portadora en frecuencia y fase. Esta operación se la conoce como *sincronización de portadora*.

La reconstrucción de la portadora puede ser fácil si en el espectro de la señal recibida existe una línea en la frecuencia portadora f_0 , como sucede cuando la señal modulada no tiene una media cero. En este caso, la extracción de la portadora puede ser lograda por medio de filtros pasa-banda angostos o por medio de lazos de seguimientos de fase (PLL (Phase-Locked Loop)). El lazo en este caso es diseñado con una banda angosta, pero de tal manera que permite que el oscilador controlado por voltaje (Voltage Controlled Oscillator (VCO)) siga las pequeñas fluctuaciones de frecuencia alrededor la frecuencia nominal f_0 .

Desafortunadamente, en muchos casos la línea espectral a la frecuencia portadora f_0 esta ausente. Por un lado, esto es más efectivo desde el punto de vista de la transmisión. Por otro lado, esto implica la necesidad de un sistema sincronizador más sofisticado para reconstruir la portadora tanto en fase como en frecuencia.

1.3.2 Sincronización de Símbolo

Las transmisiones digitales generalmente tratan con secuencias de pulsos que representan los símbolos transmitidos y que son enviados a una tasa $R = 1/T$, donde T es el intervalo entre símbolos consecutivos.

En cualquier caso la recepción requiere, a un lado de que la demodulación sea coherente o no, conocer la secuencia de tiempo, es decir, la posición temporal de los símbolos, para poder extraer la información lógica de la señal analógica recibida. La información de la secuencia de tiempo permite reconocer los símbolos en el tiempo correcto.

La recuperación de la secuencia de tiempo del símbolo de la señal analógica recibida se lo conoce como *Sincronización de Símbolo*. A veces referida como *recuperación de reloj*. En la Figura 1.8 se muestra el esquema de un receptor en banda-base. La señal analógica recibida $r(t)$ es muestreada produciendo una secuencia de valores leídos $r(kT)$ de donde la secuencia de bits es extraída por una decisión lógica. El muestreador es controlado por sistema de sincronismo de símbolo el cual estima los tiempos de lectura $t = kT$ examinando $r(t)$.

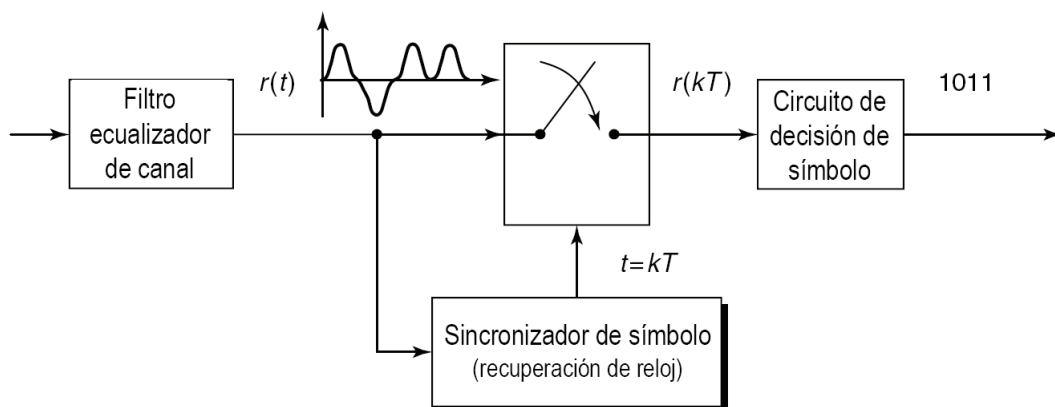


Figura 1.8. Sincronización de símbolo en un receptor binario bandabase

Existen muchas técnicas para recuperar el reloj. A veces el sincronismo de portadora se recupera primero y por medio de sistemas coherentes pasa-banda se transfiere la señal a banda-base y se recupera el sincronismo de símbolo. Otras veces el sincronismo de símbolo es recuperado directamente de la señal pasa-banda usando técnicas incoherentes.

Sin embargo, existen otras técnicas de sincronización de portadora y de símbolo que se basan en principios diferentes. Para resumir, la sincronización de símbolo puede ser dividida en tres categorías:

- *Basado en el rastreo de errores.*
- *Basado en una búsqueda maximizada y post filtrado.*
- *Basado en no-linealidad y filtrado pasivo.*

1.3.3 Sincronización de Trama

Una vez que tanto el sincronismo de portadora y símbolo se han logrado y la información lógica es extraída de la señal entrante, el siguiente paso, a un nivel mas alto de abstracción, es determinar el principio y el fin de palabras código o grupos de palabras código, es decir, delinear las tramas en el flujo indiferenciado de bits recibidos (ver figura 1.9). Estas tareas de sincronización se las llama *sincronismo de trama*.

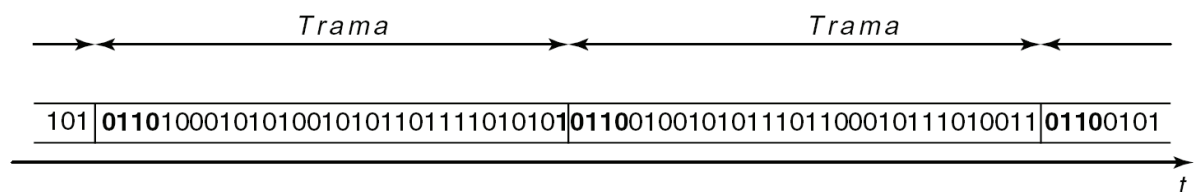


Figura 1.9. Delineación de trama en un flujo de bits

En las transmisiones digitales, los bits usualmente están organizados en tramas para asignar diferentes significados a los bytes transmitidos. Bytes en diferentes posiciones dentro de una misma trama pueden ser, por ejemplo, asignados a diferentes canales de usuarios que comparte en mismo medio físico de transmisión en TDM, como es el caso de los 30 canales asignados a diferentes llamadas telefónicas de un E1, o también asignados a funciones de cabecera (chequeo de errores, transporte de información de administración y control, etc.).

Cualquier estrategia de sincronismo de trama (también referido como estrategia de *alineamiento de trama*) está compuesta de dos operaciones básicas:

- *Caza*, siempre que el equipo está fuera de sincronización de trama y el alineamiento de trama es buscado en el flujo de bits.
- *Mantenimiento*, siempre que el equipo asume que está alineado en trama y continuamente que verifica los límites de la trama se encuentren donde se suponen que están.

La sincronización de trama es asistida por *palabra de alineamiento* especial, generalmente al principio de la trama. La caza se realiza buscando la palabra de alineamiento en cualquier posición del flujo de datos recibidos, el mantenimiento se lo hace verificando que el byte de alineamiento se encuentre donde el alineador de trama supone que debe estar. Desafortunadamente, durante la caza de la palabra de alineamiento de trama buscada, esta puede ser simulada en cualquier posición por el flujo de datos. Para el diseño de estrategias de alineamiento efectivas se cuenta con los siguientes objetivos.

- Bajo condiciones normales de alineamiento, minimizar la probabilidad de pérdida de sincronismo de trama debido a errores en la línea de transmisión.
- Bajo condiciones de no alineamiento, minimizar la probabilidad de alineamiento falsos debido a una simulación de la palabra de alineamiento en el flujo de bits recibidos
- Minimizar el tiempo de recuperación de alineamiento de trama.

El análisis del proceso estocástico que describe la pérdida y recuperación del alineamiento, de acuerdo a la estrategia de alineamiento escogida, puede ser realizado mediante el modelo de Harkov – Chain (ver figura 1.10). Donde \mathcal{P} es la probabilidad de un reconocimiento correcto de la palabra de alineamiento.

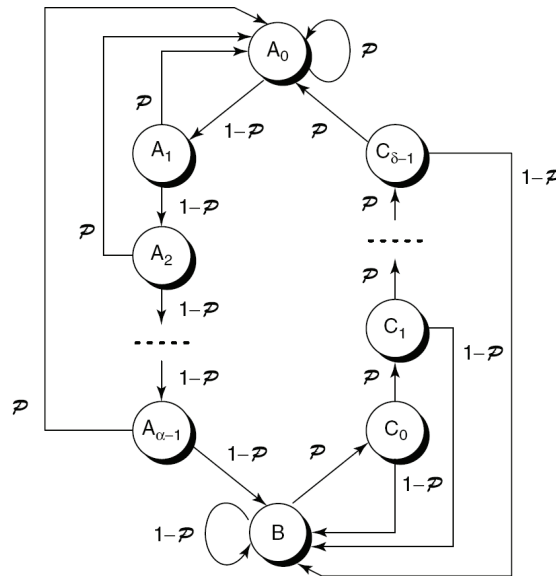


Figura 1.10. Modelo de estrategia de alineamiento Markov – Chain

Desde el *estado de alineamiento correcto* A_0 , en donde es realizado el proceso de mantenimiento, el alineador alcanza un *estado no alineado* B solamente después de α palabras de alineamiento consecutivas detectadas con error, el alineador empieza el proceso de caza y, tan pronto como encuentre un patrón de bits igual a la palabra de alineamiento buscada, cambia a un *estado de alineamiento provisional* C_0 . De ahí, el alineador ejecuta el proceso de mantenimiento y alcanza el estado normal A_0 solamente después de δ palabras de alineamiento consecutivas detectadas sin error. De otra manera, después de la primera palabra de alineamiento detectada con errores, regresa al estado B donde el proceso de caza empieza nuevamente.

Cualquier transición del estado A_0 al estado B, es definido como *pérdida de alineamiento* y puede ser causada por errores de línea en las palabras de alineamiento recibidas (*pérdida de alineamiento forzado*) o por la presencia de un slip en las tramas recibidas (*pérdida de alineamiento real*).

Basado en el esquema mencionado, se han diseñado diferentes estrategias de alineamiento de trama para las señales multiplexadas a diferentes niveles de la jerarquía PDH. Por ejemplo, para la jerarquía E1 los valores de $\alpha = 3$ y $\delta = 1$ se han estandarizado.

Por otro lado, un esquema ligeramente diferente fue diseñado para los sincronizadores de trama de la jerarquía digital síncrona (SDH). Dentro de la palabra de

alineamiento (hasta de 96 bytes para las tramas STM-16), dos diferentes subconjuntos de bytes son considerados por el alineador durante los procesos de caza y mantenimiento. El buscar una palabra de alineamiento más grande durante el proceso de caza reduce la probabilidad de una simulación de la misma, mientras que la verificación de una palabra de alineamiento mas corta en el proceso de mantenimiento reduce la probabilidad de una pérdida de alineamiento forzada. En la Figura 1.11 están representados los diagramas de estado para la sincronización de la trama SDH. Se reconocen tres macro-estados:

- *In Frame* (IF) estado en trama, es decir, el estado de operación normal bajo condiciones de alineamiento (correspondiente al estado A_0).
- *Loss Of Frame* (LOF) estado de pérdida de trama, es decir, el estado alarmado de pérdida de alineamiento de trama (correspondiente al estado B).
- *Out Of Frame* (OOF) estado fuera de trama, es decir, un estado de pre-alarma (correspondientes a los estados A_i , para $0 < i < \alpha$)

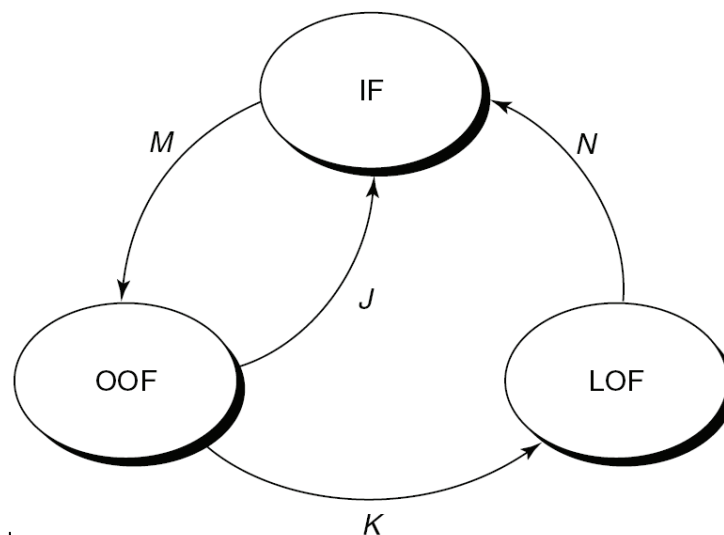


Figura 1.11. Estrategia de sincronismo de trama en los sistemas SDH

Desde el estado IF, de donde se corre el proceso de mantenimiento, el alineador alcanza el estado OOF después de detectar M tramas consecutivas con errores en la palabra de alineamiento. Después de otras K tramas en el estado OOF (es decir, otras K tramas con errores detectados en la palabra de alineamiento), donde el proceso de

mantenimiento todavía se corre, el sincronizador de trama cambia al estado LOF. En el estado OOF, J tramas consecutivas libre de errores en la palabra de alineamiento producen un cambio de estado de regreso al IF. En el estado LOF, donde corre el proceso de caza, N tramas consecutivas libre de errores en la palabra de alineamiento son necesarias para regresar al estado normal IF.

El contador que registra el número de tramas con errores en la palabra de alineamiento mientras el sistema esta en el estado OOF no se resetea a cero hasta que el sistema se queda en el estado IF durante L tramas consecutivas. Los valores estándar de los parámetros de la estrategia de sincronización de trama SDH son $M \leq 5$, $J \leq 2$, $K = 24$, $N = 24$, $L = 24$.

En algunos protocolos de transmisión es necesario delinear súper-tramas adicionales que extienden varias tramas ya delineadas. Este proceso se lo conoce como *Sincronización de Multi-tramas*. Por ejemplo, los bits que llevan la información de señalización en la jerarquía E1 están organizados en grupos de 16 tramas de 125 μ s. En la versión americana T1, estos bits están agrupados en 24 tramas de 125 μ s.

1.3.4 Sincronización de Bit

La expresión *Sincronización de Bit* es comúnmente usada en las telecomunicaciones con dos significados diferentes. Por un lado, el término Sincronización de Bit es a veces usado para referirse a la sincronización de símbolo en el caso especial de símbolos binarios (bits). Más comúnmente, el término sincronización de bit, es usado para denotar la sincronización de un flujo de bits asincrónicos según el reloj del equipo local. Esto se logra escribiendo los bits del flujo asincrónico entrante en un buffer a la velocidad en la que llegan, y leyéndolos a la frecuencia de reloj del equipo local.

La sincronización de bits en los Multiplexadores digitales es lograda en el bloque sincronizador. Ahí, los bits de los tributarios son sincronizados para que se ajusten a la señal multiplexada. El sincronizador puede implementar justificación de bits o relleno de slips para tratar con cualquier offset de frecuencia entre los tributarios y la señal multiplexada.

1.3.5 Sincronización de Paquetes

La conmutación de paquetes consiste en dividir la fuente de información en paquetes para luego transmitirlos o inclusive enrutarlos independientemente a su destino. Los paquetes contienen un segmento de datos mas alguna información de cabecera, y su tamaño puede ser fijo o variable. Los paquetes de tamaño fijo son llamados también celdas.

El transporte de información mediante la conmutación de paquetes tiene las siguientes características peculiares:

- Debido a la naturaleza estocástica de la conmutación de paquetes y en particular las colas dentro de la red, los paquetes sufren un retraso aleatorio durante su transporte a través de la red y llegan a su destino con tiempos de llegada estocásticos.
- Si los paquetes de una transmisión cualquiera son enrutados independientemente (es decir, cada uno puede tomar una ruta diferente a través de la red), estos pueden llegar a sus destino fuera de orden (ver Figura 1.12).
- En el receptor es imposible recuperar la frecuencia de reloj transmisor solamente basándose en el flujo físico de bits entrantes.

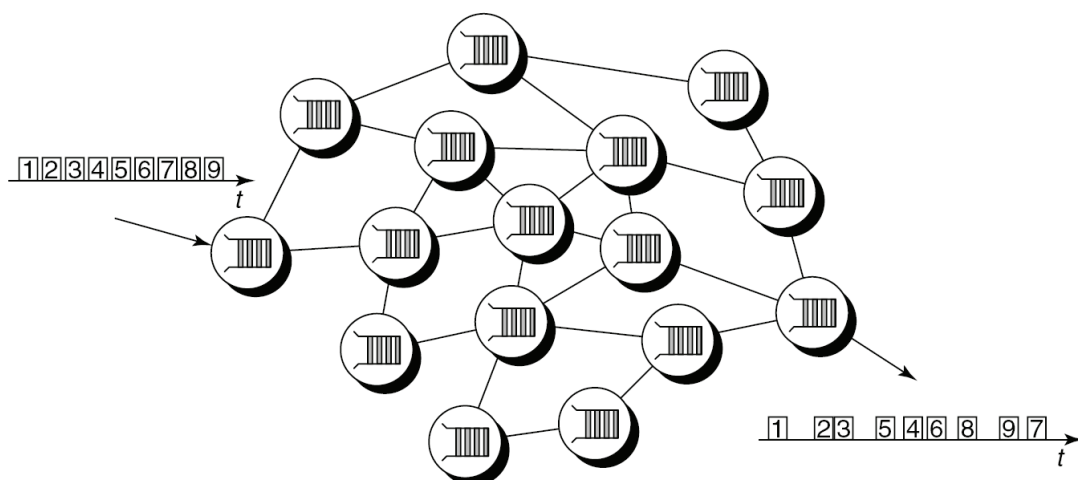


Figura 1.12. Jitter de paquetes a través de una red de conmutación de paquetes

El transporte transparente de la voz (o de cualquier tráfico en tiempo real intrínsecamente orientado a la conmutación de circuitos) a través una red de conmutación de paquetes requiere tomar en cuenta los puntos antes mencionados, para poder lograr reproducir la voz con una calidad aceptable desde los paquetes que llegan con retrasos variables o inclusive fuera de orden. Por lo tanto, las características descritas requieren la implementación de funciones adicionales en la interfase del receptor donde la emulación del circuito es realizada. La ecualización de los retrasos aleatorios de los paquetes (jitter de paquetes) es normalmente referida como *sincronización de paquetes*.

La tarea de ecualizar el jitter de paquetes, es decir, la estimación ya sea del tiempo de producción del paquete o equivalentemente el retardo del transporte, puede ser logrado de diferentes maneras. Estos métodos pueden ser divididos en dos grupos: basados en un ambiente de red no-síncrono, donde los diferentes nodos son cronometrados por relojes independientes locales, y basados en un ambiente de red síncrono, donde una señal común es distribuida en cada nodo.

1.3.5.1 Recuperación no-síncrona de tiempo

- *Blind Delay Estimate (Estimación ciega de retraso)*. La estrategia más simple para estimar el tiempo de producción de un paquete es asumir el peor caso: el receptor asume que el paquete sobre el cual se basa la estimación llega con un retraso mínimo, y que los otros paquetes no podrán retrasarse más que un tiempo máximo, estimado ciegamente. Una vez que el tiempo de existencia es estimado para el primer paquete, el receptor usa una secuencia de números en los paquetes subsecuentes para determinar el tiempo máximo de existencia propio para cada uno. Los paquetes que se reciben con un retraso más grande que el estimado son descartados.
- *Roundtrip Measurement (Medida ida y vuelta)*. Si bien la estimación ciega es muy simple, puede no ser adecuada para redes transcontinentales. Una mejor técnica de estimación consiste en medir el retraso ida y vuelta, sobre un paquete común, entre el origen y el destino y usar este valor para estimar el retraso de ida o de vuelta de los otros paquetes, asumiendo que ese retraso está distribuido uniformemente entre ambas direcciones.

- *Added variable delay (Retraso variable añadido)*. En este caso, el retraso experimentado por un paquete a través de la red es medido cuando este ocurre. El retraso variable es medido por medio de una “*estampa*” de retraso que indica el retraso acumulado por cada paquete. Cada elemento de red añade su retraso a la estampa al momento en que el paquete lo atraviesa, midiéndolo con el reloj local como la diferencia de tiempo entre los tiempos de entrada y salida. Conociendo el retraso del paquete permite que al receptor determinar el tiempo de existencia como el valor del tiempo actual mas la diferencia entre el valor máximo esperado de la estampa de tiempo y el valor actual de la misma.
- *Estrategias Adaptativas*. Ninguna de las técnicas antes descritas producen una medida exacta del retraso. Se han concebido diferentes algoritmos para cambiar adaptativamente el retraso estimado durante la recepción del flujo de paquetes, basados por ejemplo en el nivel del buffer o en medidas repetitivas del retraso ida y vuelta.

1.3.5.2 Recuperación síncrona de tiempo

El concepto fundamental de las técnicas sincrónicas se basa en la disponibilidad de un reloj de referencia común. Esto no es problema en las redes SDH y en su versión americana SONET, las cuales han sido escogidas para servir de capa física para las redes ATM.

- *Técnica de codificación de frecuencia síncrona. (Synchronous Frequency Encoding Technique (SFET))*. La fuente de reloj asíncrona es comparada con el reloj de referencia de la red. La discrepancia entre los dos relojes es medida y codificada en el encabezado de la capa de adaptación ATM (AAL). En el receptor, el reloj común de red y la información codificada es usada para reconstruir al reloj de origen.
- *Estampa de tiempo (Time Stamp (TS))*. Es un contador de 16 bits derivado del reloj de referencia de la red. Este valor se almacena en dos bytes de la cabecera de la subcapa de convergencia (CS) cada 16 celdas. En el lado receptor, el reloj de

origen es reconstruido a partir de la información de la estampa de tiempo y el reloj de red.

- *Estampa de tiempo síncrona residual (Synchronous Residual Time Stamp (SRTS)).* Este método consiste en una estampa de tiempo modificada y se basa en la observación que, para fuentes de relojes exactas, los bits menos significativos de los 16 bits de la estampa de tiempo conllevan toda la información útil. SRTS es por lo tanto, compuesta de 4 bits. Esto permite incorporar SRTS en los encabezados AAL existentes sin incrementar su tamaño. SRTS ha sido aceptada por la UIT-T como la técnica estándar de recuperación de reloj para AAL-1.

1.3.6 Sincronización de Redes

La sincronización de redes trata con la distribución de una referencia de tiempo y frecuencia a los relojes de red, dispersos sobre un área geográfica extensa. El objetivo es de alinear las escalas de tiempo y frecuencia de todos los relojes, usando la capacidad de comunicación de los enlaces que los interconectan. En general, los siguientes son solamente las aplicaciones más conocidas:

- Sincronización de los relojes ubicados en diferentes puntos de conmutación y multiplexado en una red digital de telecomunicaciones;
- Sincronización de los relojes en redes de telecomunicaciones que requieren alguna forma de multiplexación por división de tiempo con acceso múltiple, como las redes satelitales, terminales móviles GSM, etc.;
- Mediciones de rango entre dos nodos en la red, y también determinación de la posición y navegación por los usuarios de red;
- Arreglos de fase de antenas.

Existen muchos ejemplos de sincronización de un número grande de osciladores en la naturaleza. Las luciérnagas parpadean sus órganos luminosos en intervalos regulares e independientes cuando se encuentran alejadas pero si estas se encuentran relativamente cerca, exhiben una sincronización de sus órganos luminosos.

La sincronización de red juega un papel central en las comunicaciones digitales, teniendo una determinante influencia en la calidad de la mayoría de servicios ofertados por los operadores de red.

1.3.7 Sincronización de Multimedia

La Multimedia se refiere a la integración de elementos heterogéneos como texto, imágenes, audio y video en una variedad de ambientes de aplicación. Estos datos pueden llegar a ser extremadamente dependientes del tiempo y pueden requerir de un orden cronológico de presentación. La tarea de coordinar estas secuencias se llama *sincronización multimedia*.

La sincronización puede ser aplicada a la transmisión de flujos concurrentes o secuenciales de datos, y también a los eventos externos generados por el usuario humano. En otras palabras, la relación temporal entre los medios puede ser implicada, como en la reproducción de voz y video, o puede ser explícitamente formulada, como el caso de un documento multimedia que posee texto anotado por voz.

La dependencia de tiempo de una secuencia de datos puede ser simplemente lineal, como el caso de un archivo de audio reproducido con una secuencia de imágenes, pero otros modos de presentación de datos también son viables, incluidos reproducción en reversa, adelanto y acceso aleatorio. Cuando se introduce almacenamiento no secuencial, compresión de datos y retrasos randómicos de comunicaciones, la provisión de estas funciones puede ser difícil.

1.3.8 Sincronización de relojes de Tiempo Real

Es un tipo diferente de sincronización de redes que consiste en la distribución de una referencia tiempo absoluto a los relojes de los equipos de tiempo real dentro de una red de telecomunicaciones.

El propósito de la distribución de un tiempo estándar nacional es el control y gestión de la red. Cualquier tipo de evento relevante recogido por un equipo monitor, como el

error de tasa de bit (BER), desbordamientos de umbral, alarmas, fallas de hardware, etc. es registrado para reportes futuros. Cuando la red de telecomunicaciones es gestionada, estos eventos son notificados por los equipos al sistema por medio de mensajes de gestión. Estos mensajes deben incluir, entre otros, la información de fecha y hora leída por el reloj de tiempo real del equipo monitor.

Es esencial que los relojes de tiempo real de todos los equipos de la red estén sincronizados a un mismo tiempo absoluto, de otra manera sería imposible correlacionar los diferentes mensajes de manera significativa (que pueden ser bastantes y procedentes de distintos lugares de la red). Solamente si los relojes de tiempo real han sido sincronizados a un tiempo estándar, será posible establecer las relaciones lógicas y temporales entre todos los diferentes mensajes, y así poder extraer conclusiones útiles de los datos recolectados.

La sincronización de relojes de tiempo real es inherentemente diferente de la sincronización de redes. La sincronización de relojes de tiempo real, en particular, distribuye información de *tiempo absoluto* (por ejemplo 'Dic 31 1999, 23.59.57 PM', o cualquier otra clase de estampa de tiempo) y posee diferentes requerimientos de exactitud. Para las necesidades de gestión señaladas arriba, la exactitud de tiempo en unos cuantos milisegundos es perfectamente aceptable, ya que el campo de Date-and-Time (Fecha y hora) no va más allá de especificar día, mes, año y hora, minutos, segundos.

El objetivo de la sincronización de redes es de minimizar el error de fluctuación de tiempo entre los relojes, sin importar el offset inicial de fase. Esto implica que las *señales físicas de sincronismo de tiempo* (Ej. Ondas sinusoidales) sean distribuidas a los relojes de red por medios convenientes. Se tiene generalmente desviaciones de tiempo no mayores a 10 ns o 100 ns.

En la sincronización de relojes de tiempo real, por otro lado, se la logra intercambiando mensajes que llevan información de tiempo (estampas de tiempo), siguiendo algún protocolo, a lo largo de los enlaces de comunicación entre los nodos de la red. Por ejemplo el Network Time Protocol (NTP) es usado por los servidores de tiempo de internet y por sus clientes para sincronizar los relojes de tiempo real, así como para organizar y mantener automáticamente la sincronización de tiempo en la subred. El

protocolo se basa en mensajes transportados sobre paquetes IP y UDP, que proveen un servicio de transporte no orientado a la conexión; aunque, es adaptable a otros protocolos. Características adicionales incluyen autenticación y cifrado de mensajes, así como disposiciones para control remoto y monitoreo.

En NTP uno o más servidores primarios se sincronizan directamente a fuentes externas de referencia. Los servidores secundarios se sincronizan con los servidores primarios siguiendo algún esquema jerárquico. Es posible la reconfiguración de rutas de sincronización para poder sobrevivir a cualquier interrupción y falla que se presente. El algoritmo es capaz de estimar y compensar con precisión los retrasos randómicos de transporte de los paquetes en toda la red y de esta manera lograr una exactitud del tiempo absoluto en el orden de unos cuantos milisegundos.

CAPITULO 2

2 ARQUITECTURA DE LAS REDES DE SINCRONISMO

2.1 REQUERIMIENTOS DE SINCRONISMO DE LAS REDES DE TELECOMUNICACIONES

Una red de sincronismo es el medio por el cual se provee a las redes de telecomunicaciones de una señal de referencia de tiempo con una determinada calidad según lo requerido. La mayoría de las operadoras de servicios de telecomunicaciones han implementado al menos una red para sincronizar sus sistemas de transmisión y conmutación.

Los elementos básicos de una red de sincronismo son los *nodos* (relojes autónomos y esclavos) y los *enlaces* que los interconectan. Un reloj autónomo es un dispositivo independiente capaz de generar una señal de tiempo a partir de algún fenómeno físico periódico. Un reloj esclavo, por otro lado, genera una señal de tiempo a partir de un enganche de fase (o menos frecuente, de frecuencia) a una señal de referencia.

La distribución de una señal de referencia temporal en una red se la realiza usando las capacidades de comunicación de los enlaces que interconectan a los relojes (cableado de cobre, fibras ópticas, enlaces de radio, etc.). Sin embargo, los nodos pueden estar ubicados sobre un área geográfica extensa. Por lo tanto, hay que considerar dos aspectos importantes:

- Cómo transferir la señal de tiempo de un nodo al otro (la táctica de una transferencia punto-a-punto);
- Cómo organizar la distribución de tiempo a lo largo de todos los nodos de la red (la estrategia de la sincronización de redes).

2.1.1 Requerimientos de sincronismo en redes FDM Analógicas

Hasta la aparición de las técnicas digitales, cualquier cambio tecnológico impactaba de manera separada a la transmisión o a la conmutación, ya que a éstas se las consideraba como dos funciones distintas que eran implementadas en equipos diferentes y experimentaban procesos de evolución diferente. La introducción de técnicas de multiplexación FDM mejoró la capacidad de los enlaces de transmisión sin introducir nuevos cambios significativos a los principios de operación, implementación, gestión y control de las centrales de conmutación.

FDM es una técnica analógica que permite a múltiples canales compartir un único medio físico. FDM usa modulación de banda lateral única de una señal senoidal (*frecuencia portadora*) para realizar el corrimiento de frecuencia de los canales. Para el caso de las señales telefónicas, el ancho de banda es de 3 KHz aproximadamente (300 Hz ↔ 3400 Hz) y las portadoras están espaciadas 4 KHz para facilitar la separación de los canales por el filtro pasabandas. Debido a que la demodulación de este tipo de señales es coherente, es necesario reconstruir la señal portadora (señal senoidal de igual frecuencia y fase) en el destino para realizar el proceso de demodulación.

En los primeros sistemas FDM, el sincronismo de portadora se lograba usando una estrategia punto-a-punto (uno por cada sistema de transmisión). Los requerimientos de sincronismo aumentaron a medida que los sistemas FDM se extendieron y constituyeron grandes redes, abarcando enlaces con diferentes niveles de jerarquías de multiplexación. En 1970 AT&T desplegó la primera red de sincronismo. La estrategia consistió en el uso de *fuentes de portadora*, es decir, equipos autónomos capaces de generar todas las portadoras necesarias para la multiplexación y demultiplexación de todas las jerarquías. Estos equipos estaban sincronizados por una frecuencia piloto (múltiplo de 4 KHz) derivada de un reloj maestro y distribuido a lo largo de la red. Las fuentes de portadora usaban PLL's para generar las frecuencias de referencia síncronas con el piloto recibido. La principal tarea de los PLL's (Phase Locked Loop) era asegurar la estabilidad a corto plazo al filtrar las fluctuaciones de fase acumuladas por los pilotos a lo largo de las líneas de transmisión, y de proporcionar una salida de referencia en caso de que la señal piloto se pierda. La estabilidad de los PLL's tenía que ser del orden de 10^{-7} para asegurar una transmisión de calidad de los canales telefónicos.

2.1.2 Requerimientos de sincronismo en redes digitales PDH

2.1.2.1 Sincronización de las redes de transmisión digital PDH

Las técnicas de multiplexación digital por división de tiempo (TDM) fueron desarrolladas debido a la necesidad de optimizar mejor los medios físicos para satisfacer el aumento en la demanda de servicios de telecomunicaciones, especialmente servicios telefónicos. Esta técnica permite multiplexar miles de canales telefónicos por un medio físico común. De entre las dos maneras de lograr una multiplexación digital, síncrona y asíncrona, al principio se escogió la segunda para obviar la complejidad de sincronizar todos los nodos de la red.

Los sistemas PDH están basados en la multiplexación de tributarios asíncronos cuyas frecuencias tienen desvíos substanciales y la sincronización de bit se la logra mediante la técnica de justificación de bit. Por lo tanto las redes de transmisión PDH no necesitan ser sincronizadas. Los relojes de los equipos de transmisión son independientes, pero sus frecuencias son mantenidas, en lo posible, dentro de un valor de tolerancia nominal estándar ($2.048 \text{ Mbps} \pm 50 \text{ ppm}$).

Los sistemas PDH son transparentes para los relojes contenidos en las señales digitales transportadas. Una señal E1, multiplexada con otros tres tributarios asíncronos en una señal E2 y esta a su vez multiplexada con otros tributarios similares hasta completar toda la cadena jerárquica PDH, una vez recuperada al final de la cadena de transmisión tendrá la misma frecuencia promedio original que la que tenía antes de las etapas de multiplexación/demultiplexación (con algún jitter añadido producto de las líneas de transmisión y los procesos de justificación), si bien los relojes de los multiplexadores son independientes.

La técnica de justificación de bit permite transferir el contenido de reloj de las señales digitales a lo largo de la cadena de transmisión en donde los relojes son asíncronos, como se muestra en la figura 2.1. Una señal de 2.048 Mbps es generada por una central digital de conmutación cuyo reloj es derivado de un reloj maestro. La señal multiplexada (línea **—** en el gráfico 2.1) no está sincronizada con la del reloj maestro pero la lleva incrustada gracias a la justificación de bit. Cuando la señal de 2.048 Mbps es

recuperada, todavía es síncrona con la del reloj maestro. Esta característica se la usa para transferir señales de reloj a lo largo de las redes PDH para sincronizar los relojes ubicados en locaciones distantes.

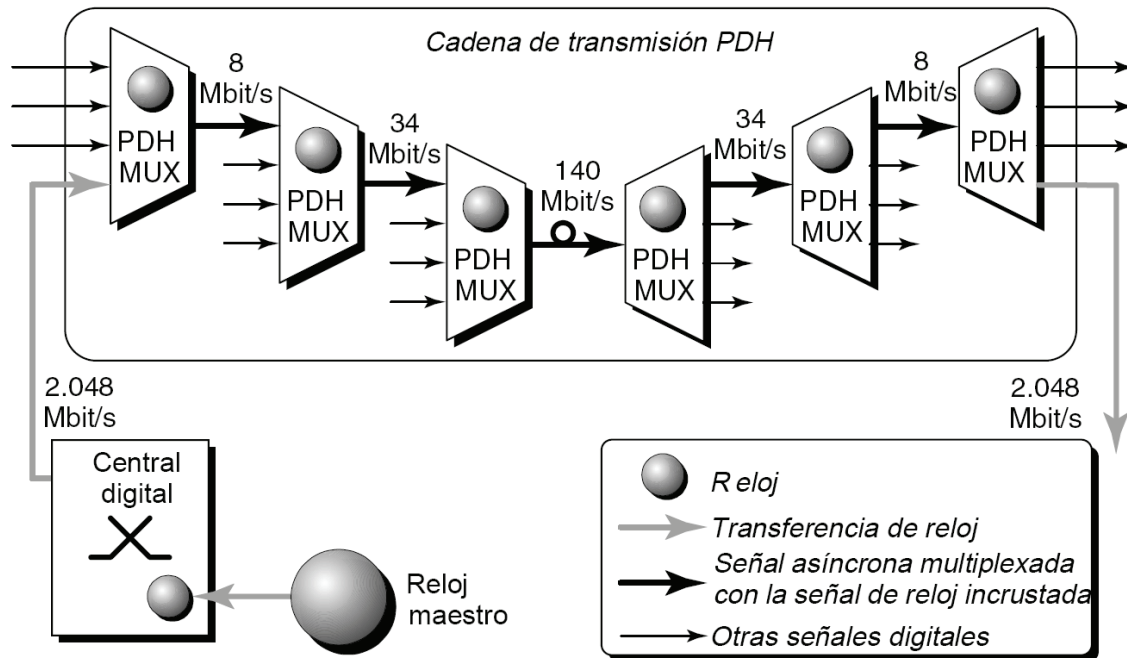


Figura 2.1. Transferencia de reloj a lo largo de la cadena de transmisión PDH

2.1.2.2 Sincronización de los equipos de conmutación digital PDH

La trama PCM europea de 2.048 Mbps está compuesta de 32 octetos o time-slots, de los cuales y dependiendo de la señalización usada, 30 o 31 time-slots llevan canales telefónicos de 64 Kbps. La conmutación digital y la cross-conexión se basan en el movimiento de canales telefónicos individuales entre un time-slot y otro, entre una señal de entrada a otra de salida. El intercambio de time-slots se logra básicamente retrasando un intervalo de tiempo conveniente a los time-slots entrantes antes de retransmitirlos en las tramas de salida en la posición (tiempo) correcta.

La conmutación digital solo puede suceder cuando las tramas entrantes (asíncronas al ser generadas por diferentes equipos con relojes diferentes) son sincronizadas, alineando su inicio de trama, de manera que los time-slots correspondientes a las diferentes entradas estén perfectamente alineados en el tiempo. Por lo tanto, una de las obligaciones en la etapa de entrada de las centrales conmutadoras digitales y en la de los

cross-conectores es de sincronizar los bits y las tramas de las señales PCM entrantes, antes de trasladarlas a la etapa de conmutación, como se muestra en la figura 2.2.

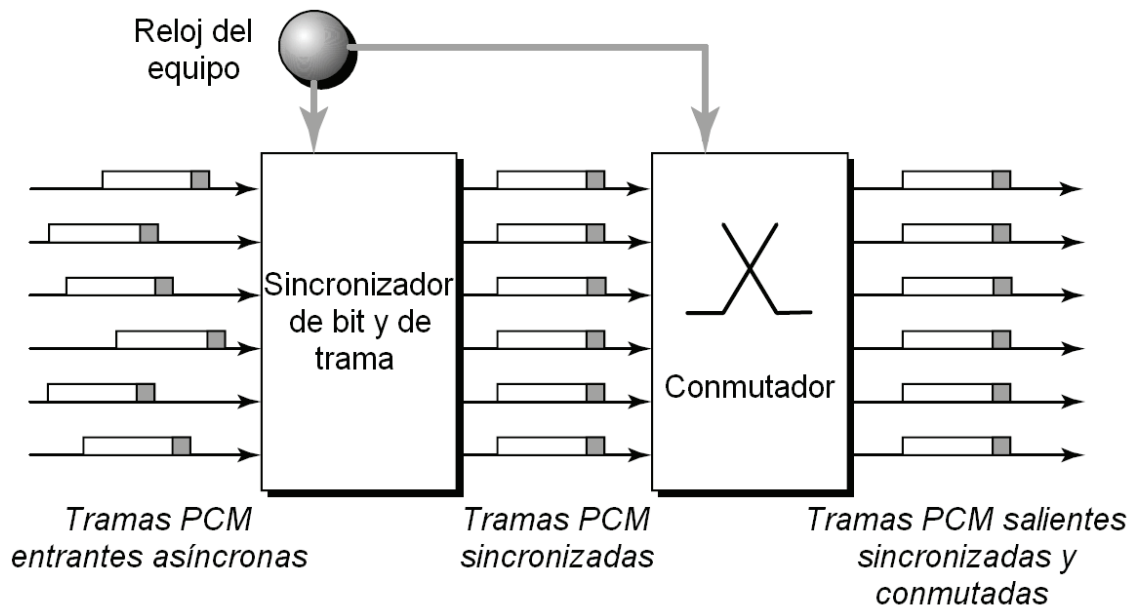


Figura 2.2. Sincronización de bit y trama en la etapa de entrada de una central de conmutación digital PDH

Cada trama PCM entrante es sincronizada a nivel de bit de acuerdo con el reloj local del equipo de manera que todas las tramas puedan ser alineadas en el tiempo. El sincronismo de bit y de trama es logrado mediante la técnica de “slip buffering” la cual es mucho más sensible a las variaciones de frecuencia entre los relojes aún cuando estas estén dentro del valor de tolerancia nominal usados en la transmisión digital PDH (aquí se usa justificación de bit para lograr el sincronismo de bit). Por esta razón es necesario mejorar la exactitud de los relojes de los equipos de conmutación.

En las redes que usan PDH como infraestructura de transporte, es necesario sincronizar los multiplexadores de tasa primaria y los equipos de conmutación digital, como las centrales de conmutación de 64 kbps y los cross-conectores, como se muestra en la figura 2.3. Las señales de reloj suelen ser transportadas por los enlaces PDH gracias a que estos no necesitan ser sincronizados ya que los relojes contenidos en las señales digitales transportadas son transparentes.

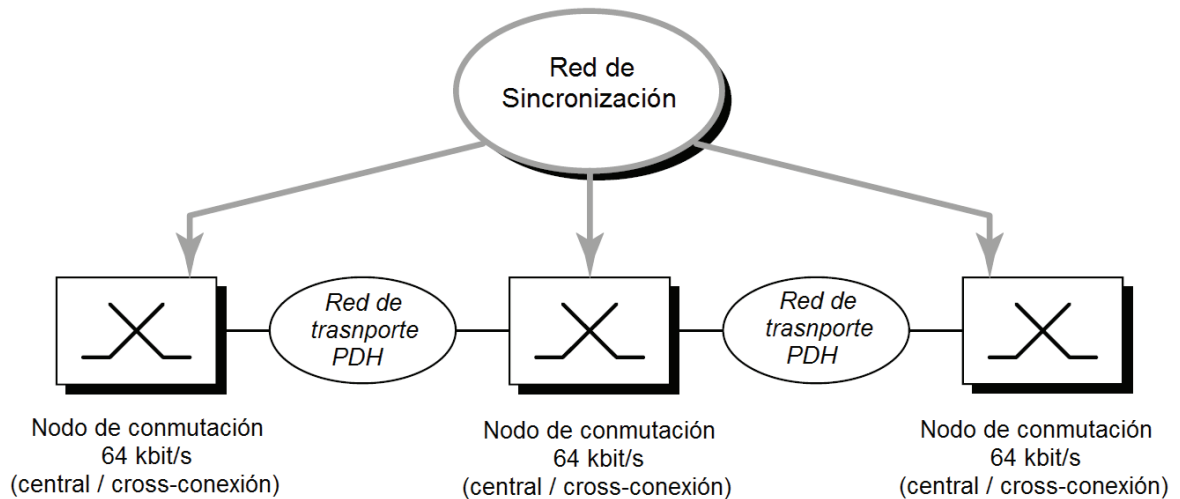


Figura 2.3. Sincronización de los equipos de conmutación digital para las redes PDH

En la figura 2.4 se muestra el esquema de sincronización de dos nodos de conmutación digital a través de la red de transporte PDH. El reloj de la primera central digital está subordinado a un reloj maestro de tal manera que todas las salidas de 2.048 Mbps sean síncronas. El reloj de la segunda central es sincronizado por una de estas señales de 2.048 Mbps (la cual también puede ser usada para transportar datos), que es transportada a lo largo de la cadena de transmisión PDH desde la primera central hasta la segunda, multiplexada con otras señales.

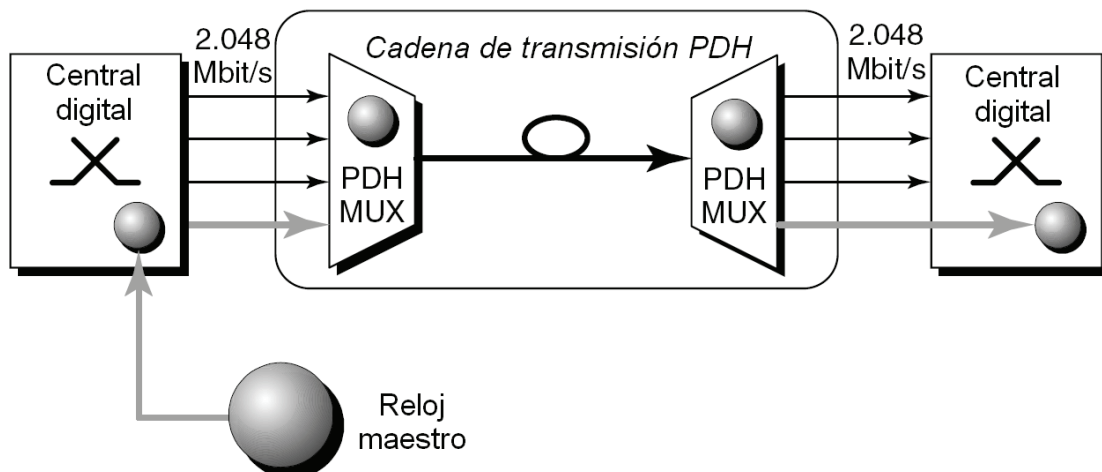


Figura 2.4. Sincronización de dos centrales digitales a través de la cadena de transmisión PDH.

Existe un segundo esquema para la sincronización de dos nodos basado en la disponibilidad de una red de sincronismo que utiliza unidades de distribución de sincronismo (SSU – Synchronization Supply Units) donde un reloj esclavo, sincronizado

por otro maestro, sirve a toda una oficina distribuyendo señales de reloj a todos los equipos desplegados ahí, incluyendo centrales de conmutación digital, cross-conectores digitales, etc.

En el esquema descrito en la figura 2.5, el reloj de la primera central de conmutación digital está sincronizado por la unidad de distribución de sincronismo local, que a su vez está sincronizado por un reloj maestro. La señal de 2.048 Mbit/s transportada a través de la red de transmisión PDH sincroniza el reloj de la unidad de distribución de sincronismo en el otro extremo. El reloj de la segunda central no está directamente sincronizado por la señal de 2.048 Mbit/s transportada sino que recibe sincronismo de la unidad de distribución de sincronismo.

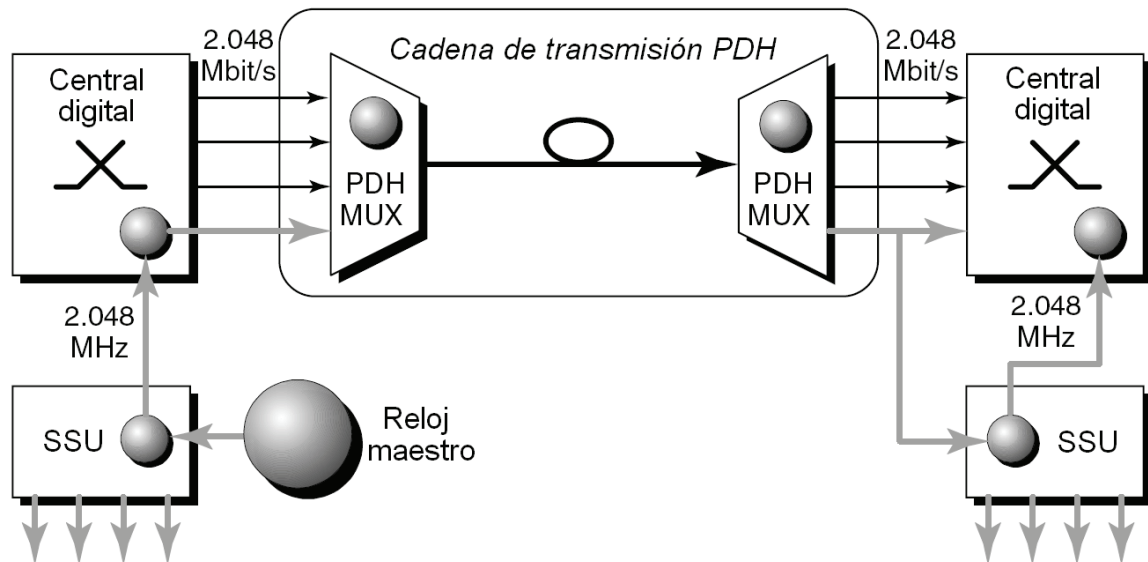


Figura 2.5. Sincronización de dos centrales digitales usando unidades de distribución de sincronismo (SSU) a través de la cadena de transmisión PDH.

2.1.3 Requerimientos de sincronismo en las redes digitales SDH/SONET

A diferencia de PDH, SDH usa un esquema de multiplexación digital síncrona, debido a esto, para la transmisión SDH es necesario sincronizar no solo los multiplexadores de tasa primaria y los equipos de conmutación digital sino todos los nodos de la red de transporte SDH, como se muestra en la figura 2.6.

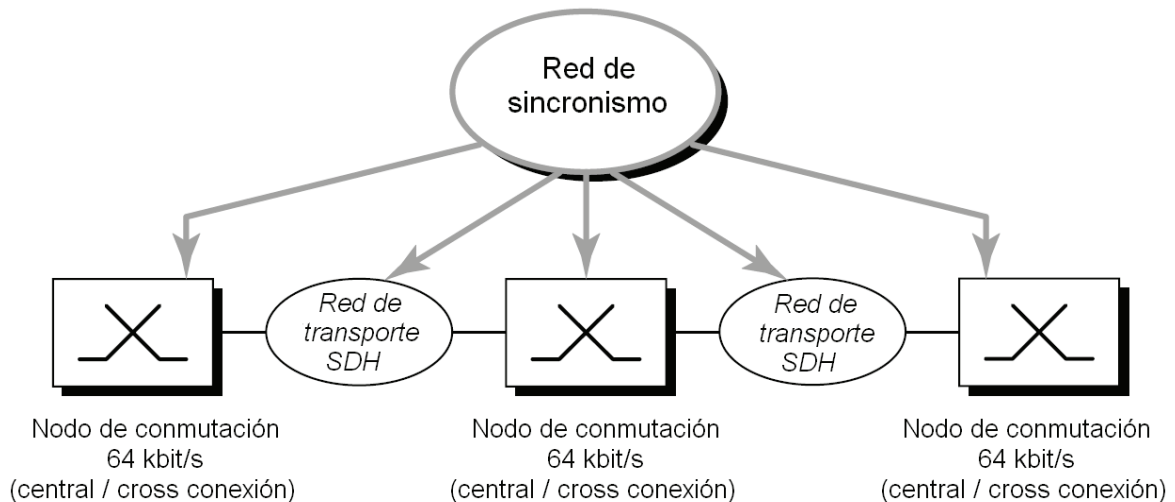


Figura 2.6. Sincronización de los equipos de conmutación digital y transporte para las redes SDH.

La transmisión SDH toma ventaja de la red de sincronismo para limitar la generación de jitter y wander en la salida de los tributarios. El objetivo es garantizar que se cumplan los requerimientos de jitter dentro de las fronteras PDH-SDH y SDH-PDH en redes complejas, donde ocurren varios procesos de mapeo/demapeo y donde se encuentran desplegados equipos de diferentes proveedores. Esto se logra solamente sincronizando todos los elementos de la red.

Sin embargo, la transferencia de las señales de reloj en las redes SDH no puede seguir el mismo esquema usado en PDH. En las redes SDH no se aconseja transportar señales de reloj sobre señales que son mapeadas en tramas STM-*N* (ej. 2.048 Mbps). La razón es que las cargas tributarias no transportan efectivamente la sincronización, debido al jitter exhibido en el proceso de justificación de puntero.

La mejor y la más directa manera de transportar una señal de reloj en las redes SDH es llevándolas directamente sobre las señales STM-*N* (Synchronous Transport Module). La calidad de las señales de reloj recuperadas de las señales STM-*N* es la mejor realizable hoy en día, ya que estas solamente son afectadas por un jitter de línea (jitter producido por ruido térmico y por las condiciones ambientales de la línea óptica) y no por justificación de bit o alguna otra técnica de mapeo.

El esquema de sincronización de dos centrales de conmutación digital a través de una cadena de transmisión SDH se muestra en la figura 2.7. A diferencia de la sección

previa, aquí solamente se considera el esquema basado en la disponibilidad de una red de sincronismo que utiliza SSU's (unidades de distribución de sincronismo), ya que es recomendado por la UIT (Rec. G.803 *Arquitecturas de Redes de Transporte Basadas en SDH*) y por la ETSI (EG 201 793 *Synchronization Network Engineering*) como solución para redes de sincronización.

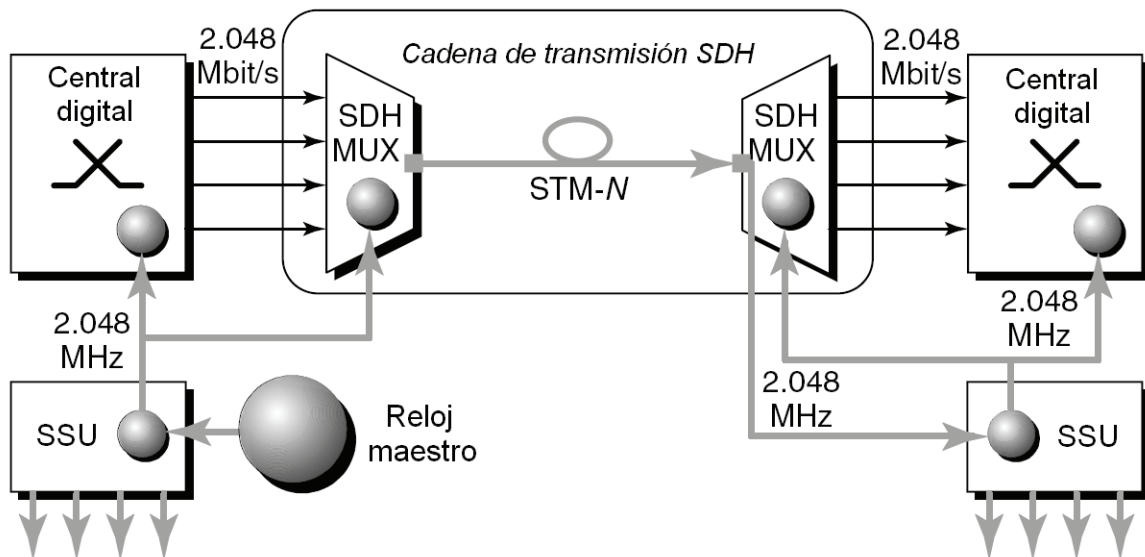


Figura 2.7. Sincronización de dos centrales digitales usando unidades de distribución de sincronismo (SSU) a través de la cadena de transmisión SDH.

La unidad de distribución de sincronismo sincroniza no sólo la central digital, sino que también el reloj del equipo SDH (SEC – SDH Equipment Clock), de manera que la salida del multiplexador es síncrona con el reloj maestro de la red, contrariamente al PDH donde la señal del multiplexador es asíncrona pero transporta la señal de reloj. En el lado receptor, el SEC del demultiplexador no está enganchado directamente a la señal STM-N entrante. Una función especial del SEC permite recuperar la señal de reloj de la señal STM-N entrante y hacerla salir directamente, sin filtrarla, como una señal de 2.048 MHz conforme la norma UIT-T Rec. G.703. Esta señal se la usa para sincronizar la unidad de distribución de sincronismo del otro extremo y esta a su vez distribuye su reloj a los equipos desplegados ahí, incluyendo la central digital y el demultiplexador SDH.

Si bien esta manera de sincronizar los relojes en la segunda central puede parecer innecesariamente compleja, vale la pena mencionar que esta es la mejor solución. De hecho, los relojes de las SSU tienen una estabilidad y una capacidad de filtrado más alta que los SEC. Siguiendo este esquema, los relojes de la segunda central digital y del demultiplexador SDH

están sincronizados por una señal de reloj mucho más estable. Por otra parte, si la señal STM-*N* llegara a fallar, la SSU garantiza una frecuencia de salida a largo plazo en modo de funcionamiento libre (free-running) mucho más exacta que la de un SEC.

2.1.4 Requerimientos de sincronismo de las redes de transporte ATM

Debido a que en el acrónimo de ATM (Asynchronous Transfer Mode) está la palabra *Asíncrono*, a veces se piensa que el modo natural de operación de los equipos ATM es en un ambiente no-síncrono, en redes donde los relojes son independientes y no sincronizados. En realidad, la palabra 'Asíncrono' no hace referencia al modo de operación de los relojes de los equipos, ni tampoco a la transferencia de información a nivel físico, sino que se refiere al modo de transferencia de la información, a un nivel más alto de abstracción. En otras palabras, se precisa que las fuentes de información sean asíncronas, es decir, se envía información en instantes independientes y no en time-slots predeterminados como es el caso del modo de transferencia síncrono (STM), por ejemplo E1.

Contrariamente a este mal entendido, la sincronización juega un rol esencial en las redes ATM especialmente si estas integran ciertos servicios basados en STM por ejemplo servicios de 2 Mbps sobre ATM o un ruteador IP que provea de servicios de VoIP conectado directamente a la red pública conmutada (PSTN), etc. Esto quiere decir que los requerimientos de sincronismo en las redes ATM dependen de los servicios que se manejen sobre ella. En otras aplicaciones, donde los servicios no necesitan ser sincronizados, la implementación de una red de sincronismo sería un desperdicio de recursos. Para resumir, el equipamiento de ATM necesita ser sincronizado principalmente en dos situaciones:

- Para dar soporte a servicios que requieren de una tasa de bit constante (CBR – Constant Bit Rate)
- Para dar soporte a interfaces físicas síncronas, como el E1/DS1 primario o señales provenientes de SDH/SONET.

La emulación de una conmutación de circuitos sobre un ambiente de conmutación de paquetes que permita brindar servicios CBR requiere que el reloj transportado se

mantenga a lo largo de la red ATM. Para este propósito, la UIT-T dispuso la técnica de *etiqueta de tiempo síncrona residual* (SRTS - Synchronous Residual Time Stamp) como estándar para la recuperación de reloj para la emulación de circuitos AAL-1 sobre redes ATM. Si bien los detalles del funcionamiento de esta técnica de emulación están fuera del alcance de este trabajo, cabe señalar que esta técnica se basa en la disponibilidad, en los equipos ATM donde las conexiones AAL son originadas y terminadas, de una señal de sincronización con trazabilidad a un reloj maestro común de toda la red.

Por otra parte, el soporte de interfaces físicas como el E1 o las señales SDH exige que los equipos ATM puedan ser sincronizados por medio de una señal de reloj externa, y de esta manera puedan generar señales síncronas que faciliten la comunicación con otros equipos en la red existente.

Por estas razones, los estándares internacionales requieren que los equipos ATM acepten señales de reloj externas y se integren a las redes de sincronismo. La sincronización de los equipos modernos de ATM se logra usando puertos dedicados. Las interfaces físicas típicas pueden ser de datos como el E1 (2.048 Mbps) o DS1 (1.544 Mbps) o analógicas como de 2.048 MHz, que cumplan con la norma UIT-T Rec. G.703. Los primeros equipos ATM carecían de dichos puertos, debido a que los requerimientos de sincronismo de ATM no estaban totalmente entendidos. De hecho, esta falta de puertos de sincronismo hace del soporte de los servicios CBR en estos equipos una tarea muy difícil.

La manera más directa de sincronizar los equipos ATM es la integración de los mismos a una red de sincronismo que utiliza SSU. En este ambiente, los equipos ATM toman la referencia de tiempo de una SSU, que por definición es la fuente que entrega la señal de reloj más exacta en todo el edificio. En caso de que no se disponga de una SSU, es decir, donde no exista una red de sincronismo o el equipo ATM esté fuera del alcance de la misma, entonces la manera más factible de brindar sincronismo es a través de una señal entrante SDH, E1 o DS1.

2.1.5 Requerimientos de sincronismo de las redes telefónicas celulares inalámbricas

Las redes telefónicas inalámbricas tienen requerimientos de sincronismo similares a los requerimientos de las redes telefónicas fijas. La arquitectura general de las redes telefónicas celulares inalámbricas se muestra en la figura 2.8: la estación radio base (BTS – Base Transceiver Station) permite el enrutamiento de la llamadas desde la ‘interface aérea’ a la infraestructura de la red, que incluye a los controladores de radiobase (BSC – Base Station Controller), los conmutadores centrales (MSC – Mobile Switching Centres) y de ahí a la red pública conmutada (PSTN). Las interfaces aéreas pueden ser la europea GSM (Global System for Mobile communications) o el sistema celular norteamericano CDMA (Code Division Multiple Access). Las BTS’s, BCS’s y MSC’s están interconectadas mediante troncales, que pueden ser sistemas PDH o SDH.

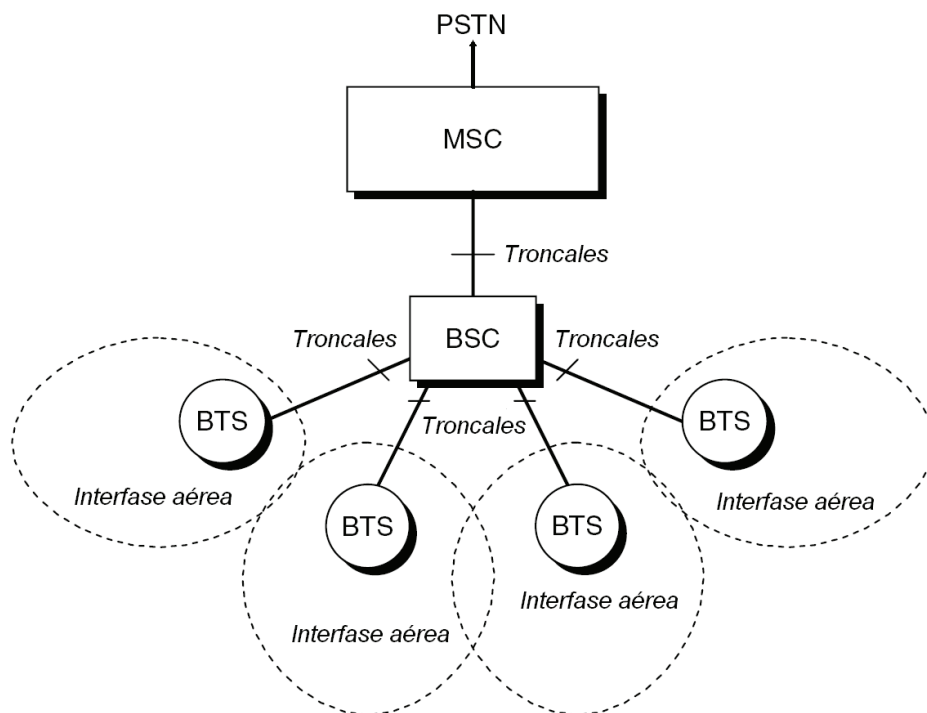


Figura 2.8. Arquitectura general de las redes telefónicas inalámbricas celulares

Como cualquier otro elemento de red, las BTS's, BSC's y MSC's necesitan ser sincronizadas para asegurar una interconexión sin slips en las troncales. Por otra parte, las BTS's necesitan ser sincronizadas para asegurar la estabilidad de la frecuencia de los canales inalámbricos. Más específicamente los sistemas CDMA y GSM necesitan por lo

menos una exactitud de frecuencia de 5×10^{-8} , mientras que los sistemas TDMA necesitan una exactitud de 5×10^{-7} . Además de exactitud en la frecuencia, los sistemas CDMA2000 necesitan también de una sincronización precisa de sus relojes debido a que los códigos de ensanchamiento son generados usando diferentes desplazamientos de fase de la misma secuencia de código M para la separación de las celdas y de los usuarios.

Debido a estas necesidades, los sistemas CDMA usan receptores de GPS (Global Positioning System) para sincronizar los relojes de sus elementos, así como para producir una frecuencia estable para las señales aéreas. El estándar IS-95 norteamericano de CDMA requiere que todas las radio bases transmitan sus secuencias piloto con error no mayor a 3 μ s. Las MSC's y BSC's también necesitan de una sincronización de reloj precisa, para asegurar handoffs (traspasos) no interrumpidos cuando un usuario transita de una celda a otra.

Por otra parte, los sistemas GSM y TDMA requieren de una frecuencia estable (0,05 ppm para GSM) pero no requieren del GPS que provea una señal de reloj precisa. Para cumplir con estos requerimientos, diferentes soluciones técnicas han sido propuestas.

La primera solución es el despliegue de relojes autónomos en cada radiobase. En este caso, relojes altamente costosos serían requeridos, tales como los relojes primarios especificados por la UIT-T G.811 o los relojes esclavos especificados por la UIT-T G.812 tipo II. Alternativamente, si se usan relojes más baratos, sería necesaria una recalibración periódica.

Una segunda y más común solución es equipar a las MSC's y BSC's con SSU's y de esta manera distribuir una señal altamente estable proveniente de un reloj maestro a través de una red de sincronismo. Así se logra la estabilidad de frecuencia requerida para mantener las interconexiones libres de slips y las señales aéreas estables.

De manera resumida, los requerimientos de sincronismo de las redes telefónicas inalámbricas son:

- *Estabilidad de Frecuencia* requerida por CDMA, GSM y TDMA para evitar que las frecuencias centrales de los canales aéreos se desvíen, resultando en

interferencia co-canal y problemas en los handoffs. De hecho, un control pobre de la frecuencia de transmisión causada por una referencia de frecuencia de mala calidad puede producir caída de llamadas, handoffs lentos entre las celdas e interferencia entre los canales. Durante la inicialización de una llamada y el handoff, la radiobase transmite una serie de instrucciones al teléfono celular para que realice cambios en frecuencia y en el time-slot. Bajo los efectos de transcientes, una radiobase puede enviar bastantes instrucciones correctivas para el ajuste de los parámetros de frecuencia y time-slot. Una sincronización de frecuencia precisa en cada radiobase previene estos problemas.

- *Estabilidad de tiempo* es requerida por las especificaciones de CDMA para mantener las secuencias piloto en todas las celdas dentro de un estricto límite de desalineamiento de tiempo y para asegurar que no haya interrupción en los handoffs cuando un usuario transita de una celda a otra.
- Los nuevos servicios, como los teléfonos móviles localizadores y los sistemas inalámbricos de tercera generación (UMTS) requerirán inclusive más estabilidad de frecuencia y de tiempo.
- Las troncales entre las BTS's, BSC's y MSC's consisten generalmente de sistemas E1/T1, pero pueden migrar en el futuro a alguna otra tecnología de transporte que no ofrezca una buena transparencia a la señal de reloj transportada, como ATM, radio, etc. En este caso, la disponibilidad de un buen sincronismo externo será aún más necesario.

2.2 ESTRATEGIAS PARA LA SINCRONIZACIÓN DE REDES DE TELECOMUNICACIONES

Asumiendo que el problema táctico de transferir señales de reloj de un nodo a otro ha sido resuelto, entonces una estrategia adecuada para sincronizar la red debe ser establecida. Dependiendo de los requerimientos específicos de la aplicación, existen diferentes enfoques para organizar la distribución de un reloj a todos los nodos de la red.

2.2.1 Sincronización Plesiócrona

Una estrategia totalmente plesiócrona en realidad es una *estrategia de no sincronismo*, que no incluye ninguna distribución de sincronismo a los relojes de la red. Cada reloj es independiente de los otros (relojes autónomos), como se muestra en la figura 2.9.

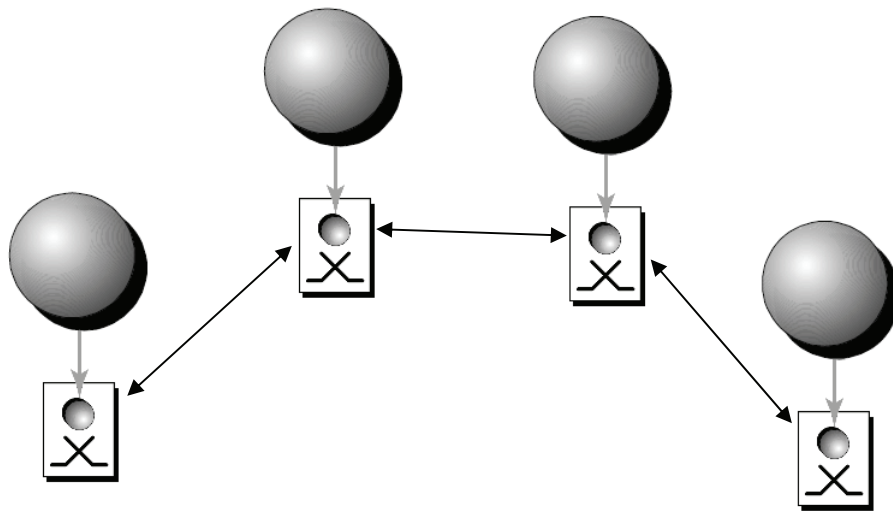


Figura 2.9. Estrategia de sincronismo Plesiócrona

Debido a la carencia de una distribución de señales de reloj, la sincronización de los procesos en diferentes nodos es confiada a la exactitud de los relojes autónomos de la red, los cuales deben mostrar un excelente desempeño. Con una sincronización meramente anárquica, los relojes no solamente necesitan ser calibrados cuidadosamente a una frecuencia nominal durante la instalación, sino que también requieren ser recalibrados periódicamente para compensar los desvíos de frecuencia producidos por el envejecimiento. Para las redes basadas en una operación plesiócrona, sus relojes deben mantener una exactitud de frecuencia de largo plazo de al menos 1×10^{-11} . La robustez intrínseca y la simplicidad de esta estrategia se contraponen con los altos costos de instalación y mantenimiento necesarios si los requerimientos de sincronismo son exigentes.

2.2.2 Sincronización Maestro – Esclavo

El principio de la estrategia de sincronización maestro – esclavo se basa en la distribución de una referencia de tiempo proveniente de un reloj (*reloj maestro*) a todos

los otros relojes de la red (*relojes esclavos*), de manera directa o indirecta, siguiendo una topología de estrella o de árbol como se muestra en la figura 2.10. En una red de sincronismo tipo estrella, un reloj maestro común sincroniza a todos los relojes esclavos mediante enlaces directos. En una topología de árbol, el sincronismo se distribuye a lo largo de rutas que pueden abarcar varios relojes esclavos, organizados en niveles jerárquicos.

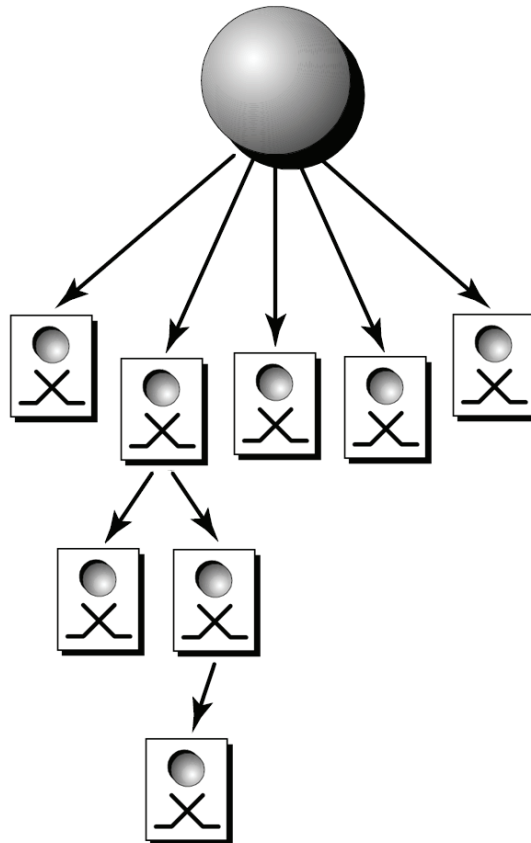


Figura 2.10. Estrategia de sincronización Maestro – Esclavo, topología de árbol y estrella

Si bien el reloj maestro debe ser un oscilador de alta precisión costoso (normalmente basado en un estándar de frecuencia atómico), los relojes esclavos son mucho más baratos. Un reloj esclavo es normalmente implementado como un PLL, y menos frecuente como un FLL (Frequency Locked Loop), la mayoría basados en un oscilador de cuarzo enganchado a la señal de referencia proveniente del reloj maestro. Existe, indudablemente, un inconveniente si el reloj maestro llegara a fallar. Una estrategia de jerarquía maestro – esclavo se ha concebido para este propósito.

Una variante de la estrategia de sincronización maestro – esclavo es la sincronización jerárquica maestro – esclavo, donde un reloj maestro sincroniza a los relojes esclavos de manera directa o indirecta siguiendo una topología de árbol, que está organizada en dos o mas niveles jerárquicos como lo muestra la figura 2.11. Se planean rutas alternativas que sirven de mecanismos de protección contra fallas del reloj y de los enlaces, no solamente entre el reloj ‘padre’ e ‘hijo’, sino también entre los relojes ‘hermanos’, ‘tios’, ‘primos’. Si el reloj maestro llegara a fallar, otro reloj toma su lugar siguiendo un modelo jerárquico.

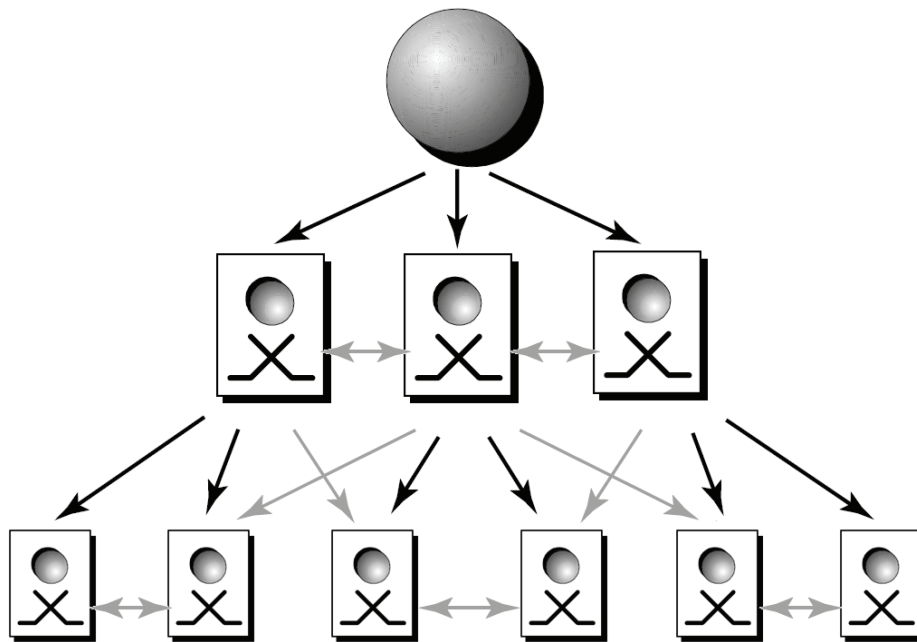


Figura 2.11. Estrategia de sincronización jerárquica Maestro – Esclavo

Durante una falla en las rutas de sincronización, pueden ser activadas rutas de protección de acuerdo a una tabla estática preseleccionada de enrutamiento, o activadas dinámicamente aprovechando las capacidades de comunicación entre los relojes para intercambiar mensajes describiendo su estado actual de sincronización. Si la referencia actual falla, el reloj es capaz de seleccionar la mejor referencia de entre todas las que están disponibles en sus entradas.

Actualmente esta estrategia es la más adoptada para sincronizar las redes digitales de telecomunicaciones modernas, debido a su excelente desempeño y confiabilidad, que puede ser alcanzado a un costo limitado. En particular, la selección dinámica de una referencia de sincronización, basada en un conjunto de *Mensajes de Estado de*

Sincronización (SSM – Synchronization Status Messages) intercambiados entre los relojes de los equipos para establecer las prioridades entre las entradas. Esta es la solución recomendada para sincronizar las redes SDH.

2.2.3 Sincronización Mixta Plesiócrona/Síncrona

Si bien la estrategia de sincronización jerárquica maestro – esclavo es la preferida por la mayoría de administradores para sincronizar sus redes nacionales, es evidente lo difícil que puede ser enganchar todos los relojes de estos elementos a una referencia supranacional de tiempo común.

En realidad, el sistema de posicionamiento global (GPS – Global Positioning System) puede facilitar esta tarea, desde un punto de vista técnico, pero no es aceptado como primera opción de referencia de tiempo primaria por muchos administradores por razones políticas, al estar bajo el control del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Entonces, si se considera las redes de diferentes países, lo más común es encontrar varias redes con topologías jerárquica maestro – esclavo cada una plesiócrona en relación con las otras como se muestra en la figura 2.12.

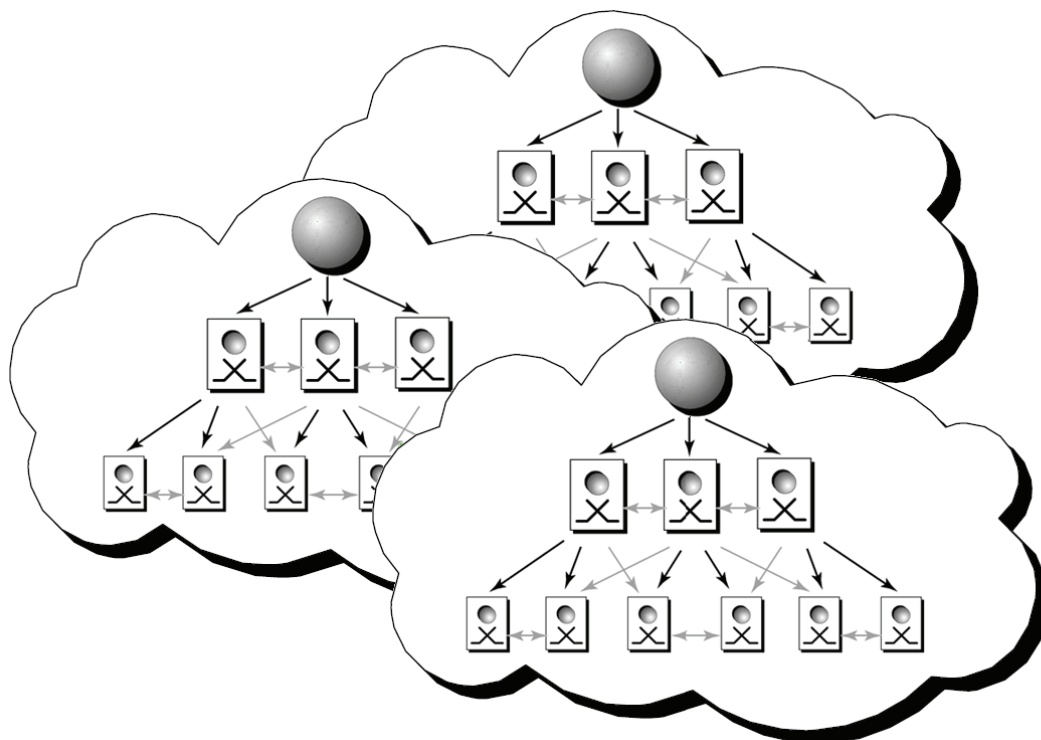


Figura 2.12. Sincronización Mixta Plesiócrona/Síncrona

2.2.4 Sincronización Mutua

La sincronización mutua está basada en el control mutuo y directo entre los relojes, de manera que la frecuencia de salida sea el resultado de la ‘sugerencias’ de los otros, como se muestra en la figura 2.13. En este modelo no existen maestros ni esclavos, sino cooperación mutua. Si bien, la disciplina de los elementos mutuamente controlados es difícil de garantizar.

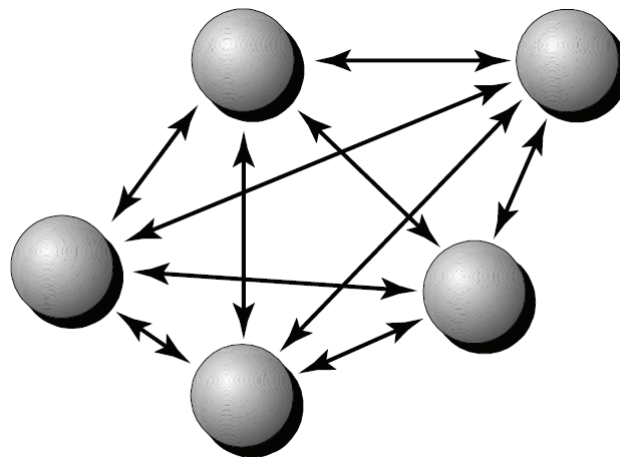


Figura 2.13. Sincronización Mutua

El modelado del comportamiento dinámico de estas redes, o inclusive el aseguramiento de la estabilidad de los algoritmos de control (el algoritmo de control debe amortiguar los defectos transitorios, impidiendo que estos se propaguen de manera indefinida alrededor de los lazos de la red de sincronización), puede ser una tarea muy compleja. El comportamiento transitorio puede ser muy difícil de predecir y hace que este tipo de diseño tienda a ser muy caro, debido a la complejidad de su administración y control, pero sus resultados pueden ser extremadamente confiables. Por eso, hasta hoy en día, la aplicación de sincronismo mutuo ha sido limitada a casos especiales, por ejemplo las redes militares.

Existe una variante de este esquema donde se implementa una solución mixta, la estrategia de sincronización mutua – jerárquica. Aquí algunos elementos tienen más jerarquía que otros. Cada uno de los N nodos de red es asignado con un peso relativo ($0 \leq \omega_i \leq 1$), como se muestra en la figura 2.14. Cuando todos los pesos son iguales, esta estrategia

se vuelve sincronización mutua. Cuando el peso de uno de los relojes es igual a uno y todos los demás son cero, esta estrategia se vuelve sincronización Maestro – Esclavo.

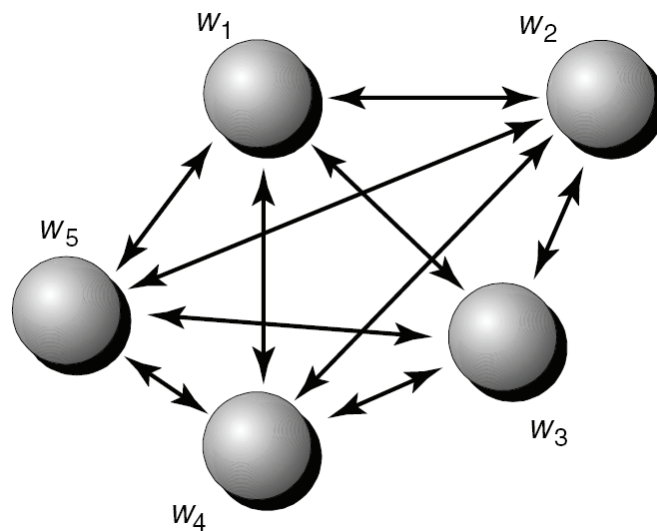


Figura 2.14. Sincronización Mutua/Jerárquica.

2.3 ARQUITECTURAS ESTANDARD DE LAS REDES DE SINCRONIZACIÓN

Como se mencionó en la sección anterior, de entre todas las estrategias concebidas para la sincronización de redes, la estrategia de Sincronización Jerárquica Maestro – Esclavo es la más usada para sincronizar las redes digitales modernas de telecomunicaciones. Más aún, los cuerpos de la UIT-T, ANSI y ETSI han definido las arquitecturas estándar para las redes de sincronización basándose en esta estrategia.

Estas arquitecturas estándar jerárquicas maestro – esclavo no varían en principio. Estas están organizadas en niveles jerárquicos:

- En el nivel 0, un reloj maestro (o más relojes maestros para mejorar la confiabilidad) genera la señal de referencia de la red, funcionando de modo autónomo;
- En los niveles mas bajos 1, 2, etc., relojes esclavos que son sincronizados por las señales provenientes de un nivel superior, y que sincronizan a los relojes que están en un nivel inferior.

De esta manera, durante operación normal, todos los relojes de la red son trazables a un reloj maestro. La sincronización es transferida desde un reloj a otro de acuerdo a los requerimientos de la red.

2.3.1 Arquitectura de ETSI e UIT-T para las redes de sincronismo

El Comité Técnico de Transmisión y Multiplexación de la ETSI (TM3, Working Group 6) empezó a trabajar en un nuevo conjunto de estándares para la sincronización de las redes digitales a comienzos de los años 90. El resultado principal fue una familia de documentos que cubren varios aspectos de la sincronización de redes, EN 300 462 *Transmission and Multiplexing (TM); Generic Requirements for Synchronization Networks*, cuya sección 2-1 define la arquitectura de las redes de sincronismo. Más aún, el EG 201 793 *Synchronization Network Engineering* redactado después por la ETSI a principios de 1999, establece una guía de la manera en que las especificaciones y principios, según lo presentado por varios documentos de la ETSI e UIT-T, pueden ser aplicados en las redes prácticas, tanto en las nuevas como en las existentes.

En paralelo con la ETSI, a principios de 1990, la UIT-T empezó a reescribir las viejas recomendaciones G.810 (*Considerations on Timing and Synchronization Issues*), G.811 (*Timing Requirements at the Outputs of PRCs Suitable for PDH operation of International Digital Links*), G.812 (*Timing Requirements at the Outputs of Slave Clocks for PDH operations of International Digital Links*), previamente publicadas en el Libro Azul, 1988, que trataban con las redes PDH. Estas recomendaciones han caducado y han sido substituidas por un nuevo conjunto de recomendaciones G.810 (*Definitions and Terminology for Synchronization Networks*), G.811 (*Timing Characteristics of Primary Reference Clocks*), G.812 (*Timing Requirements of Slave Clocks Suitable for Use as Node Clocks in Synchronization Networks*), y G.813 (*Timing Characteristics of SDH Equipment Slave Clocks (SEC)*) que especifican las características de los relojes aptos para el uso en las redes digitales de telecomunicaciones (incluyendo las basadas en SDH). Más aún, la UIT-T trabajó en la arquitectura de las redes de sincronismo, la cual está especificada en la Sección 8 de la Rec. G.803 *Architectures of Transport Networks Based on SDH*.

Debido a que fueron las mismas personas las que trabajaron en el grupo de la ETSI y en el comité de la UIT-T, los dos estándares se corresponden y usan la misma notación, excepto por detalles mínimos. Esto es verdad no solo para la arquitectura de las redes de sincronismo, sino también para las especificaciones del desempeño de los relojes.

2.3.1.1 Alcance de los estándares definidos por la ETSI e UIT-T

El alcance de la ETSI EN 300 462 e UIT-T Rec. G.803 Sección 8 es el diseño de una red de sincronismo apta para la sincronización de las redes SDH y PDH. Por lo tanto, estas se aplican para el diseño de nuevas redes de sincronismo. Se entiende que las otras redes existentes (redes de conmutación digital) pueden ser servidas por este modelo y pueden tomar ventaja de ello.

2.3.1.2 Estrategias para la Sincronización

Los estándares de la ETSI EN 300 462 y de la UIT-T Rec. G.803 Sección 8 mencionan que dos métodos fundamentales para la sincronización de relojes nodales pueden ser usados: Sincronización Maestro – Esclavo y Sincronización mutua. De cualquier manera, solo la sincronización maestro – esclavo es juzgada como ‘apropiada para sincronizar las redes SDH’ y recomendada como arquitectura estándar, mientras que la sincronización mutua se deja para un estudio futuro.

2.3.1.3 Tipos de Relojes y sus Funciones en las Redes de Sincronismo

Las siguientes funciones lógicas, representando los relojes en los diferentes niveles de la red de sincronización, son definidas.

- *Reloj de Referencia Primaria (PRC – Primary Reference Clock)*. Un PRC es definido como la representación de un reloj autónomo o de un reloj que acepta una señal de referencia de sincronismo de algún radio o satélite (por ejemplo GPS) y realiza un filtrado de la misma. El PRC, por lo tanto, representa el reloj maestro de la red.
- *Unidad de Distribución de Sincronismo (SSU – Synchronization Supply Unit)*. Una SSU, también conocida como *Equipo de Sincronización Autónomo (SASE -*

Stand-Alone Synchronization Equipment) es definido como un dispositivo, que en un nodo de red:

- ↳ Acepta entradas de sincronismo de fuentes externas, seleccionando una de estas;
 - ↳ Filtra la señal de reloj proveniente de la entrada seleccionada;
 - ↳ Distribuye la señal filtrada de reloj a otros elementos dentro del nodo;
 - ↳ Puede usar una fuente de reloj interna si todas las referencias externas llegaran a fallar o a degradarse
- *Reloj de Equipo SDH (SEC – SDH Equipment Clock)*. Un SEC es definido como un dispositivo que, como reloj interno de un elemento de una red SDH:
- ↳ Acepta entradas de sincronismo de fuentes externas, seleccionando una de éstas;
 - ↳ Filtra la señal de reloj proveniente de la entrada seleccionada;
 - ↳ Puede usar una fuente de reloj interna si todas las referencias externas llegaran a fallar o a degradarse.

2.3.1.4 Arquitectura de la Red de Sincronismo

La sincronización maestro – esclavo es recomendada como arquitectura de una red de sincronismo. Los relojes son organizados en base a una jerarquía, en donde los relojes de cada nivel son sincronizados por relojes de nivel superior. Cuatro niveles jerárquicos han sido definidos:

- *Nivel 1 – PRC*, cuyas características han sido definidas por la UIT-T Rec. G.811 y la ETSI EN 300 462 parte 6-1;
- *Nivel 2 – Reloj Esclavo (nodo de tránsito)*, comúnmente una SSU/SASE, cuyas características han sido definidas por la UIT-T Rec. G.812 y la ETSI EN 300 462 parte 4-1;
- *Nivel 3 – Reloj Esclavo (nodo local)*, comúnmente una SSU/SASE, cuyas características han sido definidas por la UIT-T Rec. G.812 y la ETSI EN 300 462 parte 4-1;

- *Nivel 4 – SEC*, cuyas características han sido definidas por la UIT-T Rec. G.813 y la ETSI EN 300 462 parte 5-1;

El PRC es el reloj de mayor exactitud y el SEC es el de menor exactitud en la escala jerárquica. Durante la operación normal, todos los relojes de una red maestro – esclavo son trazables al PRC.

La exactitud recomendada para un PRC es de 1×10^{-11} . Por lo tanto, dos redes que deriven sus relojes de PRC diferentes, experimentarían a lo mucho pocos slips por año. Por esta razón, algunos administradores prefieren establecer una arquitectura con múltiples PRC en vez de una arquitectura simple maestro – esclavo.

La distinción entre los relojes esclavos de nodo de tránsito y de nodos locales está referida a la posición de los mismos en la cadena de sincronización (ver figura 2.17).

Se definen dos tipos de distribución de sincronismo: distribución intranodo e internodo.

- *Distribución Intranodo* ocurre dentro de los nodos que contienen una SSU, por ejemplo el edificio de una central PSTN. Se usa una topología lógica de estrella. Dentro de los límites del nodo, todos los relojes de los elementos son sincronizados por el reloj de nivel jerárquico más alto en el nodo. Solamente este reloj recupera las señales de tiempo provenientes de los otros nodos a través de los enlaces de sincronismo. La arquitectura de la red de sincronismo para la distribución intranodo está representado en la figura 2.15.

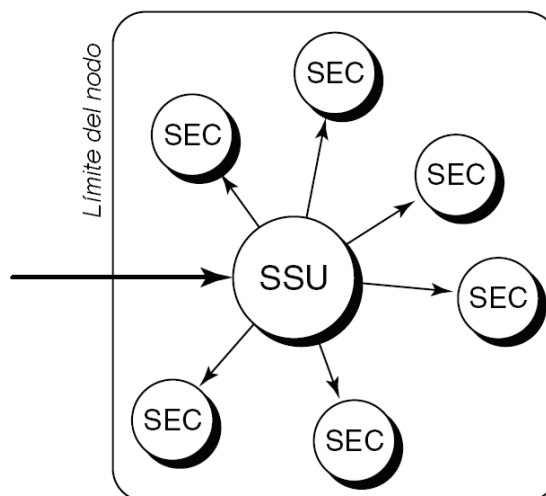


Figura 2.15. Arquitectura para la distribución intranodo

- *Distribución Internodo* ocurre entre los nodos y sigue una topología de árbol, según la arquitectura de red de sincronismo para la distribución Internodo representado en la figura 2.16. Para la correcta operación de la red de sincronismo, los relojes solo pueden ser sincronizados por relojes de igual o mayor jerarquía, inclusive en condiciones de falla. De cualquier manera, los lazos de sincronismo deben ser evitados.

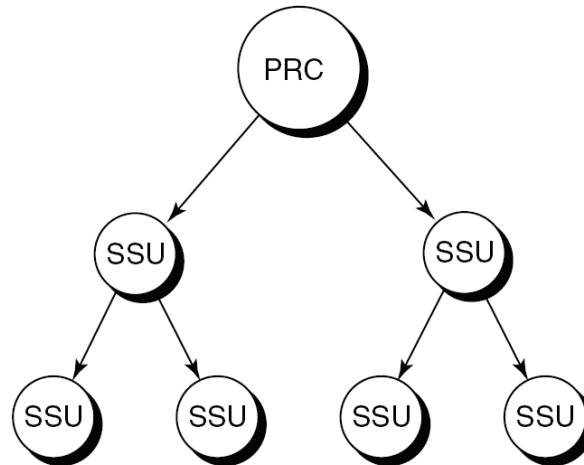


Figura 2.16. Arquitectura para la distribución internodo

2.3.1.5 Señales y enlaces para la distribución Intranodo e Internodo

La distribución Intranodo es realizada sobre distancias pequeñas (típicamente menos de 100 m). En los países donde se adoptó el PDH europeo, las señales físicas usadas son la señal analógica de 2.048 MHz o la señal E1 de 2.048 Mbps. En los países donde se usa el PDH Norteamericano, se usa la señal DS1 de 1.544 Mbps. La recomendación de la UIT-T Rec. G.703 especifica las características físicas de las señales antes mencionadas, que son comúnmente transmitidas sobre cables coaxiales normales.

En la distribución Internodo, las señales de reloj son transferidas de un nodo a otro a lo largo de enlaces de sincronización, vía una red de distribución que puede usar la infraestructura de transporte existente. Los enlaces de sincronización pueden contener SEC's, pero el método de transferencia de reloj debe evitar un procesamiento de puntero intermedio que actúe sobre la fase de la señal que lleva la sincronización. Entonces, los dos posibles métodos a usar son:

- Recuperar el reloj de una señal entrante STM-*N*. Este método asegura la mejor calidad de transferencia de tiempo, porque el efecto de la acción impredecible del puntero cae sobre los tributarios mapeados y no sobre la señal multiplexada.
- Recuperar el reloj de un enlace de sincronización no proveniente de una red SDH, por ejemplo la señal de 2.048 Mbps transportada a lo largo de la cadena de transmisión PDH.

2.3.1.6 Cadena de Referencia de Sincronización

En la arquitectura estándar de sincronismo maestro – esclavo, la señal de reloj es distribuida desde el PRC a todos los otros nodos a lo largo de una cadena de relojes esclavos.

Para un mejor entendimiento de las cadenas de referencia de sincronización, es importante tomar en cuenta las siguientes características que distinguen a los PRC, SSU/SASE y SEC:

- El PRC, que es el reloj maestro de la red, funciona de manera autónoma y debe tener la exactitud de frecuencia más alta (1×10^{-11}) y estabilidad; cumple con la recomendación de la UIT-T G.811 y la ETSI EN 300 462 parte 6-1;
- La SSU/SASE es un reloj esclavo que distribuye su señal de reloj a los otros relojes que están dentro del límite del nodo y a los otros nodos ‘hijos’ en la arquitectura jerárquica maestro – esclavo; su objetivo principal es de filtrar de manera efectiva las imperfecciones temporales de su referencia y de proveer una señal altamente estable en caso de que todas las referencias fallen; su constante de tiempo de enganche (lock time constant) es por lo tanto muy grande (típicamente, por lo menos 1000 s), para filtrar la mayor cantidad de ruido de fase posible; cumple con la recomendación de la UIT-T G.812 y la ETSI EN 300 462 parte 4-1;
- El SEC es un reloj esclavo con requerimientos de estabilidad a largo plazo pobres y con una constante de lazo de tiempo (loop time constant) pequeña, típicamente, no más de 1 segundo; cumple con la recomendación de la UIT-T G.813 y la ETSI EN 300 462 parte 5-1;

Tanto la ETSI como la UIT-T han definido una *cadena de referencia* como se muestra en la figura 2.17. El primer reloj en la cadena es el PRC. De ahí, se construye una cadena de relojes de nodos (SSU): las SSU intermedias son SSU's de los nodos de tránsito, la última SSU puede ser un nodo de tránsito o un nodo local. Las SSU's están interconectadas por medio de un número variable de SEC's.

En general, la calidad de la sincronización se degenerará a medida que el número de relojes en serie se incremente. Para cumplir los requerimientos de sincronización, la cadena no debe exceder K SSU's y hasta N SEC's interconectando dos SSU's. Los valores para el peor caso de sincronización SDH son $K = 10$ y $N = 20$, con un número límite de SEC's en una cadena de 60. Estos valores han sido derivados en base a cálculos teóricos y simulaciones. De cualquier manera, en un diseño práctico de una red de sincronismo, el número de elementos en serie debe ser minimizado por razones de confiabilidad y desempeño.

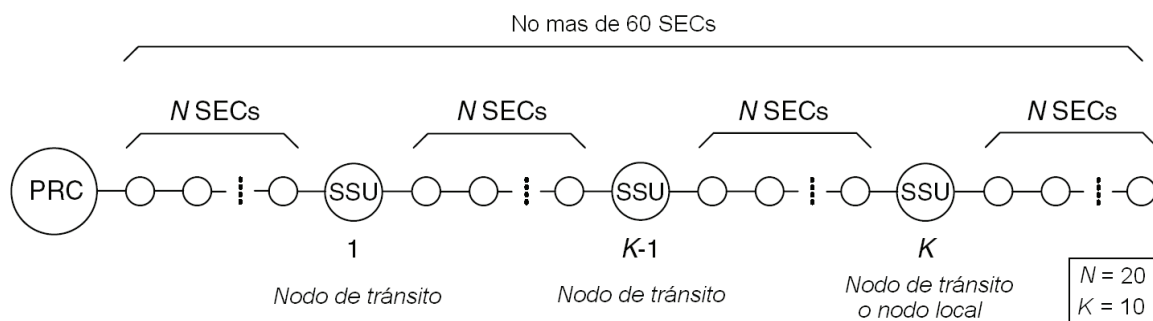


Figura 2.17. Cadena de Referencia de Sincronización de la ETSI e UIT-T

2.3.2 Arquitectura de ANSI para las Redes de Sincronismo

Los estándares norteamericanos para la sincronización de redes digitales datan desde antes de los estándares de la ETSI e UIT-T. Como consecuencia, en cierto aspectos, estos estándares son también menos detallados, pero han marcado el camino para el desarrollo de los estándares de la ETSI e UIT-T.

La ANSI publicó dos documentos relacionados con la sincronización de redes:

T1.101 *Telecommunications – Synchronization Interface Standard* y T1.105.09 *Telecommunications – Synchronous Optical Network (SONET) – Network Element Timing and Synchronization*. El primer documento indica una concordancia de todas las

redes de sincronismo que es la distribución de señales de referencia de sincronismo desde uno o más fuentes de referencia primaria (relojes maestros) hacia los relojes de los nodos en los niveles inferiores. En el nivel más bajo, el último nodo distribuye la sincronización al equipo del cliente o a otras redes.

2.3.2.1 Estratos

La ANSI ubica a los relojes de las redes de sincronismo en una jerarquía basada en los niveles de desempeño (*Estratos*): llamados estratos 1, 2, 3, 4 y 4E. Los laboratorios de Bell Communications (Bellcore o Telcordia) han definido un nivel adicional llamado Estrato 3E, el cual se ubica entre los estratos de la ANSI 2 y 3. Para poder mantener un cierto nivel de desempeño, un reloj debe cumplir algunos requerimientos específicos en varios aspectos como exactitud sin referencia (free-run), holdover, etc.

La fuente de referencia primaria (PRS – Primary Reference Source) es el reloj maestro de la red que es capaz de mantener una exactitud de frecuencia de al menos 1×10^{-11} . Un PRS de *estrato-1* es un reloj completamente autónomo que provee una señal de reloj sin necesidad de una referencia externa. Los relojes de estrato-1 consisten normalmente de un arreglo de referencias de frecuencias de cesio. Sin embargo, existen dos tipos de PRS's que no son autónomos pero que se les considera como referencias de estrato-1: los relojes GPS y LORAN-C. Estos sistemas usan un oscilador local de rubidio o cuarzo que es dirigido por la información de tiempo obtenida de los sistemas receptores GPS y LORAN-C. LORAN-C es un sistema terrestre que fue desarrollado para la navegación marítima y es operado por los guardacostas de los Estados Unidos. NAVSTAR GPS es un sistema satelital desarrollado por las necesidades de navegación del departamento de defensa de los Estados Unidos y es operado por la fuerza aérea de dicho país. Existe la contraparte rusa llamada GLONASS la cual es muy similar al NAVSTAR. Un reloj GPS es capaz de mantener una exactitud de frecuencia de 1×10^{-13} con verificación del UTC (Coordinated Universal Time).

Los relojes de *Estrato-2* (análogos a los relojes esclavos de los nodos de tránsito de la ETSI/UIT-T) se encuentran típicamente en las centrales digitales de conmutación y en algunos equipos cross-conectores digitales. Estos se caracterizan por una exactitud de frecuencia a largo plazo de $1,6 \times 10^{-8}$, la mayoría basados en osciladores de rubidio o de

cuarzo mejorado. Si bien estos relojes no deberían requerir una doble entrada de referencia debido a la calidad de su holdover, el cuerpo técnico de Bellcore recomienda al menos dos entradas externas de referencia y un sistema automático de protección debido a la gran importancia de tener una red de sincronismo confiable.

Los relojes de *Estrato-3* (análogos a los relojes esclavos de los nodos locales de la ETSI/UIT-T) son previstos para el uso en las centrales digitales locales de conmutación, en la mayoría de los cross-conectores digitales y en algunas PBX y multiplexadores T1. Estos representan un gran descenso en comparación de los relojes de estrato-2 en términos del desempeño en modo holdover y se caracterizan por una exactitud de frecuencia a largo plazo de $4,6 \times 10^{-6}$. Se basan típicamente en osciladores de cuarzo mejorados (compensados térmicamente). Los relojes de *estrato-3E* son usados en las redes SONET y tienen mejor estabilidad a corto plazo.

Los relojes esclavos de *Estrato-4* y *Estrato-4E* (específicos para el uso con los equipos del cliente final) se los encuentra en la mayoría de los multiplexadores T1, PABX, banco de canales y canceladores de ecos. Se caracterizan por una exactitud de frecuencia a largo plazo de $3,2 \times 10^{-5}$ y no requieren de un desempeño especial holdover.

2.3.2.2 El BITS (Building Integrated Timing Supply)

De acuerdo con la ANSI y Bellcore, el BITS es el método recomendado para la distribución intra-oficina de reloj: el proveedor maestro de reloj para todo un edificio. Es el reloj mas exacto y estable del edificio, es decir, el reloj con el estrato más bajo.

Los BITS proveen señales de reloj DS1 y/o reloj compuesto (CC – Composite Clock, una señal con un formato especial de 64 kHz usado en Norteamérica) a todos los otros relojes y equipo digital que requieran de sincronización. Por lo tanto, el reloj del BITS es el único reloj que toma referencia desde otro edificio. El concepto del BITS es el equivalente ANSI de la SSU de ETSI/UIT-T, el cual fue definido después pero basándose en el BITS.

CAPITULO 3

3 ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA SINCRONIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES

3.1 RELOJES

Desde un punto de vista teórico, el principio de operación de cualquier tipo de reloj consiste de un generador de oscilaciones y un contador automático de dichas oscilaciones. El oscilador puede estar basado en fenómenos físicos (pseudo-)periódicos de cualquier tipo: el balanceo de un péndulo o de una rueda en los relojes mecánicos, la vibración de los átomos en un cristal alrededor de su posición de energía mínima en los relojes de cuarzo, la radiación asociada con las transiciones específicas atómicas cuánticas en los relojes atómicos son los ejemplos más conocidos debido a su campo de aplicación, pero no son los únicos.

En 1982, el primer pulsar de milisegundo fue descubierto por el Observatorio de Arecibo usando su radiotelescopio en Puerto Rico. El flujo de pulsos recibidos, los cuales dejaron la estrella hace 13000 años, era excesivamente uniforme con un periodo de 1.55780645169838 ms. Es difícil concebir a una estrella de neutrones con una masa similar a la de nuestro sol con tan solo un radio de 10 km, girando a 642 revoluciones por segundo y radiando un enorme pulso electromagnético con cada rotación. Actualmente, se tiene conocimiento de la existencia de al menos 30 objetos similares. Usando el GPS, se ha medido la estabilidad de estas señales y se ha comprobado que tienen estabilidades similares a los mejores relojes atómicos existentes (alrededor de 1×10^{-14}).

3.1.1 Fuentes de Frecuencia y Fuentes de Tiempo

Una *fente de frecuencia* entrega una señal (pseudo-)periódica cuya información significativa es la frecuencia, utilizable como referencia para la sincronización de frecuencia. Una *fente de tiempo* entrega una señal que lleva información absoluta o relativa del tiempo (por ejemplo el reloj Big Ben de Londres). Las fuentes de tiempo más notables son las fuentes del UTC.

3.1.2 Conceptos Básicos de la Calidad de los Relojes

La caracterización de la *calidad* de un reloj es uno de los temas más debatidos en las aplicaciones prácticas de los mismos. Un término simple es usado para definir la calidad de un reloj: la *precisión*, que de alguna manera denota que tan cerca está el reloj bajo prueba a un reloj de referencia (en tiempo o en frecuencia). Sin embargo, el término ‘precisión’ no es ni siquiera incluido en el vocabulario internacional de metrología de la ISO, por lo tanto su uso no es recomendando.

La calidad de un reloj es normalmente definida por medio de otros dos términos básicos: la *estabilidad* y la *exactitud*.

3.1.3 Estabilidad

La *estabilidad* de un instrumento de medida es la habilidad de mantener constantes sus características metrológicas con el tiempo. La *estabilidad de un reloj*, por lo tanto, es la capacidad de generar un intervalo de tiempo (o de frecuencia) de valor constante. En otras palabras, la estabilidad de un reloj trata con las mediciones de las variaciones aleatorias y determinísticas de su frecuencia instantánea (o del tiempo generado) comparadas con un valor nominal (es decir, en la práctica, con un reloj de referencia), sobre un tiempo dado de observación.

Cuando el tiempo de observación es corto, es comúnmente usada la expresión ‘*estabilidad a corto plazo*’, de otra manera, si el tiempo de observación es grande se usa la expresión ‘*estabilidad a largo plazo*’. La ubicación del ‘borde’ que definiría el uso del

término corto o largo depende de la aplicación específica. Por ejemplo, en el campo de la metrología del tiempo, es común considerar a los intervalos de observación mayores a un día como de largo plazo, mientras que en las telecomunicaciones los intervalos de observación por encima de 100s son definidos como de largo plazo también. Para clarificar más el concepto de estabilidad a corto y a largo plazo, la figura 3.1 nos muestra dos diagramas de frecuencia instantánea. La señal de tiempo o de reloj del gráfico superior es más bien estable a corto plazo, pero tiene un desvío considerable a largo plazo; por otra parte, la señal del gráfico inferior tiene una estabilidad a corto plazo bien pobre, pero es bien estable en el largo plazo.

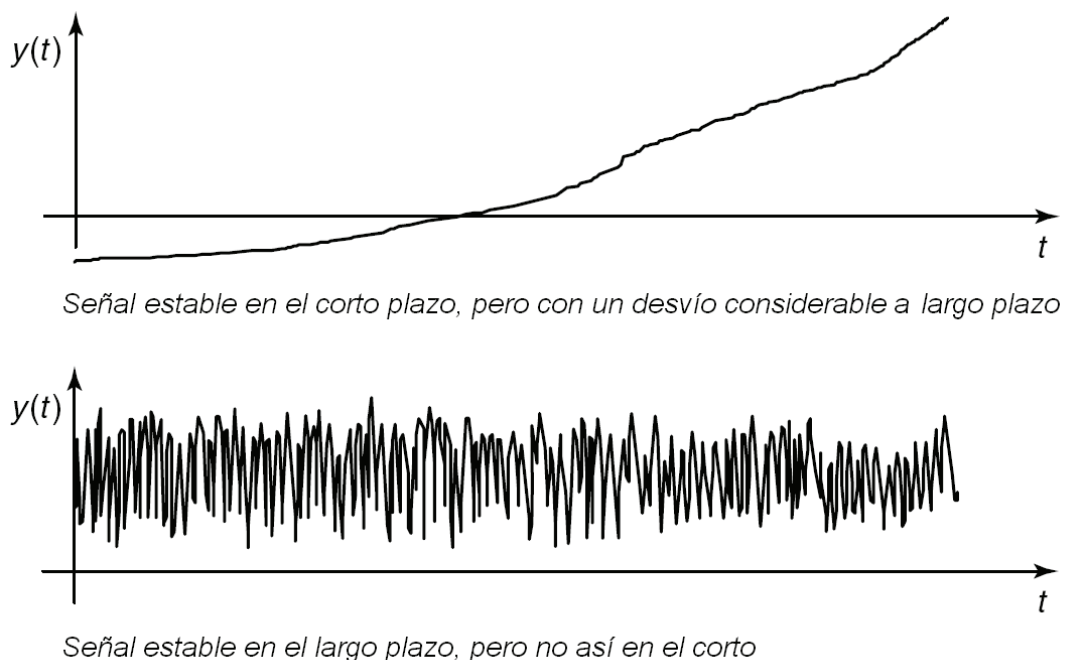


Figura 3.1. Ejemplos de estabilidad a largo y a corto plazo

3.1.4 Exactitud

La *exactitud de una medición*, denota la cercanía entre el valor medido y el valor verdadero. En el contexto de la definición de la exactitud de un reloj, la exactitud de la escala de tiempo significa su cercanía al UTC, mientras que la exactitud de la frecuencia significa su cercanía al valor nominal. En resumen, la exactitud nos dice que tan ‘correcto’ está el reloj.

De acuerdo al uso común dado en las telecomunicaciones, la *exactitud de un reloj* se define como el error de tiempo o frecuencia máximo, el cual puede ser medido sobre todo el tiempo de vida del reloj (es decir, unos 20 años), a menos que se especifique de diferente manera. Entonces, la *exactitud de tiempo* significa que tan bien el reloj está cuadrado con el UTC sobre un período específico, mientras que la *exactitud de frecuencia* es el error de frecuencia máximo $\Delta\nu_{\text{MAX}}$ comparado con el valor nominal ν_{N} . La exactitud de frecuencia es normalmente expresada en términos de una relación adimensional $\Delta\nu_{\text{MAX}}/\nu_{\text{N}}$ y a menudo medido en unidades 10^{-6} [$\mu\text{Hz}/\text{Hz}$], en la ingeniería práctica a esta unidad también se la conoce como [partes por millón] y abreviado como [ppm].

Finalmente, para esclarecer aún más la diferencia entre los conceptos de estabilidad y exactitud, precisemos que un reloj podría tener un error significativo de frecuencia (una pobre exactitud de frecuencia), pero mantener este error constante durante su periodo de vida (y así presentar una perfecta estabilidad de frecuencia).

3.2 OSCILADORES DE CRISTAL DE CUARZO

Los osciladores de cristal de cuarzo están basados en el efecto piezoeléctrico (fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica proporcional en su masa, figura 3.2.), descubierto por Curie en 1880, pero se volvieron prácticamente factibles desde la invención del amplificador electrónico (el triodo, por Forest en 1907). La polarización eléctrica puede ser producida por una flexión, torsión, tensión o compresión sobre el pedazo de cuarzo. Estos osciladores han sido usados en las comunicaciones desde 1920 y fueron muy empleados durante la segunda guerra mundial.

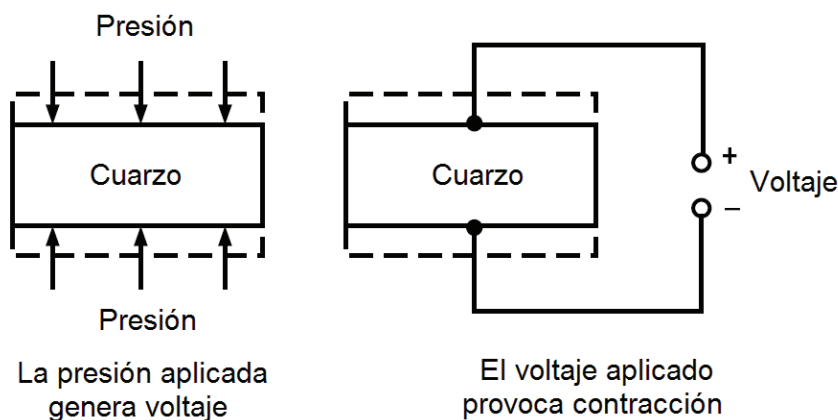


Figura 3.2. Principios del efecto Piezoeléctrico

En las telecomunicaciones modernas, estos osciladores se han filtrado prácticamente en todos los sistemas. Por ejemplo, existen osciladores de cristal baratos que se usan en las tarjetas electrónicas así como en los relojes de pulsera. Los osciladores de alta calidad autónomos son usados como estándares secundarios de frecuencia (SSU/SASE). Más aún, ellos se encuentran en la etapa de salida de frecuencia de los estándares atómicos, donde son guiados por la resonancia atómica.

3.2.1 Osciladores de Cristal Simples

Como se mencionó antes, los osciladores de cuarzo están basados en el efecto piezoeléctrico. Un *Oscilador de Cristal (XO)* es un oscilador electrónico, donde el cristal de cuarzo es excitado por una señal eléctrica periódica a la frecuencia de resonancia (en el rango de 10 kHz a 1 GHz, pero más comúnmente de 5 a 10 MHz).

La frecuencia de resonancia es determinada por las propiedades del material, esto es el corte, el tamaño y la forma. El factor principal que determina la frecuencia de resonancia en el corte es el grosor debido a que éste es el que vibra. La precisión con la cual el grosor del cristal es controlado determina la variación existente entre un cristal y otro con respecto a la frecuencia nominal deseada. Debido a que los factores que determinan la frecuencia del cristal, como el grosor, la densidad, la elasticidad, los cambios moleculares, y el área de resonancia sobre el cual el cuarzo opera son influenciados por las condiciones ambientales como la temperatura, humedad, etc., es razonable pensar que estos factores influenciarán la frecuencia de oscilación del cristal. La mayor influencia sobre la frecuencia del cristal son las variaciones de temperatura. Un oscilador que se encuentra en frecuencia a 25 °C y con una variación de 5 ppm por grado centígrado podría experimentar un desvío de frecuencia de 25 ppm con un incremento de 5 °C. La variación de frecuencia está en función del coeficiente de temperatura del cristal, por lo que depende del tipo de corte. La figura 3.3 muestra las variaciones de Frecuencia vs. Temperatura de los tres tipos de corte más comunes. Obviamente, no es posible evitar estas variaciones de frecuencia si el cristal es usado sobre un rango amplio de temperatura.

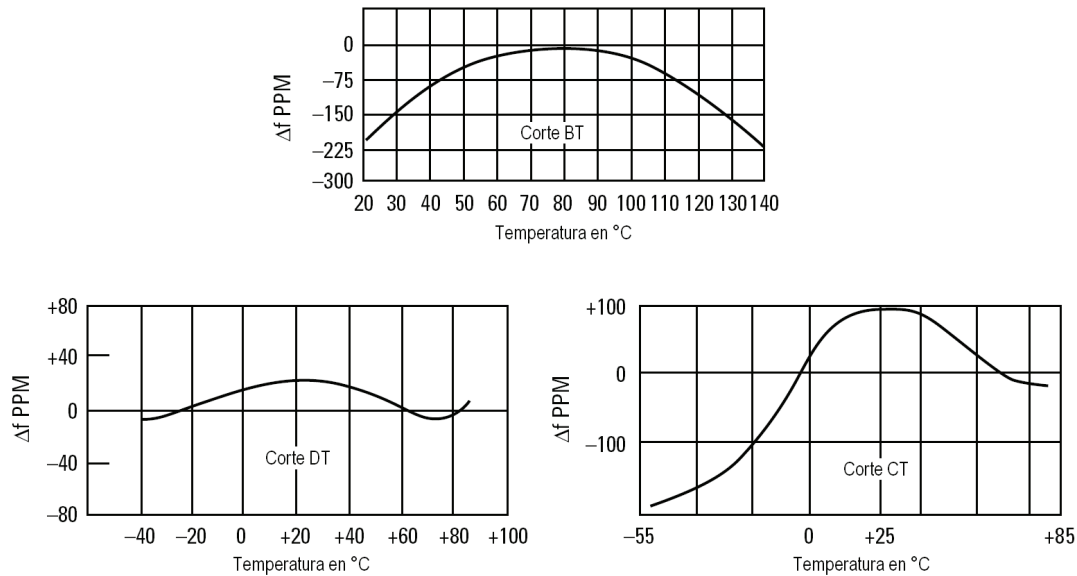


Figura 3.3. Graficas de Frecuencia vs. Temperatura para los tipos de corte más comunes

3.2.1.1 Estabilidad a largo plazo

El cambio gradual de la frecuencia sobre un período de tiempo se lo conoce como *envejecimiento*. Esto ocurre por varias razones. Por ejemplo, las propiedades físicas de la montura del cristal pueden cambiar. El coeficiente de elasticidad del cristal cambia cuando es objeto de estrés, o cuando escapan gases atrapados, o cuando se adjuntan o se separan de la superficie del cristal. Este envejecimiento ocurre a una tasa relativamente constante por década. Por lo tanto, para mantener la exactitud de frecuencia, es necesario hacer ajustes periódicos al oscilador para contrarrestar estos efectos.

3.2.1.2 Estabilidad a corto plazo

Las variaciones de frecuencia RMS a corto plazo es una medida del ruido de frecuencia o de fase. Esto está especificado como la desviación estándar de las fluctuaciones fraccionales de frecuencia para un tiempo de promediación específico. Estas variaciones son, por lo general, sobre impuestas en la curva de envejecimiento como lo muestra la figura 3.4. Generalmente la estabilidad a corto plazo se especifica para un tiempo promedio de un segundo.

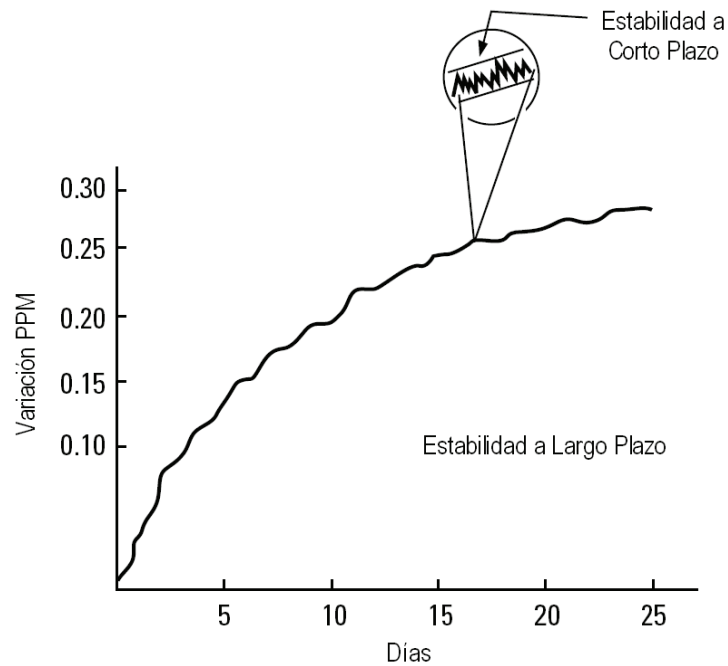


Figura 3.4. Curva de Estabilidad a Largo y a Corto plazo

El objetivo del diseño de osciladores de cristal de cuarzo de alta calidad es el de minimizar las perturbaciones del medioambiente. Por ejemplo, se escoge la orientación del corte del cristal para reducir la influencia de la temperatura en la frecuencia de oscilación. En los osciladores de cuarzo BVA (Boîtier à Vieillissement Amélioré que en francés significa ‘empacado para un envejecimiento mejorado’) de diseño avanzado, los electrodos no tienen contacto directo con el placa que vibra, sino con placas auxiliares ubicadas a una distancia de unos cuantos micrómetros de la placa activa. El objetivo es suprimir cualquier polución atómica del metal al cuarzo.

El oscilador de cristal se ubica en un lazo de realimentación positiva, que guía y mantiene la oscilación. La idea básica es conectarlo de tal manera que las vibraciones mecánicas estabilicen la frecuencia del oscilador. Esto es posible gracias a que el cristal actúa como un circuito sintonizado cuando se lo ubica dentro de un arreglo realimentado. Una pequeña cantidad de energía es realimentada al cristal lo cual causa que éste vibre. Estas vibraciones actúan como estabilizador de la frecuencia generada con respecto al valor de resonancia.

3.2.2 Osciladores de Cristal controlados por Voltaje

Desde un punto de vista funcional, un VCXO (Voltage-Controlled Crystal Oscillator - Oscilador de Cristal Controlado por Voltaje) es un oscilador cuya frecuencia de salida es controlada, dentro de límites establecidos, por un voltaje de guía externo.

Un VCXO es un oscilador de cristal de cuarzo, en donde un capacitor variable, ubicado en algún lugar dentro del lazo de realimentación positiva, hace posible el ajuste de la frecuencia de salida. Normalmente, este capacitor está compuesto de dos partes: un capacitor fijo y un diodo varicap. Este último es regulado para un ajuste fino de la frecuencia de oscilación por una fuente de voltaje DC externa.

3.2.3 Osciladores de Cristal de Temperatura Ambiente y Compensados en Temperatura

El principal problema de los osciladores de cristal simple es la dependencia de su frecuencia natural al envejecimiento (alrededor de 10^{-7} /día) y a la temperatura (en el orden de $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ o más). Existen tres tipos de configuraciones que pretenden compensar las variaciones del coeficiente de temperatura de los osciladores de cristal: osciladores de cristal de temperatura ambiente (RTXO – Room Temperature Crystal Oscillator), osciladores de cristal compensados en temperatura (TCXO – Temperature Compensated Crystal Oscillator) y los osciladores de cristal controlados por horno (OCXO – Oven Controlled Crystal Oscillator).

Los RTXO típicamente usan un cristal herméticamente sellado y componentes individuales que conforman el circuito del oscilador. Estos osciladores usan cristales que han sido fabricados para tener una variación mínima de la frecuencia con respecto a un cambio de la temperatura. Esto se logra principalmente controlando el corte del cristal. La figura 3.5 muestra varias curvas de RTXO.

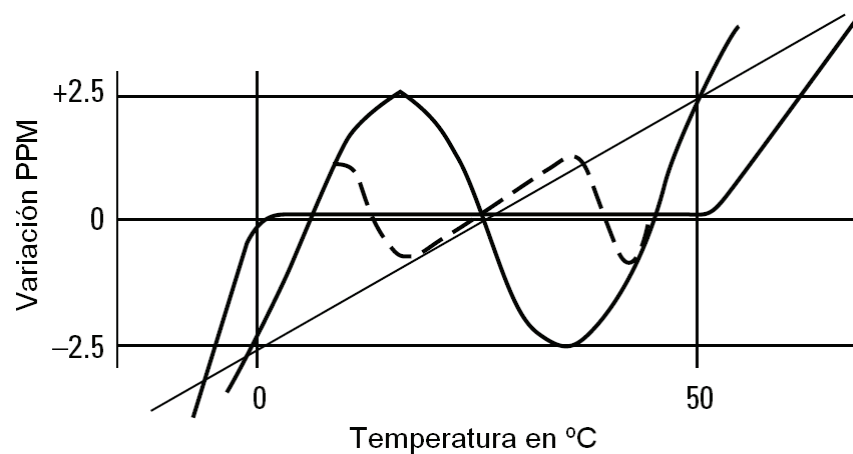


Figura 3.5. Variación de la frecuencia con respecto a la temperatura de algunos RTXO

Los TCXO empaacan al cristal, a los componentes compensadores de temperatura y al circuito oscilador en un contenedor, además implementan un control automático sobre la frecuencia de oscilación basado en la medición de la temperatura del cristal. Este tipo de osciladores usan componentes externos al cristal para compensar los efectos de la temperatura. Estos pueden ser circuitos relativamente simples, como capacitores, termistores, etc., que tengan coeficientes de temperatura opuestos, o una serie de elementos compensatorios y un amplificador usado para controlar el voltaje sobre un capacitor sintonizado que es parte del circuito del oscilador. Estos trucos permiten tener una estabilidad de frecuencia en el orden de 10^{-7} sobre un intervalo de temperatura de 0 °C a 50 °C. Modelos más sofisticados, por medios de controles digitales, logran obtener una estabilidad del orden de 10^{-8} para un intervalo de 0 °C a 70 °C. Sin embargo, estos elementos compensadores proveen correcciones limitadas sobre intervalos del rango de temperatura. Esto puede resultar en pequeñas exclusiones de frecuencia con respecto a todo el rango de temperatura de operación.

Debido a que los TCXO pueden tener un desempeño no-lineal, el oscilador puede requerir de una corrección de frecuencia sobre una cierta temperatura para poder mantener la especificación sobre un rango de temperatura dado. La figura 3.6 ilustra como la frecuencia debe ser corregida -5 Hz a 25°C para satisfacer la especificación del fabricante para un TCXO en particular. El valor de corrección para cada TCXO se ubica típicamente impreso en un lado de la unidad. El usuario que trabaja a una temperatura específica debe

ajustar la frecuencia de oscilación individualmente debido a que puede haber dos valores de corrección distintos en dos osciladores similares.

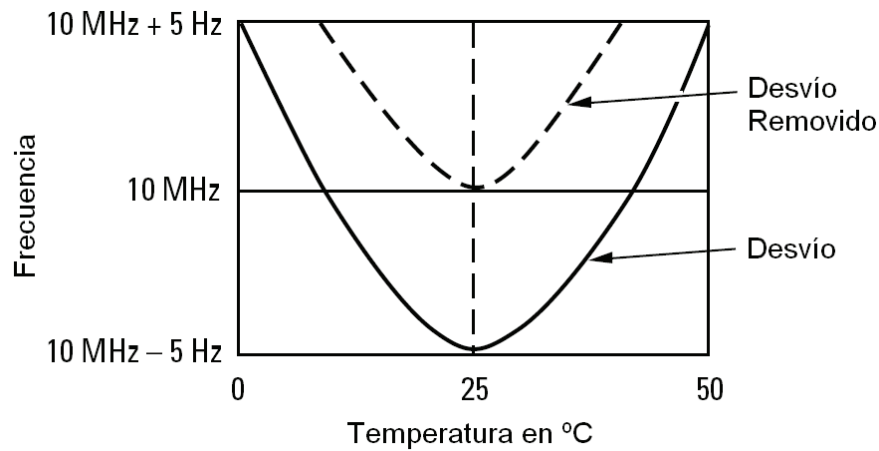


Figura 3.6. Ajuste de un TCXO para cumplimiento con las especificaciones a 25 °C.

3.2.4 Osciladores de Cristal Controlados por Horno

Una mejor manera para compensar las variaciones de temperatura en vez de usar control realimentado es de aislar térmicamente al oscilador y a los elementos térmicamente sensibles y hacerlos trabajar en un ambiente cerrado a temperatura constante. A estos osciladores se los conoce como osciladores controlados por horno (OCXO – Oven Controlled Crystal Oscillator). Un horno controlado es usado para mantener la temperatura de operación en un punto donde la frecuencia de oscilación no dependa de la temperatura, y de esta manera minimizar los efectos residuales de la variación de temperatura. Este punto de cambio mínimo, que se lo ilustra en la figura 3.7, está determinado por el tipo de corte del cristal. La mejor estabilidad es lograda cuando el punto de operación es 15 o 20 °C por encima de la temperatura más alta a la cual la unidad va a ser expuesta.

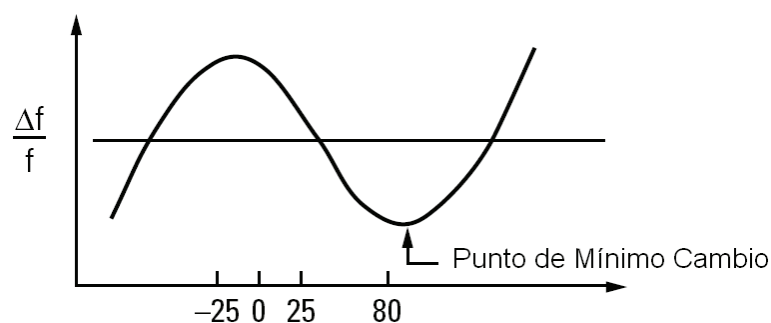


Figura 3.7. Punto de mínimo cambio basado en la curva característica del cristal.

Las dos técnicas para el control del horno que son comúnmente usadas para mantener una temperatura constante en el arreglo del cristal son: técnica de controlador conmutado y técnica de controlador proporcional. El controlador conmutado apaga al horno cuando se alcanza la máxima temperatura y lo enciende cuando se tiene el nivel mínimo de manera similar a un termostato. El controlador proporcional varía la corriente, o inversamente, el ciclo de trabajo del voltaje del calentador en base al desvío de la temperatura del horno con respecto a un nivel deseado. El horno conmutado puede tener una peor especificación de temperatura que el TCXO debido al calentamiento y enfriamiento del cristal. Una vez que el horno proporcional ha sido estabilizado a la temperatura de operación, la frecuencia del oscilador permanecerá bien estable, típicamente por debajo de 7×10^{-9} sobre una variación exterior de 0 a 50 °C.

Existe, además, una tercera técnica inventada por la Universidad de Besançon de Francia y fabricada por Oscilloquartz SA (Neuchâtel, Suiza), el antes mencionado oscilador avanzado de cuarzo BVA. Gracias a su doble control de temperatura y a los platos de excitación auxiliar, estos osciladores alcanzan una estabilidad de frecuencia inclusive del orden de 10^{-11} , aproximándose de esta manera al desempeño de algunos estándares secundarios de frecuencia atómicos, mas precisamente a los relojes de rubidio.

3.2.5 Características y Desempeño de los Osciladores de Cristal

3.2.5.1 Estabilidad a Largo Plazo

La frecuencia del oscilador varía debido al envejecimiento. El envejecimiento es la segunda fuente de error en las mediciones, la primera es la temperatura. La calibración remueve los desvíos del envejecimiento y regresa al oscilador a su frecuencia de operación nominal. Por lo tanto, para asegurar una frecuencia exacta el oscilador debe ser periódicamente calibrado. La especificación del envejecimiento puede ser dado en términos de días o meses, cuando es dado en días se puede encontrar la especificación en meses multiplicando la especificación diaria por 30 días. La especificación mensual, por otro lado, no puede ser dividida para 30 para obtener la especificación diaria ya que en este número estarían enmascarados los efectos de la temperatura y de otras condiciones ambientales. La tasa de envejecimiento para un RTXO típico será menor a 3×10^{-7} en un periodo de 30 días.

Un cuidado extra en el proceso de manufactura del cristal puede reducir los efectos del envejecimiento. Debido a que los efectos de la temperatura son reducidos en el TCXO con la adición de componentes compensadores, es ventajoso tratar de reducir la segunda fuente de error en los osciladores. El envejecimiento de un TCXO puede ser un poco menor al de un RTXO. Una especificación típica de envejecimiento es menor a 1×10^{-7} por mes.

El envejecimiento para los OCXO suele estar especificado en términos de días y debe ser medido una vez que el tiempo de calentamiento haya concluido. Un horno proporcional de alta estabilidad tendrá un envejecimiento típico menor a 5×10^{-10} por día. Traduciendo a términos de meses ($5 \times 10^{-10} \times 30$ días) = 1.5×10^{-8} .

3.2.5.2 Estabilidad a Corto Plazo

Las variaciones de corto plazo en la salida del oscilador pueden ser aún más degradadas según la ubicación del circuito oscilador. Por lo tanto, es importante que al momento de decidir la ubicación del oscilador en el instrumento, estar concientes de las fuentes de interferencia que agravan la estabilidad a corto plazo. Para algunas aplicaciones la estabilidad a corto plazo tiene muy poca importancia. Otras, sin embargo, requieren un oscilador extremadamente estable por periodos cortos por lo que la estabilidad a corto plazo se vuelve extremadamente importante.

Para un RTXO, la estabilidad a corto plazo es típicamente de 2×10^{-9} en un segundo. Las unidades TCXO son típicamente dos veces mejores que las RTXO o 1×10^{-9} para un segundo. Los OCXO pueden llegar a ser 100 veces mejores que los RTXO con las unidades de alto desempeño empezando a 1×10^{-11} para un segundo.

3.2.5.3 Tiempo de Calentamiento

El tiempo de calentamiento es un caso especial de la variación de temperatura que es consecuencia de un aumento de temperatura en el oscilador desde el momento en que se enciende hasta que alcanza un punto estable de operación. Puede que no sea notorio que los RTXO y los TCXO tengan especificaciones del tiempo de calentamiento, y de hecho, típicamente no se especifica. Sin embargo, cualquier equipo que se coloca en operación

generará un cierto grado de calor. Este calor elevará la temperatura alrededor del cristal, y por lo tanto, causará un cambio en la frecuencia.

Las especificaciones del tiempo de calentamiento de los OCXO se dan en términos del valor de la frecuencia final después de que el tiempo de calentamiento haya concluido. El tiempo típico de calentamiento puede ser de 30 minutos en donde la frecuencia estará 1 parte en 10^{-9} de su valor final. Cualquier ajuste de calibración de la frecuencia del oscilador deberá hacérsela después de que el oscilador haya alcanzado su rango estable.

3.2.5.4 Características Típicas

Algunas de las características típicas y datos de desempeño de algunos osciladores de cuarzo disponibles en el mercado están resumidos en las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1. Características Típicas y Datos de Desempeño de algunos Osciladores de Cuarzo (XO, RTXO, TCXO).

	XO	RTXO	TCXO
Estabilidad a Corto Plazo ($\tau = 1$ s)	—	$< 2 \times 10^{-9}$	$< 1 \times 10^{-9}$
Exactitud de Frecuencia (1 año)	2×10^{-6} a 1×10^{-5}	—	2×10^{-6}
Sensibilidad a la Temperatura (0 °C a 50 °C)	$> 1 \times 10^{-7}$	$< 2,5 \times 10^{-6}$	$< 5 \times 10^{-7}$
Tiempo de Vida (desempeño garantizado)	10 a 20 años	> 5 años	> 5 años
Tasa de envejecimiento	—	$< 3 \times 10^{-7}$ /mes	$< 1 \times 10^{-7}$ /mes

Tabla 3.2. Características Típicas y Datos de Desempeño de algunos Osciladores de Cuarzo controlados por horno (OCXO).

	Minature Single Oven OCXO	Double Oven OCXO	Double Oven BVA OCXO
Estabilidad a Corto Plazo ($\tau = 1$ s)	—	1×10^{-11} a 5×10^{-11}	1×10^{-13} a 5×10^{-13}
Exactitud de Frecuencia (1 año)	$2,5 \times 10^{-8}$ a 9×10^{-7}	$1,1 \times 10^{-8}$ a $1,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-9}$ a $4,8 \times 10^{-7}$
Sensibilidad a la Temperatura (-30 °C a 60 °C)	5×10^{-9} a 4×10^{-7}	2×10^{-10} a 8×10^{-9}	1×10^{-10} a 2×10^{-10}
Tiempo de Vida (desempeño garantizado)	10 a 20 años	10 a 20 años	10 a 20 años
Tiempo de Calentamiento	—	30 min (1×10^{-9})	2 horas (1×10^{-10})
Tasa de envejecimiento	2×10^{-8} /año	1×10^{-8} /año	1×10^{-9} /año

3.3 ESTÁNDARES DE FRECUENCIA ATÓMICOS

En contraste con los osciladores de cuarzo, los estándares de frecuencia atómicos se basan en las propiedades intrínsecas de los átomos. La frecuencia de referencia es determinada por las constantes fundamentales como son los espacios de energía entre dos niveles cuánticos de ciertos átomos. Un reloj atómico, entonces, usa como frecuencia de referencia la oscilación de una señal electromagnética asociada a una transición cuántica entre dos niveles de energía en ciertos átomos. El paquete cuántico de energía electromagnética se llama *fotón* y es igual a la diferencia en energía entre dos de estos niveles en un átomo. Los estándares de frecuencia atómicos prácticos actualmente explotan las propiedades de tres elementos: *hidrógeno* (en el MASER de hidrógeno), *rubidio* (en la celda de gas de rubidio) y *cesio* (en tubo de haz de cesio). Los osciladores atómicos son clasificados por ser dispositivos activos o pasivos. Los tubos de haz de cesio y las celdas de gas de rubidio son osciladores atómicos pasivos mientras que el máser de hidrógeno es un oscilador activo.

3.3.1 Principio de Operación Físico

La física cuántica nos dice que el átomo puede tener solamente niveles cuánticos discretos. Digamos que E_1 y E_2 son la energía de los niveles cuánticos 1 y 2, donde $E_2 > E_1$. Entonces, el átomo puede transitar entre estos dos niveles absorbiendo o emitiendo un fotón de radiación electromagnética a una frecuencia ν_0 . El valor de la frecuencia ν_0 es determinado por el principio de conservación de energía, de acuerdo a la ley de Bohr.

$$E_2 - E_1 = h\nu_0 \quad (3.1)$$

donde $h \cong 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la constante de Planck.

Por lo tanto la frecuencia ν_0 es determinada por constantes físicas fundamentales, teniendo solamente una pequeña incertidumbre $\Delta\nu$ que obedece la relación de Heisenberg.

$$\Delta\nu\Delta t \geq 1 \quad (3.2)$$

donde Δt es la duración de la observación de la transición atómica. Para mantener pequeña la incertidumbre $\Delta\nu$, se procura que Δt sea lo más largo posible. El truco es hacer que los relojes atómicos capturen esta frecuencia de los fotones, observando el fenómeno el mayor tiempo posible y produciendo la menor perturbación sobre esta resonancia atómica natural.

En los estándares prácticos de frecuencia atómicos, los niveles de energía 1 y 2 son determinados por la interacción entre el momento magnético del electrón no-pareado del átomo en estado fundamental y el momento magnético del núcleo (*interacción hiperfina*). Esta interacción es débil y produce un salto pequeño de energía $E_2 - E_1$ y esto hace que la frecuencia de resonancia ν_0 se ubique en el rango de las microondas, haciendo factible en la práctica un sistema electrónico que permita la construcción de un resonador atómico.

Desafortunadamente, otra consecuencia de haber un salto pequeño de energía $E_2 - E_1$ es que los dos niveles están igualmente poblados durante el equilibrio térmico. Este equilibrio debe ser roto para que la transición atómica sea observable, por ejemplo la medición de la absorción o emisión de una cantidad detectable de energía. Existen dos métodos para lograr romper este equilibrio.

El primer método está basado en el hecho de que el átomo muestra momentos magnéticos opuestos de acuerdo al nivel en que se encuentre. Por lo tanto, los átomos de las dos poblaciones pueden ser separados por deflexión a través de un campo magnético no-homogéneo. Este método es usado en los estándares de frecuencia basados en el haz de cesio y en el máser de hidrógeno.

El segundo método se basa en el bombeo óptico. Una radiación óptica con una longitud de onda apropiada es usada para excitar (bombear) a los átomos por ejemplo de nivel E_2 a otro nivel de energía más alto E_3 . Un decaimiento espontáneo desde el nivel E_3 a los niveles E_2 y E_1 sucede de manera muy acelerada y el resultado es que las poblaciones de uno de los dos niveles E_1 y E_2 aumentan. Este principio es usado en los estándares de frecuencia basados en la celda de gas de rubidio y en el haz de cesio bombeado ópticamente.

El principio de operación de los estándares de frecuencia atómicos se basa en el enganche de los mismos a la frecuencia de resonancia ν_0 maximizando el número de transiciones atómicas entre los niveles 1 y 2 de energía cuántica. Se usa un circuito realimentado para controlar la frecuencia sintetizada de un oscilador de cuarzo VCXO que sondea la resonancia atómica.

En los *estándares de frecuencia atómicos pasivos*, se usa una señal de microondas sobre los átomos par excitar las transiciones. Algunos circuitos realimentados ayudan a maximizar el número de transiciones atómicas, al ajustar adecuadamente la frecuencia del VCXO sintetizado. De esta manera, la resonancia se logra cuando la frecuencia de la señal excitadora microonda es exactamente ν_0 .

En los *estándares de frecuencia atómicos activos*, un dispositivo genera una oscilación auto-sostenible. Un circuito electrónico engancha en fase la oscilación generada a un VCXO. Debido a que el VCXO trabaja en el rango de 1 a 100 MHz, se usa el principio de detección heterodina para engancharse a la frecuencia de microondas ν_0 .

3.3.2 Estándar de Frecuencia basado en el Haz de Cesio

El estándar de frecuencia de haz de cesio se usa cuando existen requerimientos de frecuencia con una alta precisión y exactitud. La operación de este estándar se basa en la transición de los átomos de isótopo 133 de cesio (^{133}Cs) en estado fundamental entre los niveles hiperfinos caracterizados por los momentos magnéticos $F = 4$ (nivel 1, con energía E_1) y $F = 3$ (nivel 2, con energía E_2). Esta transición se presenta por la interacción producida por el espín del electrón y el espín del núcleo. La transición es relativamente insensible a las influencias externas como los campos eléctricos y magnéticos y tiene una frecuencia definida para los átomos en reposo no perturbados de 9 192 631 770.0000 Hz.

El esquema del principio de operación básico del reloj de haz de cesio se muestra en la figura 3.8. Un horno que contiene algunos gramos del isótopo 133 de cesio (^{133}Cs) emite un haz de átomos de cesio, distribuido uniformemente entre los 16 niveles de energía cuántica, en una cámara al vacío. Ahí, el campo magnético no-homogéneo del imán 1 (*polarizador*) desvía los átomos de nivel-2 a la cavidad resonante (resonador de

Ramsey), donde son irradiados y excitados por un campo de microondas uniforme y de baja intensidad. Cuando la condición descrita en la ecuación (3.1) se cumple, la señal microondas tiene exactamente una frecuencia $\nu_0 = 9.192631770$ GHz y el flujo de átomos realiza una absorción resonante de energía proveniente de la señal microondas, que corresponde a una transición del átomo de nivel-2 al nivel-1. Ahí, otro campo magnético no-homogéneo idéntico al primero generado en el imán 2 (*analizador*) desvía solamente los átomos de nivel-1 a un detector de ionización. Aquí, la corriente de salida es proporcional al flujo entrante de átomos ^{133}Cs y por lo tanto proporcional a la probabilidad de transición de un nivel 2 a un nivel 1.

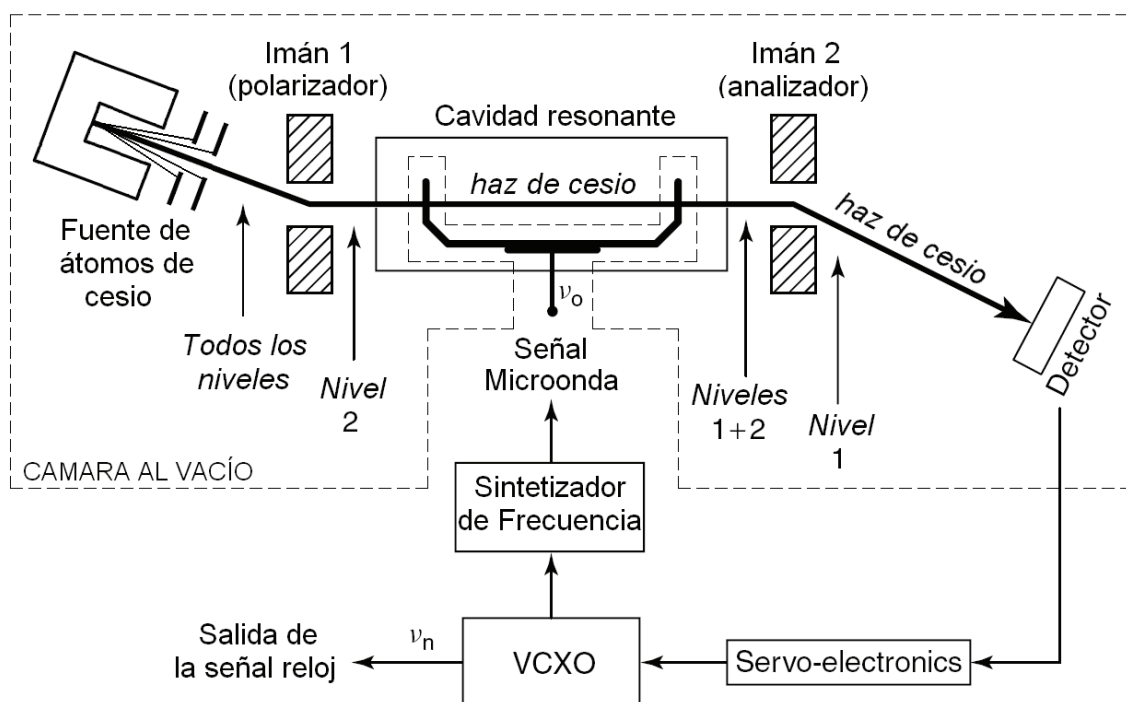


Figura 3.8. Esquema del principio de funcionamiento del Haz de Cesio.

Un pico de resonancia aparece en la corriente de salida del detector cuando la frecuencia del campo de microondas sondeado se aproxima al valor de ν_0 . El ancho de la línea espectral alrededor de ν_0 está típicamente en el orden de los 100 Hz, debido al tiempo que les toma a los átomos atravesar la cavidad de resonancia así como por los efectos de la ecuación (3.2).

La señal de salida del detector se usa para guiar al oscilador de cuarzo VCXO, del cual la radiación microonda y la señal de salida de reloj son sintetizadas, maximizando el número de transiciones. Por lo tanto, la excelente estabilidad a corto plazo del oscilador

de cuarzo es acoplada con la estabilidad a largo plazo del resonador atómico. El valor de ν_0 de los átomos ^{133}Cs sin perturbación ha sido usado para definir el *segundo* en el sistema internacional (SI), como 9 192 631 770 veces el periodo de oscilación $1/\nu_0^2$.

3.3.3 Estándar de Frecuencia basado en el MASER de Hidrógeno

El principio de operación del MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) de Hidrógeno se basa en la emisión estimulada de radiación electromagnética a la frecuencia ν_0 , que corresponde a la transición de los átomos de hidrógeno entre los estados que tienen un momento magnético $F = 1$ (nivel 2) y $F = 0$ (nivel 1).

Como se muestra en la figura 3.9, un haz de átomos de hidrógeno es seleccionado por un imán polarizador, que produce un campo magnético de intensidad 1T. Los átomos que se encuentran en un nivel superior de energía E_2 ($F = 1$) se inyectan en una bombilla de almacenamiento, rodeada por una cavidad resonante de Q -alta sintonizada a la frecuencia de resonancia $\nu_0 = 1.42040575177$ GHz. La cavidad resonante es expuesta a un campo magnético homogéneo interno de intensidad 10^{-7} T, con el fin de escudar la región de interacción del campo magnético ambiental.

En la bombilla de almacenamiento, los átomos rebotan y decaen al nivel inferior de energía E_1 ($F = 0$), emitiendo radiación a la frecuencia ν_0 . Esta emisión es estimulada por el campo de microondas producido por los mismos átomos (MASER activo) o por un campo externo (MASER pasivo). El recubrimiento de la superficie interna de la bombilla de almacenamiento es de teflón para reducir la perturbación de los estados de energía. De esta manera se logra un tiempo medio de interacción de los átomos con el campo de microondas de aproximadamente 1 s. Los átomos de hidrógeno son bombeados continuamente lejos de la cavidad, para mantener una presión constante que no sobrepase los 10^{-5} Pa.

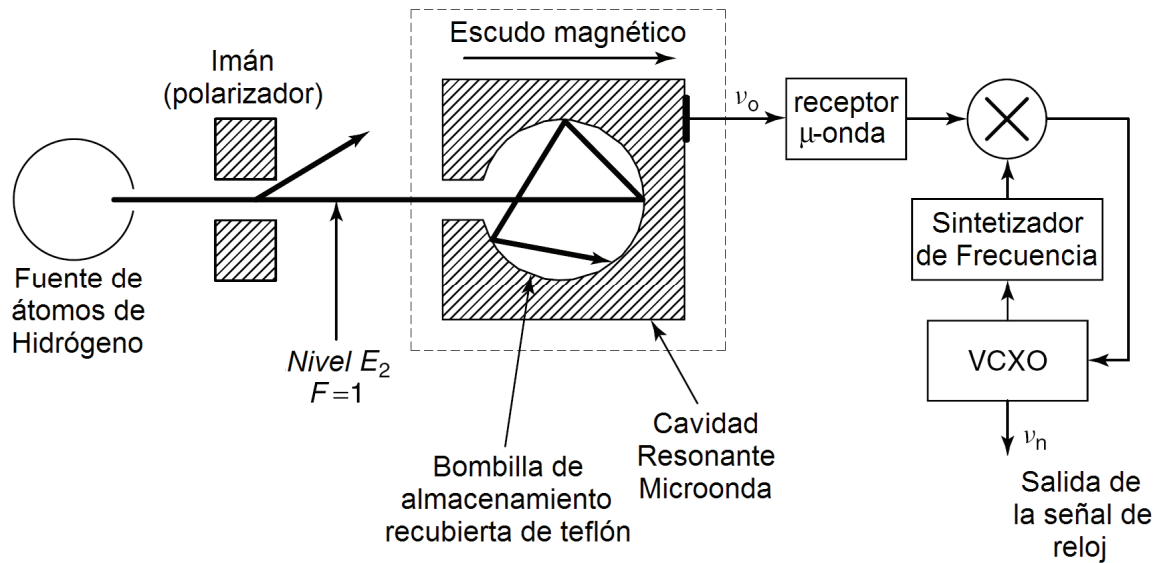


Figura 3.9. Esquema del principio de funcionamiento del MASER de Hidrógeno activo

En el *MASER de Hidrógeno activo*, el volumen de la cavidad resonante es lo suficientemente grande para hacer posible una oscilación auto-sustentable. Por tanto, la radiación de microondas de frecuencia ν_0 emitida por la cavidad es detectada por una antena y usada para enganchar un oscilador VCXO de cuarzo, el cual genera la señal de reloj de salida. La potencia de radiación detectable por la antena fuera de la cavidad es bien pequeña, alrededor de -100 dBm a -110 dBm.

La estabilidad a corto y a mediano plazo del MASER de hidrógeno activo es la mejor que se puede lograr hoy en día de manera práctica. Su estabilidad a largo plazo, por otro lado, es afectada severamente por las variaciones de temperatura y los impactos mecánicos, debido a que la frecuencia de resonancia de la cavidad depende de sus dimensiones físicas. Por lo tanto, protecciones térmicas y mecánicas bien efectivas deben rodear la cavidad. Esta es la principal razón del tamaño incómodo y precio alto que caracteriza al MASER de hidrógeno activo.

En el *MASER de Hidrógeno pasivo*, el volumen de la cavidad resonante es pequeño. Un campo microonda ciente debe ser aplicado para estimular la emisión, la cual no es auto-sostenible. El servo-mecanismo usado para controlar la frecuencia de salida es similar al usado en los relojes de haz de cesio. Un MASER pasivo es, en general, menos sensible a las variaciones ambientales comparado con los MASER's activos, pero muestra una menor estabilidad a corto plazo.

3.3.4 Estándar de Frecuencia basado en la Celda de Gas de Rubidio

La celda de gas de rubidio se basa en la transición de los átomos de isótopo 87 del rubidio (^{87}Rb) entre los niveles base caracterizados por los momentos magnéticos $F = 1$ (nivel E_1) y $F = 2$ (nivel E_2). La selección del estado del átomo y la detección de una transición se logra mediante bombeo óptico.

La figura 3.10 muestra el esquema del principio de funcionamiento de un estándar de frecuencia de rubidio. La luz proveniente de una lámpara espectral llena con ^{87}Rb se filtra a través de una celda (filtro hiperfino) que contiene vapor de ^{85}Rb , antes de excitar a los átomos de ^{87}Rb en otra celda (celda de absorción) llena con gas de amortiguamiento dentro de la cavidad resonante. El propósito del gas de amortiguamiento (mezcla de gases inertes) es de aumentar el tiempo de interacción de los átomos de ^{87}Rb con el campo de microondas en el resonador, causando varias colisiones elásticas de los átomos ^{87}Rb con los átomos de amortiguamiento antes de la colisión no-elástica contra las paredes de la celda.

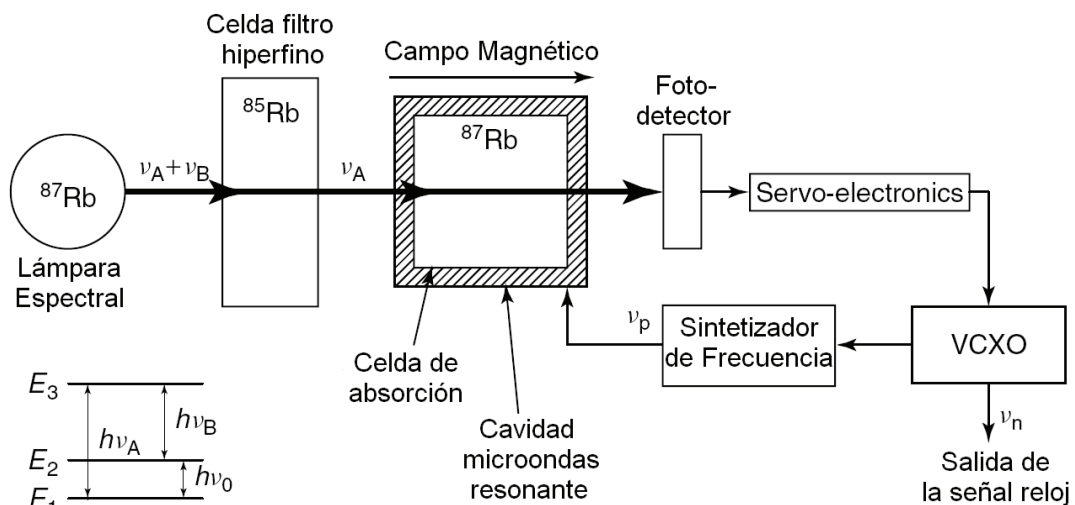


Figura 3.10. Esquema del principio de funcionamiento de la Celda de Gas de Rubidio.

La celda del filtro hiperfino permite pasar solamente el componente espectral de la luz ν_A , el cual bombea ópticamente a los átomos a un nivel inferior E_1 ($F = 1$), hasta alcanzar la celda de absorción. Ahí, este nivel es despoblado a medida que los átomos de ^{87}Rb absorben la radiación luminosa, y bombean los átomos al nivel superior E_3 para luego decaer a los dos niveles base E_1 y E_2 (ver el diagrama de niveles en la esquina inferior izquierda de la figura 3.10). Si se reducen los átomos de nivel E_1 , entonces la celda se vuelve transparente a la radiación ν_A . No obstante, una radiación microonda a una frecuencia $\nu_p \cong 6.3846826128$ GHz

es aplicada a los átomos, para excitar su transición nuevamente al nivel E_1 . De esta manera, este nivel es nuevamente poblado y la absorción óptica puede comenzar de nuevo.

Durante la resonancia, la frecuencia de la radiación microonda aplicada ν_p es exactamente ν_0 . El VCXO es entonces guiado, por consiguiente, por el servo-electrónico para mantener la absorción luminosa al máximo.

La frecuencia central de la resonancia generada puede desviarse considerablemente (10^{-9} en unidades fraccionales) del valor ν_0 teórico del átomo de rubidio no perturbado, debido a causas ambientales de varios tipos y a la física misma de este dispositivo. Por esta razón, a los relojes de rubidio no se los considera apropiados como referencias de frecuencia primarias, además, necesitan ser calibrados con un reloj de haz de cesio o un MASER de Hidrógeno. Por esta razón, se los considera como estándar o referencia de frecuencia secundario. Sin embargo, su estabilidad a corto plazo es considerada mejor que la del cesio. Después de una calibración de laboratorio, los relojes de rubidio tienen una exactitud de frecuencia hasta de 10^{-10} .

3.3.5 Desempeño y características de los estándares atómicos de frecuencia

Algunas de las características típicas y datos de desempeño de algunos estándares de frecuencia atómicos disponibles en el mercado están resumidos en la tablas 3.3.

Tabla 3.3. Características Típicas y Datos de Desempeño de los Estándares de Frecuencia Atómicos.

	Estándar de Rubidio	Estándar de Cesio	MASER de Hidrógeno
Estabilidad a Corto Plazo (τ)	($\tau = 1$ s) 5×10^{-12} a 4×10^{-11}	($\tau = 100$ s) $< 10^{-13}$ a 3×10^{-12}	($\tau = 1$ s) 2×10^{-13} (activo) 2×10^{-12} (pasivo)
Exactitud de Frecuencia (1 año)	1×10^{-10} a 1×10^{-9}	1×10^{-14} a 7×10^{-12}	10^{-12}
Sensibilidad a la Temperatura	$1 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}$ a $1 \times 10^{-11}/^{\circ}\text{C}$	$1 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ a $1 \times 10^{-13}/^{\circ}\text{C}$	$1 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$
Sensibilidad a los campos magnéticos (por 10^{-4} T)	5×10^{-12} a 2×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-14}$ a 1×10^{-12}	3×10^{-14} (activo) 1×10^{-14} (pasivo)
Frecuencia de Resonancia ν_0	6.3846826128 GHz	9.192631770 GHz	1.42040575177 GHz
Tiempo de calentamiento	de 2 a 30 min (para 5×10^{-10})	30 min (para 3×10^{-12})	24 horas (para 3×10^{-12})
Tiempo de Vida (desempeño garantizado)	lámpara de Rb y cavidad (15 años)	tubo de haz de cesio (3 a 10 años)	Agotamiento fuente iónica y de H_2 , cambio de la cavidad resonante (7 años)

3.4 SISTEMAS DE POSICIÓN GLOBAL (GPS)

El sistema de posición global no se lo considera como un reloj, sino un sistema complejo de relojes y satélites, como un super-reloj en el cielo, disponible para cualquiera que esté equipado con receptores apropiados. Los receptores GPS son usados frecuentemente como una referencia adicional para los relojes de las SSU/SASE, especialmente en las redes de sincronismo extensas para la distribución de la señal de reloj sobre distancias grandes. Además, los receptores GPS son comúnmente usados para sincronizar las BTS's en los sistemas CDMA.

El GPS es un sistema de radio-satélite que continuamente y en tiempo real provee la posición tridimensional, información de tiempo y velocidad a los equipos receptores ya sea en tierra, mar o aerotransportados. Concebido originalmente como una herramienta de navegación y posición, es también usado como una referencia pura de tiempo para diseminar tiempo preciso, intervalos de tiempo y frecuencia.

El sistema NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging) desarrollado, financiado y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, es el primer sistema GPS disponibles para los usuarios civiles. Ha sido diseñado, desde 1973, para reemplazar el sistema de navegación viejo LORAN-C. La constelación de satélites fue terminada en 1994 y el 17 de julio de 1995, la fuerza aérea estadounidense dio a conocer que el sistema GPS estaba totalmente operativo. El sistema ruso, llamado GLONASS, es muy similar al NAVSTAR GPS. Ambos sistemas se componen de tres partes: el segmento espacial, el segmento de control y los segmentos de usuario.

3.4.1 Principio de operación de los GPS

El sistema GPS se basa en un conjunto de 24 satélites (segmento espacial), cada uno lleva a bordo dos relojes atómicos que son continuamente monitoreados por estaciones terrenas (segmento de control). Cada satélite transmite señales en espectro ensanchado que llevan un código pseudo-aleatorio único con períodos bien largos.

Debido a que en cualquier tiempo y en cualquier lugar del mundo se pueden ver de cinco a ocho satélites, el principio de triangulación es usado para determinar la posición del receptor. Para las mediciones precisas de distancia, cuatro satélites producen un conjunto de cuatro ecuaciones que se resuelven para estimar la latitud, longitud, altitud y tiempo del sistema GPS.

La distancia entre el receptor GPS y cada uno de los satélites observables se determina midiendo el tiempo de vuelo de la señal recibida del satélite. Esta medición se la realiza determinando el error de fase relativo entre el código pseudo-aleatorio recibido y el generado de manera local. Debido a que la velocidad de la señal es conocida (velocidad de la luz al vacío tomando en cuenta los retrasos producidos al cruzar las zonas neutras e ionizadas de la atmósfera), la computadora del receptor puede estimar de manera exacta la distancia para cada satélite visto.

La triangulación para determinar la posición del receptor está basada en la suposición de que la posición de los satélites es conocida. En realidad, las órbitas de los satélites GPS se determinan con una exactitud muy alta y los receptores GPS tienen almanaques guardados en sus memorias, con las posiciones de los satélites guardadas momento a momento (datos del almanaque actual son transmitidos por los satélites periódicamente). Además, las variaciones menores de la órbita de los satélites son medidas por las estaciones de control GPS para calcular la corrección que se le aplica una o dos veces por día.

3.4.2 Segmento Espacial

El segmento espacial está constituido por una constelación de satélites, llamados vehículos espaciales (SV – Space Vehicles), equipados con relojes de cesio y de rubidio, que transmiten una señal de espectro ensanchado que lleva códigos pseudo-aleatorios. La constelación NAVSTAR nominal esta compuesta de 24 satélites, con un mínimo de 21 satélites operacionales al menos el 98% del tiempo, pero a menudo hay más de 24 satélites operacionales en órbita, a medida de que nuevos satélites son desplegados para reemplazar a los viejos.

Los 24 satélites son ubicados en órbitas casi circulares con un periodo de cerca de 12 horas. La órbita del satélite repite casi la misma pisada terrestre una vez por día, a medida que la tierra rota debajo de los satélites. Existen seis planos orbitales, con cuatro satélites cada uno, espaciados igualmente 60° el uno del otro e inclinados cerca de 55° con respecto al plano ecuatorial. Esta constelación permite observar de cinco a ocho satélites desde cualquier punto de la Tierra en cualquier momento. En resumen la constelación NAVSTAR consiste de:

- 24 satélites, con un mínimo se 21 satélites operando el 98% del tiempo;
- seis planos orbitales, espaciados igualmente 60° el uno del otro e inclinados cerca de 55° con respecto al plano ecuatorial
- órbitas casi circulares, con una altura nominal de 20183 km por encima de la Tierra y un periodo de 11h58’;
- una ventana de visibilidad cercana a las 5 horas para cada satélite.

Existen tres tipos de satélites GPS NAVSTAR lanzados (hasta el año 2000):

Los SVs *Block I*, construidos por Rockwell International como prototipos de desarrollo, fueron lanzados sobre el Atlas-Centaur entre 1978 y 1985 desde la base aérea Vandenberg en California. Estos SVs soportaban la mayoría de las pruebas de sistema y actualmente no se encuentran operativos. De un total de 11 SVs Block I lanzados, solo a uno se lo enciende ocasionalmente. La principal diferencia entre estos satélites y los de siguiente generación es que carecían de la habilidad de degradar intencionalmente la exactitud de la señal de posicionamiento.

Los SVs *Block IIA* fueron también construidos por Rockwell International. Los primeros 28 SVs Block IIA fueron lanzados el 14 de febrero de 1989 desde Cabo Cañaveral, Florida, y fueron catalogados de ‘saludables’ para uso global el 15 de abril de 1989. Un SV Block IIA pesa cerca de 930 kg en órbita, tiene 5,1 m de largo, esta equipado con dos relojes de cesio y dos de rubidio y tiene un tiempo de vida de 7,5 años.

Las mejoras significativas de los SVs Block IIA a las interfaces de Señal-Es-Espacio (SIS – Signal-In-Space) han sido:

- Protección mejorada de los componentes electrónicos a la radiación para mejorar la confiabilidad de las interfaces SIS;
- Capacidad de guardar 180 días de datos de navegación en comparación con los 3,5 días de capacidad de los SVs Block I;
- Capacidad de Disponibilidad Selectiva (SA – Selective Availability) y Anti-Spoofing (AS);
- Detección automática de ciertos errores y conmutación automática a un código no-estándar de transmisión para proteger a los usuarios de engancharse a un SV defectuoso.

En 1989, 21 satélites adicionales (*Block IIR SV*) empezaron a ser fabricados por Lockheed Martin (la *R* es por ‘reabastecimiento’). Los SVs Block IIR presentan la misma interfase SIS para el segmento del usuario. Además, son capaces de navegar autónomamente por si solos y de generar su propios datos de navegación, manteniendo la exactitud SIS al menos por 180 días sin el soporte del segmento de control. Las diferencias entre los SVs Block IIR y el IIA son: habilidad de comunicación entre satélites, mejoramiento de la exactitud, refuerzo en la protección de radiación, microprocesador reprogramable, dos relojes atómicos encendidos todo el tiempo. Los primeros satélites Block IIR fueron lanzados en 1996, para poder mantener la constelación. Se ha planeado una continuación siguiente de SVs, los Block IIF.

De manera muy similar a la constelación NAVSTAR, la constelación GLONASS está compuesta de 24 satélites, sobre tres planos orbitales. Los satélites operan en órbitas circulares a 19100 km con un ángulo de inclinación de 64,8° y un periodo de 11h15’. Cada satélite transmite sobre dos grupos de la banda L (L1 centrado a 1609 MHz y L2 centrado a 1251 MHz). A diferencia que el NAVSTAR, las dos señales del GLONASS transmiten un código de precisión y un código no-preciso, donde el primero está encriptado para uso militar y el segundo esta disponible para uso civil.

3.4.3 Segmento de Control NAVSTAR

El segmento de control NAVSTAR, también conocido como segmento de control operacional, está compuesto de todas las instalaciones terrenas que monitorean y controlan a los satélites. El segmento de control consiste de cinco estaciones de monitoreo (MS – Monitor Stations), una estación de control maestro (MCS – Master Control Station) y las antenas terrestres de subida (uplink).

Las *Estaciones de Monitoreo* están ubicadas en Colorado Springs, Hawaii, Isla Ascensión, Isla Diego García e Isla Kwajalein (Isla Marshall), como se muestra en la figura 3.11. Estas estaciones rastrean las señales de todos los satélites GPS que están a la vista, recogen información del rango de cada satélite (aproximadamente cada 1,5 s). Esta información no refinada es entonces pulida, usando información ionosférica y meteorológica, para luego ser enviada en tiempo real a la estación de control maestro para procesamiento. Estas estaciones de monitoreo se operan vía control remoto desde la estación de control maestro.

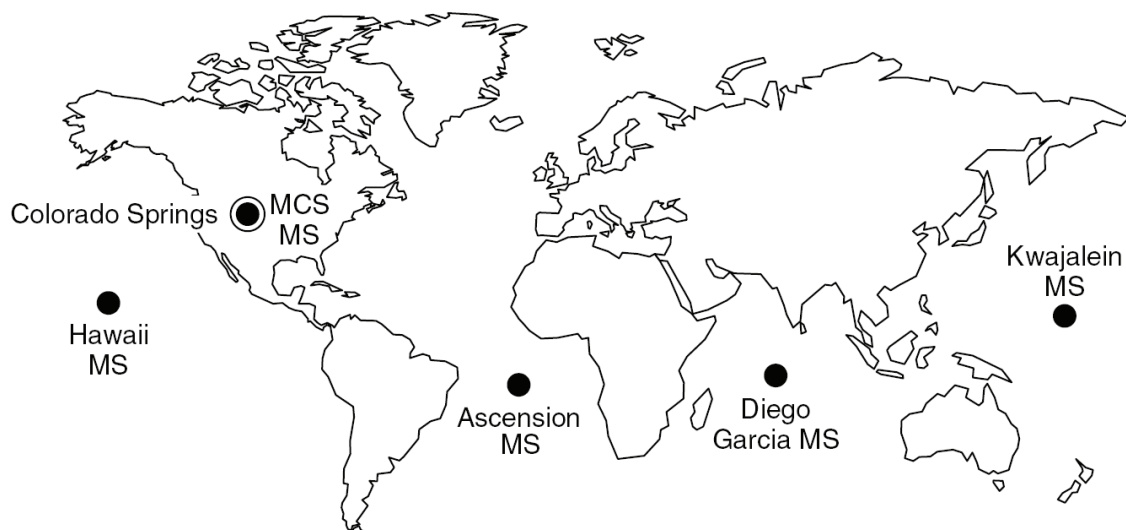


Figura 3.11. Ubicación de las estaciones de monitoreo GPS NAVSTAR

La *Estación de Control Maestro* está ubicada en la base aérea Schriever (antes Falcon), en Colorado. Es la instalación central de procesamiento para la red del segmento de control y es operado las 24 horas del día, 7 días a la semana. Calcula los datos precisos

de las órbitas (efemérides) y los parámetros de corrección de reloj para cada satélite. Entonces envía estas efemérides y datos de reloj, así como otros comandos de mantenimiento, a cada satélite una o dos veces por día.

Las *Antenas Terrestres* son instalaciones no tripuladas que operan bajo control remoto de la estación maestra. Su función es permitir que la estación de control maestro comande y controle a los satélites NAVSTAR en órbita. Estas antenas se encuentran ubicadas con las estaciones de control en las Islas Ascensión, Diego García y Kwajalein. No hay antenas en la estación de control maestro o en Hawai.

3.4.4 Segmento del Usuario

El Segmento del Usuario consiste de los receptores GPS y de la comunidad de usuarios. Un receptor GPS puede estimar en tiempo real su posición tridimensional, velocidad e información de la hora a partir de las señales recibidas de por lo menos cuatro satélites.

La antena del receptor es, normalmente, una antena omnidireccional con una ganancia de 3 dB. Esta antena se conecta al amplificador frontal del receptor con un cable coaxial normal.

Los receptores GPS vienen en varios tamaños, formas y precios, dependiendo de su desempeño y de la aplicación específica prevista. Existen dos tipos de receptores GPS: Aquellos que rastrean simultáneamente varios satélites GPS y aquellos que rastrean secuencialmente a los satélites GPS.

Los *Receptores Secuenciales* usan un canal único para detectar la señal C/A (Coarse/Acquisition) y moverse de un satélite al otro mientras recogen información. Tienen menos circuitos y por lo tanto son más baratos y consumen menos potencia. Desafortunadamente, el secuenciamiento interrumpe la medición de la señal por lo que la exactitud es limitada.

Los *Receptores Paralelos* (también conocidos como receptores continuos) pueden monitorear varios satélites simultáneamente. Son muy valiosos para el mapeo (cartografía), vigilancia y propósitos científicos. La detección paralela de las señales del satélite no solo es útil por el hecho que se evita interrumpir la medición de la señal, sino que la comparación de un canal con otro permite identificar posibles desviaciones de canal.

3.4.5 Señales GPS NAVSTAR

Cada satélite GPS NAVSTAR transmite un par de portadoras microonda en la banda L. La razón de transmitir en dos frecuencias es para compensar los errores introducidos por la refracción ionosférica. Las dos señales se generan a partir de una frecuencia común $f_0 = 10.23$ MHz y son las siguientes:

- L1, a $154f_0 = 1575,42$ MHz ($\lambda \cong 19$ cm)
- L2, a $120f_0 = 1227,6$ MHz ($\lambda \cong 24$ cm)

Estas dos portadoras sinusoidales transmiten, por medio de una modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying), los siguientes tres códigos binarios.

- *Código C/A (Coarse / Acquisition)*, el cual modula la fase de la portadora L1 y es un código pseudo-aleatorio de 1 MHz, con un período de repetición igual a 1023 bits (longitud del código). Este período corresponde a cerca de 1 ms en tiempo o a 300 km de ambigüedad en mediciones de rango. Obviamente, cada satélite transmite un código C/A único que lo identifica. Este código es la base del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS – Standard Positioning Service) para uso civil.
- *Código P (Precise)*, el cual modula la fase de ambas portadoras L1 y L2 y es un código pseudo aleatorio muy largo (alrededor de 10^{14} bits) de 10,23 MHz. Este código tiene un periodo de 267 días. Cada satélite usa solamente un segmento de una semana de este código P. El segmento usado es único para cada satélite y se lo resetea cada semana. En el modo de operación AS (*Anti-Spoofing*), el código P es

encriptado. Este código es la base del Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS – Precise Positioning Service), y su uso está restringido solo para usuarios autorizados que posean equipos receptores con el módulo clasificado AS.

- *Mensaje de Navegación*, es una señal de datos de 50 Hz que lleva la información de las órbitas de los satélites o efemérides, correcciones de reloj, almanques y otros parámetros del sistema. Es resultante de la adición módulo-2 de ambos códigos, el C/A y el P.

Los códigos C/A y P modulan la señal L1 en cuadratura, de manera que no se interfieren el uno con el otro. Además, el código C/A es amplificado para que sea de 3 a 6 dB más fuerte que el código P.

La *Disponibilidad Selectiva* (SA – Selective Availability) es la degradación intencional de las señales SPS, controlada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, para limitar la exactitud a los usuarios que no pertenecen a la armada de los Estados Unidos o a sus agencias gubernamentales. La exactitud potencial del código C/A de 30 m es reducida a 100 m (dos desviaciones estándar de error). El gobierno de los Estados Unidos decidió discontinuar el uso de la disponibilidad selectiva desde la media noche del primero de mayo del 2000, permitiendo a los usuarios acceder la señal L1 libre de errores. El error inducido del SA fue cambiado para que no añada error a las señales públicas (código C/A). La disponibilidad selectiva es todavía una capacidad del sistema GPS, y el error podría, en teoría, ser reintroducido en cualquier momento.

3.4.6 Servicios de Posicionamiento NAVSTAR Estándar y Preciso

El *Servicio de Posicionamiento Estándar* (SPS) es el servicio de posicionamiento y de hora provisto por el código C/A en la frecuencia L1. Es por tanto el servicio provisto al usuario con un receptor básico C/A, que no es capaz de descifrar el código P.

El SPS está disponible para los usuarios civiles en todo el mundo sin ningún costo o restricción. La exactitud predecible del SPS es alrededor de 100 m en posición horizontal, 156 m en posición vertical y 340 ns de tiempo UTC para el 95% de tiempo.

El *Sistema de Posicionamiento Preciso* (PPS) es el servicio de posicionamiento y de hora disponible para los usuarios autorizados provistos con claves criptográficas y equipamiento especial. Las fuerzas armadas estadounidenses y aliadas, algunas agencias gubernamentales y usuarios civiles selectos y específicamente aprobados por el gobierno de los Estados Unidos pueden usar el PPS. El PPS consiste de la señal SPC más el código P transmitido en las frecuencias L1 y L2. Su exactitud predecible esta en el orden de 22 m en posición horizontal, 27,7 m en posición vertical y 200 ns de tiempo UTC para el 95% de tiempo.

3.4.7 GPS Diferencial

Las técnicas del GPS diferencial (DGPS) se basan en la corrección del error de desviación en una locación con un error de desviación que es medido en una posición cercana, conocida. La técnica más precisa consiste en corregir las mediciones de rango individuales antes de calcular la solución de navegación. Aplicar una simple corrección de posición desde el receptor de referencia al receptor remoto es menos efectivo.

Estas técnicas son capaces de remover los errores de SA y otras desviaciones de manera efectiva, siempre y cuando las correcciones diferenciales sean calculadas en la estación de referencia y aplicadas en el recetor remoto en un tiempo menor al tiempo de actualización del SA, típicamente menos de 20 s.

Si el receptor de referencia y remoto se encuentran relativamente cerca (menos de 100 km), la exactitud del DGPS estará en el orden de 1 a 10 m basándose solamente en las señales SPS. Una portadora diferencial GPS, basada en la comparación de fase de las portadoras de referencia y remota que se encuadren a 30 km o menos de distancia, permite obtener una posición con una exactitud en el orden de 10^{-2} m.

3.4.8 Uso del GPS para la difusión de la Hora y de la Frecuencia.

El GPS también puede ser usado como una referencia pura de tiempo que permita diseminar una hora precisa (tiempo del sistema GPS), intervalos de tiempo y frecuencia con una exactitud excelente. Está disponible en todo el mundo, gratuitamente, para

cualquier usuario equipado con equipos relativamente baratos. Por esta razón, los receptores GPS son comúnmente usados como referencia adicional en las entradas de las SSU/SASE en las redes de sincronismo, o para sincronizar en tiempo a las radiobases CDMA.

El tiempo del sistema GPS está muy relacionado al UTC. El tiempo del GPS comenzó desde cero la medianoche del 5 de enero de 1980. Controlado por el UTC, el tiempo del GPS está dentro de un margen de $1\mu\text{s}$ con respecto al UTC con la diferencia reportada en el mensaje de navegación del GPS con una precisión de 90 ns.

Hacer que el GPS funcione como una fuente de tiempo es relativamente simple. Es suficiente que el receptor se enganche a una o ambas de las portadoras L de un satélite. El tiempo del SV, es decir la señal entregada por el reloj individual del satélite, puede ser recuperado observando la alineación de tiempo del código pseudo-aleatorio necesaria para engancharse a la portadora de espectro-ensanchado. Los intervalos de tiempo en el receptor pueden ser reproducidos por la tasa de repetición de 1 ms del código pseudo-aleatorio. El etiquetado de tiempo de cada milisegundo en el tiempo del SV se logra leyendo los campos de Número-de-Semana y Tiempo-de-Semana (Week-Number & Time-Of-Week) del mensaje de navegación. Esto también resuelve la ambigüedad del periodo del código al recuperar el tiempo del SV al observar la alineación de tiempo del código pseudo-aleatorio.

Obviamente, la escala de tiempo del receptor obtenida debe ser corregida restando un estimado del total del retraso de transmisión del salto entre el satélite y el receptor. El retraso de transmisión es calculado basándose en la medición del rango, dividida para la velocidad de la luz más estimaciones varias de otros retrasos (retraso ionosférico, retraso de hardware, etc.). Por lo tanto, la relación entre el reloj del receptor y el tiempo del GPS puede ser establecida.

En realidad, para fijar la hora exacta, la posición tridimensional del receptor debe ser conocida desde una fuente independiente para poder explotar todas las capacidades del sistema GPS: un error de posición de 1 m produce cerca de 3 ns de error de tiempo y 1 mHz de error de frecuencia, debido a la variación del retardo de propagación de la señal. Además, el tiempo del SV en el receptor debe ser corregido de los efectos periódicos

relativistas. Esta corrección relativista es calculada a partir de los parámetros de órbita que normalmente se usan para determinar la posición del SV.

La hora o los intervalos de tiempo pueden ser producidos por el receptor. Los receptores ubicados en diferentes lugares pueden ser sincronizados al tiempo del GPS. Si se requiere sincronismo al UTC, se puede aplicar la corrección UTC del mensaje de navegación.

La exactitud del tiempo GPS está relacionada con la habilidad del receptor de seguir la pista del código C/A recibido. Exactitudes del orden de 100 ns son posibles con señales GPS no degradadas.

Además de su uso para sincronizar en tiempo, los receptores GPS pueden ser usados también como una fuente de frecuencia. La sincronización de frecuencia puede ser establecida al guiar al oscilador local usando las mediciones integradas de código y fase o midiendo directamente la frecuencia de la portadora del SV. Para este último caso, el enganche a la frecuencia portadora se logra al engancharse en fase a la portadora remodulada. Las señales portadoras transmitidas son controladas por los relojes atómicos que los satélites GPS llevan a bordo y por lo tanto tienen una frecuencia muy estable y exacta. Obviamente, el efecto Doppler resultante del movimiento orbital debe ser corregido de manera apropiada. Una exactitud de frecuencia del orden de 10^{-12} es posible con señales no degradadas (es decir, sin SA).

Existe una técnica llamada *modo común de transferencia de tiempo* que es útil para mejorar la exactitud de la sincronización al tiempo del GPS. Es análoga al DGPS. Si dos receptores se enganchan a un satélite al mismo tiempo, podemos asumir que las correcciones del retraso del trayecto, el error de tiempo del SV y los errores de los mensajes de datos son los mismos para ambas señales. Entonces al comparar un receptor con un reloj de referencia como un PRC, el error de tiempo del SV medido en el receptor de referencia puede ser transmitido a la otra ubicación para luego ser usado para ajustar al reloj local.

CAPÍTULO 4

4 PARAMETROS PARA LA PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE SINCRONISMO

4.1 INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN DEL SINCRONISMO

El objetivo de la planificación de las redes de sincronismo es determinar la arquitectura para la distribución de sincronismo en una red, el nivel de los relojes y las instalaciones a ser usadas. Además, es necesario hacer un análisis del desempeño y la confiabilidad del sistema diseñado, para asegurarse que los requerimientos de diseño se cumplan. Para lograr el mejor desempeño y la mayor robustez de una red de sincronismo, algunas reglas y procedimientos deben seguirse al desarrollar un plan de sincronismo. Algunas de las más importantes reglas son: evitar lazos de sincronización (timing loops), mantener una jerarquía, seguir el concepto SSU/SASE/BITS, usar las mejores instalaciones para el transporte de la referencia de sincronización, y minimizar la longitud de la cadena de referencia de sincronización.

La arquitectura jerárquica maestro-esclavo ha sido adoptada por la mayoría de administradores de telecomunicaciones y es recomendado por los estándares internacionales, según lo indicado en el capítulo 2. La primera opción, entonces, es planificar los sitios estratégicos ya sea para uno o más PRCs.

Los nodos de los relojes esclavos son normalmente diseñados para aceptar dos o más referencias externas. Solamente una referencia se encuentra activa, las otras se mantienen inactivas. Se deben seleccionar políticas convenientes de protección y conmutación, para poder asegurar la mejor confiabilidad de la sincronización.

4.1.1 Pautas Generales

La primera regla para el diseño de un buen plan de sincronismo es seguir cuidadosamente todas las recomendaciones aplicables de la UIT. Además, la ETSI EG 201 793 provee pautas para el planeamiento, implementación y mantenimiento de una red de sincronismo. Estos estándares han sido desarrollados basándose en años de experiencia y han sido estudiados en las necesidades particulares de las redes SDH y SONET, pero se aplican también en las redes digitales genéricas. La arquitectura que se debe adoptar es la recomendada en la recomendación UIT-T G.803. Además, deben utilizarse relojes conformes con las recomendaciones UIT-T G.811, G.812 y G.813. Como se dijo anteriormente, el estándar de la ETSI EN 300 462 está completamente alineado con las recomendaciones de la UIT-T y además usa la misma notación.

Además de estas consideraciones, existen pautas generales que apuntan a lograr un mejor desempeño y robustez al diseño de la red de sincronismo. Las más importantes son:

- Diseñar un plan de jerarquía maestro – esclavo con los suficientes niveles para cubrir todos los sitios estratégicos de la red a sincronizar. Se recomienda un segundo PRC de respaldo.
- *Evitar los lazos de sincronización (timing loops)*. Un lazo de sincronización ocurre cuando un reloj es sincronizado por una referencia de tiempo que es trazable a ese mismo reloj, directa o indirectamente, como se muestra en la figura 4.1. Estos sistemas de reloj son susceptibles a inestabilidades de frecuencia impredecibles: los relojes en un lazo de sincronización operan a la exactitud de su rango pull-in. El rango de pull-in se define como el desvío máximo entre la frecuencia en la entrada y el valor nominal de la frecuencia especificada, dentro del cual el reloj esclavo se engancha a la señal de entrada. Este desempeño es muchas veces peor que el desempeño en modo libre (free run) o el modo holdover.

Evitar los lazos de sincronización puede ser trivial al momento de diseñar un plan de sincronismo que opere en modo normal, pero puede ser muy difícil de garantizar que estos lazos aparezcan al momento en que suceda una protección automática (APS – Automatic Protection Switching) producto de una falla. No existe una manera simple de detectar los lazos de sincronismo, debido a que no

hay alarmas al momento en que se generan. Estos lazos pueden pasar desapercibidos hasta que el servicio se ve afectado por slips excesivos. Por lo tanto, se deben diseñar cuidadosamente los procedimientos para la protección automática, de manera que los lazos de sincronización no aparezcan bajo ninguna circunstancia.

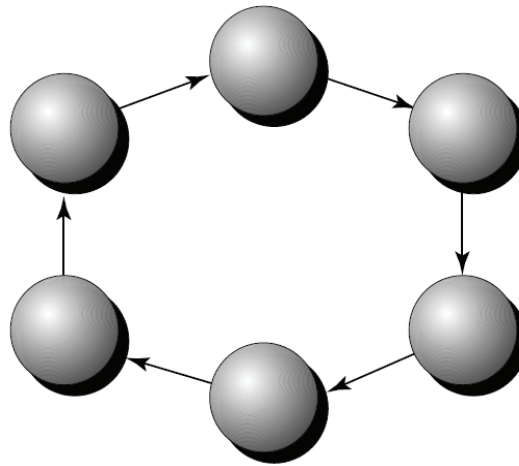


Figura 4.1. Lazo de Sincronización

- *Mantener la jerarquía de los relojes inclusive después de la reorganización producto de una protección automática.* La jerarquía maestro – esclavo debe mantenerse entre los relojes de diferente calidad en cualquier situación, inclusive después de una reorganización de la arquitectura como respuesta a una falla. Transportar la sincronización desde un reloj de mejor calidad a otro con calidad inferior maximiza el desempeño de la red especialmente en términos de la estabilidad holdover, en caso de que alguno de los relojes de la red fallasen.
- *No descuidar el concepto SSU/SASE/BITS.* La SSU/SASE/BITS es el reloj designado para recibir la sincronización y distribuirla a todos los relojes en la instalación.
- *Escoger la mejor instalación de transferencia de sincronización disponible.* Una instalación para la transferencia de sincronización puede ser una señal E1/DS1 transportada sobre una red PDH, una señal SDH STM-N, etc. La *mejor* referencia puede ser definida como la referencia con menos impedimentos, es decir, con menor inestabilidad temporal como jitter y wander, golpes de fase, etc.

- *Minimizar la longitud de la cadena de transferencia de sincronismo.* El número de relojes en serie dentro de una cadena de transferencia de sincronismo debe ser minimizado, debido a que el desempeño de la señal de sincronización se degrada conforme avanza de un reloj a otro. Si bien la cadena de referencia de sincronización ha sido diseñada para asegurar un desempeño aceptable, es evidente que mientras más relojes sean añadidos a cadena, más probable que existan fallas que produzcan que los relojes entren en holdover.
- *Planear rutas diversas para las instalaciones de sincronismo alternas.* Si se considera una redundancia de la referencia de protección, cualquiera que sea la instalación escogida para la transferencia de sincronismo, las instalaciones de sincronismo alternas deben seguir rutas diversas.

4.1.2 Distribución de Sincronismo Intranodo: El concepto SSU/SASE/BITS

Los relojes SSU/SASE/BITS son recomendados para la distribución de sincronismo intra-nodo. Estos están diseñados para engancharse a una referencia externa de sincronismo y para sincronizar todos los relojes de la central. Por lo tanto, la SSU/SASE/BITS deben ser los relojes más robustos y con mejor desempeño en modo holdover de toda la central

El nivel de estrato requerido por un reloj SSU/SASE/BITS está determinado por su nivel jerárquico en la red de sincronismo. Los relojes de estrato-2 de la ANSI o los relojes SSU/SASE de nodo de tránsito de la UIT-T/ETSI son usados típicamente en las centrales grandes, mientras que los relojes de estrato-3 de la ANSI o de nodo local de la UIT-T/ETSI se los usa en las centrales más pequeñas. Por seguridad y confiabilidad, los relojes SSU/SASE/BITS deben recibir al menos dos referencias externas provenientes de otros relojes.

Existen varios métodos usados para la distribución de sincronismo a los equipos que se encuentran dentro de una central, en distancias típicas no mayores a 100 m: señales E1/DS1 de sincronismo dedicadas, unidades de distribución de reloj, unidades síncronas de inserción de reloj, líneas de reloj compuesto y señales sinusoidales o cuadradas.

Señales Dedicadas E1 o DS1, a 2.048 Mbps o a 1.544 Mbps respectivamente, son típicamente usadas para sincronizar centrales de conmutación digital y sistemas cross-conectores no-SDH. Se transmiten sobre cables coaxiales de cobre normales. Sus características físicas están definidas en la recomendación de la UIT-T G.703. Si se usa un equipo autónomo dedicado (SASE) para implementar la función SSU/BITS, como es lo recomendado, las salidas de estos equipos proveen las señales antes mencionadas. Cuando se usa enlaces que transportan tráfico, el enlace escogido para el transporte de sincronismo típicamente no termina en una unidad SSU/BITS. En estos casos se usa un dispositivo llamado repetidor enlazado (Bridging Repeater). Este dispositivo se conecta a cualquier señal E1/DS1 y provee una copia de dicha señal. De esta manera, cualquier señal entrante que transporte tráfico puede ser usada para como referencia para sincronizar una unidad SSU/BITS como se muestra en la figura 4.2.

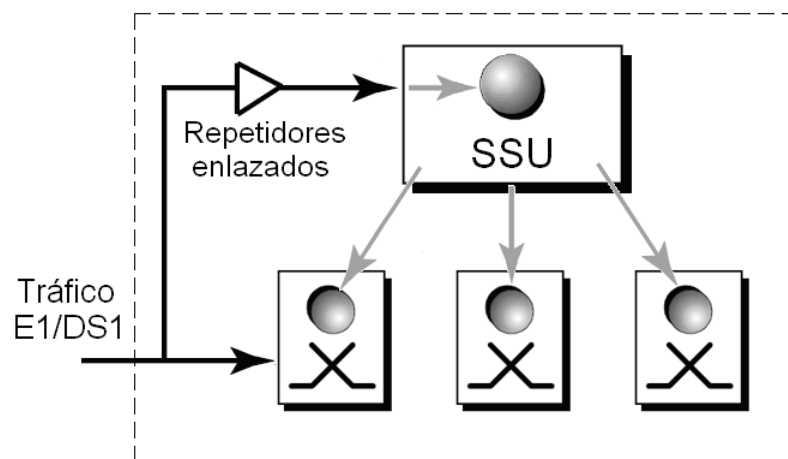


Figura 4.2. Conexión típica de Repetidores Enlazados

Una *Unidad de Distribución de Reloj* (CDU – Clock Distribution Units) es un dispositivo usado para suministrar múltiples señales de referencia, inclusive con características físicas variadas, directamente sintetizadas de la entrada de referencia. Este dispositivo no es un reloj SSU/BITS, debido a que no incluye un oscilador esclavo. Solamente es un sintetizador de frecuencia, que actúa como un buffer electrónico y un generador de patrones. Ha sido muy usado por la AT&T para sincronizar su red, desde 1980.

Las señales de salida de los relojes SSU/BITS, de los repetidores enlazados o de las CDUs son conectados a las entradas de sincronización externas de los equipos de la

central. Si algún equipo viejo no tiene una entrada de sincronización externa, este puede ser sincronizado dedicando los puertos de tráfico solamente para la sincronización o usando una *Unidad Síncrona de Inserción de Reloj* (SCIU – Synchronous Clock Insertion Units), el cual es un dispositivo cuya única función es de re-temporizar una señal E1/DS1. Por medio de este dispositivo, las señales provenientes de las SSU/BITS pueden ser inyectadas sobre las líneas que transportan tráfico y ser enviadas a los equipos que carezcan de una entrada de sincronización (Sin embargo, los slips afectarán la señal re-temporizada). Este tipo de dispositivos también han sido usados por la AT&T en su red de sincronismo.

Los equipos modernos poseen una entrada para sincronización externa acorde a la especificación de la UIT-T G.703, la mencionada señal sinusoidal de 2048 kHz. Otros equipos que siguen el estándar norteamericano aceptan señales sinusoidales o cuadradas de 1544 kHz o de 8 kHz. La interfase de 2048 kHz es la solución para la distribución de sincronismo intra-nodo recomendado por los estándares de la UIT-T y ETSI.

Otra señal comúnmente adoptada en Norteamérica para la distribución intra-nodo es el llamado *Reloj Compuesto* (CC – Composite Clock), usado para sincronizar equipos que tengan interfaces DS0. El reloj compuesto es una señal cuadrada bipolar de 64 kHz.

4.1.3 Pautas para la Distribución de Sincronismo Internodo

El sincronismo se transfiere de un nodo al otro a través de *senderos de sincronización*, por medio de una red de transporte apropiada. Para lograr una transferencia de sincronismo efectiva, es esencial escoger la mejor referencia (que tenga menores impedimentos de sincronización o micro-interrupciones) de entre las disponibles. Algunas pautas generales para seleccionar la mejor referencia se describen a continuación.

- Usar las señales ópticas STM-N/STS-N, para enlazar los SECs a lo largo de la cadena de referencia definida por la ETSI y la UIT-T. Esta debe ser la primera opción, debido a la excelente calidad de transferencia de sincronismo que se tiene.

- Si la opción óptica no es posible, el uso de un enlace E1/DS1 a lo largo de una red PDH es una buena solución ya que los relojes contenidos en las señales digitales transportadas son transparentes. Existe jitter presente en los tributarios recuperados al final de la cadena de transmisión PDH, pero el ancho de banda estrecho de los relojes SSU/BITS en la central receptora permite filtrar de manera efectiva la mayor parte.
- Si bien la cadena de transmisión PDH normalmente ofrece una buena transparencia para las señales de sincronismo, para la planificación de la red de sincronismo se debe seleccionar los enlaces E1/DS1 que tengan el menor número de saltos. Algunos administradores prefieren tener enlaces dedicados exclusivamente para la distribución de sincronismo, por facilidad y un supuesto aumento en la confiabilidad y desempeño, pero en realidad los enlaces de sincronismo pueden llevar tráfico sin ningún inconveniente.
- Como se mencionó en el capítulo 2, las señales transportadas en los payloads de SDH/SONET no deben ser usadas para transferir sincronismo, ya que estas pueden ser afectadas por un jitter excesivo especialmente bajo la acción del puntero, aunque la cantidad total de jitter medido en las interfaces depende de varios factores como: la tasa de ajustes de puntero a lo largo de la cadena de elementos de red, el diseño particular de los sincronizadores y desincronizadores utilizados, etc. El hecho es que usar el payload para transportar sincronismo siendo este afectado por el jitter producido por el movimiento de punteros, no es recomendable.
- Otros ejemplos de instalaciones que no deben usarse para transportar sincronismo son los enlaces satelitales y los enlaces microonda con repetidoras en medio.

4.2 REQUERIMIENTOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE SINCRONISMO

La planificación de sincronismo de una red debe cumplir varios requerimientos, empezando por cumplir los objetivos de desempeño y satisfacer las necesidades de servicio hasta la facilidad de mantener y administrar.

Varios de los objetivos de desempeño han sido establecidos por la UIT, ETSI y ANSI para controlar los slips en las redes de transporte. La UIT, ETSI y ANSI permiten una inexactitud máxima a largo plazo no mayor a 1×10^{-11} . Los requerimientos a corto plazo de 1 a 10 μs de error de tiempo por día deben también ser cumplidos a la salida de cada reloj de la red.

Para las redes privadas, la ANSI requiere que el primer equipo de la cadena de referencia de sincronismo ubicado donde el cliente no tenga más de 18 μs de error de tiempo por día, lo que corresponde a 0,15 slips diarios.

Los requerimientos de servicio para la sincronización dependen de la aplicación. La UIT ha establecido un umbral de un slip cada cinco horas para una conexión ‘aceptable’ de extremo a extremo que soportaría servicios de datos digitales, video, fax y algunos servicios encriptados. En algunas redes, es necesario un requerimiento más estricto para soportar servicios encriptados. Las redes de Señalización 7 también tienen un requerimiento típico no mayor a un slip por día. Todos estos requerimientos se cumplirían al cumplir los requerimientos de inexactitud máxima a largo plazo no mayor a 1×10^{-11} y los requerimientos a corto plazo de 1 a 10 μs de error de tiempo por día.

4.2.1 Sincronización de las Redes de Transporte

Las redes de transporte requieren de una planificación de sincronismo estricta para cumplir con los objetivos de desempeño bajo condiciones de operación normales. Un reloj receptor opera normalmente con un desvío de frecuencia comparable al reloj del cual toma la referencia. Este desvío de frecuencia se acumula a lo largo de la cadena de relojes. El objetivo de la planificación de sincronismo es asegurarse que estos desvíos acumulados de frecuencia no excedan la exactitud de frecuencia requerida de 1×10^{-11} .

Debido a que el desempeño de la sincronización está dominado por el reloj receptor y que el desempeño de la instalación, que es el objetivo principal de la planificación de sincronismo para las redes de transporte, se basa en la determinación de la *distribución de sincronismo* y la *selección de los relojes e instalaciones* a ser usados para sincronizar la

red. La selección y determinación del número de ubicaciones de relojes maestros se basa en gran parte en los objetivos de desempeño y gestión establecidos para una red.

4.2.1.1 Desempeño del Sincronismo en las Redes de Transporte

El desempeño del sincronismo en una red de transporte está caracterizado por tres componentes: la exactitud del reloj maestro, el desempeño de las instalaciones (equipos y enlaces) que distribuyen la referencia y el desempeño de los relojes receptores que obtienen su referencia externamente.

La inexactitud del reloj maestro contribuye con una pequeña porción de la inexactitud total en una red de sincronismo. Los PRC tienen una exactitud a largo plazo típica de entre 1×10^{-13} a 1×10^{-12} . Este desempeño es de 10 a 100 veces mejor que el desempeño de los relojes receptores que se enganchan al PRC.

El desempeño del sincronismo está dominado por una combinación del desempeño de la instalación y del reloj receptor. Durante una operación normal, el reloj receptor debe engancharse a un reloj maestro extrayendo su señal de sincronismo de la red la cual tiene pequeñas interrupciones o ráfagas de errores. El número de eventos ráfagas de error puede variar de 1 a 100 eventos diarios, dependiendo de la instalación, distancia y otros factores. Estas degradaciones constantes afectarán adversamente la distribución de una referencia de sincronismo. El reloj receptor reaccionará con cada error. Se le permite moverse hasta $1 \mu\text{s}$ en respuesta a cada error ocurrido con su referencia de tiempo. La acumulación de errores de la red y los errores de fase resultantes en el reloj receptor pueden producir que el reloj receptor opere con una inexactitud de frecuencia de entre 1×10^{-12} a 1×10^{-10} . Por lo tanto, los relojes receptores contribuyen con la mayor parte de los errores de sincronismo y slips en la red.

4.2.1.2 Fuentes de Referencia Primaria

Casi todas las operadoras con redes digitales dependen de una fuente de referencia primaria para su sincronización debido a que la UIT recomienda que las redes operen con una estabilidad de largo plazo de 1×10^{-11} . Los PRS se ubican en la red, según lo

mostrado en la figura 4.3. El PRS sincroniza a todos los equipos que se encuentran a su alrededor. Estos equipos, en cambio, sincronizarán al resto de la red.

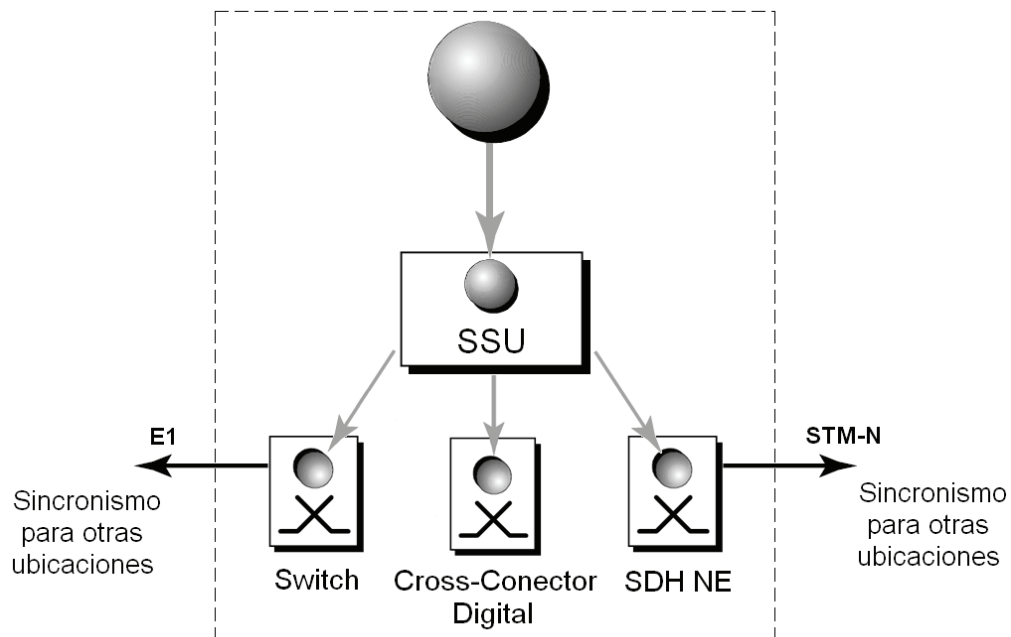


Figura 4.3. Configuración de un reloj de referencia primaria

La contribución de slips por parte de los PRS es normalmente insignificante. Una red que deriva su sincronismo de dos PRS experimentará, en el peor de los casos, cinco slips por año, causados por las inexactitudes de ambos relojes. Esto es despreciable comparado con el desempeño de los relojes receptores. Como se mencionó anteriormente, estos relojes operan con un desempeño de 10 a 100 veces peor comparados con los PRS a los cuales están enganchados. Por lo tanto, la tendencia de los administradores de red ha sido de una mayor dependencia de múltiples PRS para sincronizar su red.

La ubicación de los PRS depende de la topología de la red. Los PRS son generalmente ubicados en lugares que minimizaran la longitud de la cadena de relojes. De esta manera, se puede lograr el mejor desempeño para la red. Otros sitios adicionales que puedan requerir del uso de un PRS son las instalaciones de conmutación internacionales. Es en estas instalaciones donde se realiza la transferencia de señales de un operador a otro, de manera plesiócrona. Es importante, entonces, garantizar que estas instalaciones operen con una exactitud de frecuencia de al menos 1×10^{-11} necesaria para la operación plesiócrona.

4.2.1.3 Distribución Internodo.

La determinación de la distribución de referencia, sea esta primaria o secundaria, a través de la red depende de la topología de la misma y de los requerimientos de desempeño. Se deben seguir las pautas antes mencionadas para garantizar el mejor desempeño posible.

Los enlaces que tengan el mejor desempeño de error, en términos del menor número de segundos severamente errados (SES - Severely Errored Seconds) y del menor tiempo de inactividad, deben ser escogidos para transportar la sincronización. La tasa de errores es generalmente correlacionada con la longitud del enlace. Por lo tanto, es preferible que los enlaces sean cortos.

La mayoría de enlaces E1/DS1 pasan a través de multiplexores asíncronos. Estos multiplexores utilizan métodos de relleno de pulsos para transmitir la referencia sin la necesidad de re-temporizar o de cambiar la frecuencia de la señal. La inclusión de una multiplexación asíncrona en la señal de referencia, no afectará significativamente el desempeño de la sincronización o del diseño, siempre y cuando los niveles de jitter causados por la multiplexación permanezcan controlados.

La cantidad de saltos de la señal de referencia permitidos desde el PRS hasta los otros relojes de la red depende de las instalaciones (equipos y enlaces), del desempeño del reloj de la SSU y de los objetivos de desempeño de la red. El objetivo de diseño para la mayoría de redes es de una exactitud de frecuencia a largo plazo de 1×10^{-11} . Para lograr este nivel, los relojes de las SSU's deben tener un desempeño del error máximo de intervalo de tiempo (MTIE – Maximum Time Interval Error) menor a 1 μ seg, los equipos y enlaces solamente pueden tener unas pocas fallas a la semana y la señal de referencia proveniente de un PRS solo puede sincronizar en cascada de dos a cuatro centrales. Si se usan equipos (SSU's, equipos transmisores, etc.) de muy buena calidad, se puede aumentar la longitud de la cadena y se requerirían de un menor número de PRS.

4.2.1.4 Distribución Intra-nodo

Se recomienda seguir las pautas del concepto SSU/SASE/BITS mencionado en el punto 4.1.2.

4.2.1.5 Monitoreo y Verificación

La tendencia última en la sincronización de redes de telecomunicaciones es el uso de sistemas de monitoreo para verificar el desempeño del sincronismo. El desempeño de sincronismo de una central puede ser verificado comparando las señales entrantes de referencia con la señal de una referencia conocida de alta exactitud. El monitoreo puede ser hecho en tiempo real y de manera continua usando un repetidor enlazado sobre la señal E1/DS1 de referencia.

La verificación es necesaria para detectar y resolver las degradaciones de sincronismo antes de que estas impacten el servicio. Existen varias causas que provocan la degradación del sincronismo, como las actividades de mantenimiento, reinstalación de equipos, diagnósticos de los relojes y errores excesivos en los enlaces y equipos. Estas degradaciones no son fáciles de detectar o diagnosticar usando mecanismos de alarmas convencionales. El monitoreo permite una detección instantánea y diagnósticos simplificados de los problemas de sincronismo.

4.2.2 Sincronización de la Redes Privadas

La planificación del sincronismo en redes privadas es extremadamente difícil debido a que la topología de las redes privadas es compleja y sin restricciones. El uso extendido de relojes de estrato 4 en estas redes puede producir severas degradaciones en la señal de referencia. Las redes privadas también se encuentran en un ambiente con equipos de varias marcas y tecnologías lo que hace de la planificación de sincronismo una tarea compleja. Una planificación correcta requiere del conocimiento de toda la red privada. Todos los equipos y servicios digitales deben ser tomados en consideración.

Otra complejidad adicional en la planificación de sincronismo de las redes privadas versus la planificación de las redes de transporte es que cualquier reconfiguración de la

red privada afectará al diseño de la red de sincronismo. Esto es debido a la conectividad limitada en las redes privadas. Se requiere de una nueva planificación cuando cualquier servicio digital, cualquier cableado o cualquier equipo es añadido, eliminado o cambiado en una red privada. Esto generalmente no sucede en las redes de transporte.

4.2.2.1 Desempeño del Sincronismo en las Redes Privadas

La mayoría de redes privadas se basan en los relojes de estrato 4 CPE para su sincronismo. Estos relojes tienen un desempeño 100 a 1000 veces inferior a los relojes de estrato 4E o mejores. El desempeño de sincronismo de las redes privadas está dominado por el desempeño de los relojes de estrato 4 CPE.

Bajo condiciones de estrés, los relojes de estrato 4 CPE se comportan de manera muy diferente comparados con los otros tipos de relojes. Cuando un reloj de estrato 4 experimenta una interrupción corta, declarará a esa referencia externa como inútil y cambiará su referencia a una de respaldo, ya sea otra referencia externa o su oscilador interno. Durante el cambio de referencia, el reloj producirá un golpe de fase grande de 10 a 1000 μ seg. Este golpe de fase es normalmente lo suficientemente grande para causar slips y se reproduce a lo largo de todas las salidas del CPE.

Los relojes que se encuentran adelante en la cadena, son incapaces de mantenerse enganchados a la referencia externa con un golpe de fase de ese tamaño. Para estos dispositivos, el golpe de fase es interpretado como un error y como resultado, cambian su referencia produciendo un nuevo golpe de fase y haciendo que el error se propague a lo largo de la cadena. Por lo tanto, un error que ocurre al inicio de la cadena de sincronismo puede reproducirse a lo largo de todos los nodos de la cadena como se muestra en la figura 4.4.

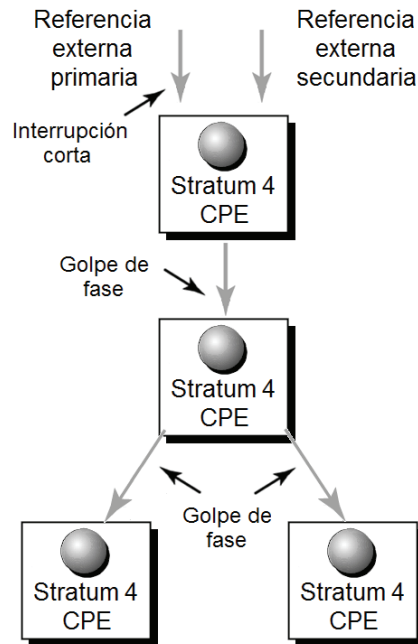


Figura 4.4 Errores en cadena de sincronismo en las redes privadas

Debido a que los sistemas de transmisión que llevan la referencia de sincronismo en las redes privadas pueden tener de 1 a 100 ráfagas de errores por día, el desempeño de las redes privadas usando relojes de estrato 4 CPE es generalmente pobre. El desempeño puede ser 1000 veces peor que el de las redes públicas, operando con una exactitud de frecuencia efectiva de 1×10^{-9} a 1×10^{-7} . Una tasa de slips de docenas por día por CPE es muy común.

4.2.2.2 Fuentes de Sincronización

Típicamente las redes privadas no poseen ni operan ningún PRS, sino más bien dependen del proveedor de servicios para el sincronismo. Varios de los servicios provistos por la operadora están sincronizados por una referencia trazable a un PRS. Una red privada puede tomar sincronismo de estos servicios.

Debe notarse que no todos los servicios pueden proveer de una referencia de sincronismo. El administrador de una red privada debe verificar con el proveedor de servicios si éste cuenta con una referencia de sincronismo. Por lo general, en Norteamérica, los servicios conmutados tienen una referencia de sincronismo, mientras que los servicios punto a punto pueden o no llevar una referencia de sincronismo. En Europa, normalmente ambos servicios tienen una referencia de sincronismo.

Para optimizar la sincronización, una red privada debe recibir la referencia de sincronismo de tantas fuentes trazables a PRS como fuera posible, inclusive si las fuentes vienen de distintas operadoras. Operando normalmente, la exactitud de frecuencia de los equipos de la red del proveedor es 100 a 1000 veces mejor que la exactitud de un reloj CPE. Por lo tanto, el desempeño de la sincronización de un CPE mejorará si este recibe una referencia directamente del proveedor, a diferencia que si lo recibiera de algún otro reloj CPE en cadena. El uso de fuentes múltiples trazables a PRS mejora el desempeño, minimiza la longitud de la cadena de relojes de referencia y aumenta la diversidad de las fuentes de referencia de sincronismo en la red.

Si la red privada no cuenta con ningún servicio que provea una referencia de sincronismo trazable al PRS de la operadora, la red privada debe establecer un reloj maestro para la red. En este caso la red privada se convierte en una isla digital y no interactúa digitalmente con ningún equipo trazable a un PRS. El reloj maestro designado es el reloj que tenga el mejor desempeño en modo libre (free-run). Así mismo, el reloj maestro debe estar centralmente ubicado para reducir la longitud de los saltos de la cadena de sincronismo. Este reloj maestro, normalmente el reloj de una PBX o un multiplexor, se lo deja que funcione en modo libre. Todos los equipos de la red obtienen su referencia trazable a este reloj maestro.

El riesgo de operar una red privada con un reloj que no es trazable a un PRS es que cuando se añaden nuevos servicios a la red. Si se añade un nuevo servicio digital que es trazable a un PRS, la distribución de la señal de referencia de sincronismo debe cambiar para que la red reciba la referencia de este nuevo servicio. De no desarrollar un nuevo plan de sincronismo y dejar que la red reciba la referencia de un reloj en modo libre provocara un aumento excesivo de slips y el nuevo servicio quedara inutilizado.

4.2.2.3 Distribución Internodo

La señal de referencia es pasada entre las redes privadas cuando un emplazamiento esta conectado a la red privada por medio de servicios punto-a-punto que no llevan sincronismo. Este es el caso típico de las redes de datos. Las reglas para determinar como la referencia es transmitida entre los emplazamientos de las redes privadas es similar a las

recomendaciones de las redes de transporte: usar los mejores enlaces (más cortos), evitar la formación de lazos de sincronización (timing loops). La minimización del número de saltos es especialmente importante en las redes privadas debido a que los golpes de fase en los relojes de estrato 4 CPE se propagan por toda la red. Mientras más corta sea la cadena de sincronización, es menor la posibilidad de impacto sobre los relojes CPE.

Los tres principales obstáculos para la distribución internodo en las redes privadas son la topología no jerárquica, la falta de diversidad y la falta de posibilidades de tener doble referencia. Las redes privadas tienen normalmente conectividad limitada. Cada emplazamiento está conectado a otros pocos emplazamientos. A veces, es imposible tener un emplazamiento con una referencia secundaria sin formar un lazo de sincronización. En estas situaciones, es mejor evitar el uso de una referencia secundaria para eliminar la posibilidad de formar un lazo de sincronización. El desempeño de un reloj CPE en un lazo como este es normalmente de 10 a 100 veces peor que su desempeño en modo libre o modo hold-over.

La topología no jerárquica también es producto de una falta de conectividad. A menudo, esta situación es inevitable. Idealmente, las fuentes de referencia primarias y secundaria deben ser diversas, debido especialmente a que la mayoría de relojes CPE no incorporan holdover en caso de pérdida de la referencia. Sin embargo, en las redes privadas la diversidad de referencia no siempre es una opción. Un emplazamiento suele estar conectado solamente a otro.

4.2.2.4 Distribución Intra-nodo

En las redes privadas, cuando un emplazamiento depende de un reloj CPE para el sincronismo, el uso del concepto SSU/SASE/BITS no es posible o no es deseable. La mayoría de relojes CPE no disponen de opciones de referencia externa. Por lo tanto, para poder usar un reloj CPE como SSU/BITS, se requieren de dos enlaces E1/DS1 (exclusivos para sincronismo) y dos repetidores entrelazados. Normalmente esto es más caro que el costo de un equipo autónomo dedicado (SASE) para implementar la función SSU/BITS.

En situaciones donde un reloj SSU/BITS es una opción, la red privada debe usar uno que tenga un estrato 4E o mejor, si es posible.

4.2.2.5 Cambio dinámico de la distribución de sincronismo

Varios fabricantes de relojes CPE incorporan características propietarias que permiten el cambio dinámico del plan de sincronismo en sus equipos. Con esta característica, la distribución de sincronismo puede cambiar continuamente entre los equipos del fabricante. Una o más fuentes de sincronismo son designadas para la red. De estas fuentes, el CPE determina automáticamente como distribuir la referencia a la red, con el objetivo de minimizar el número de saltos. Si un CPE pierde su referencia externa, como se muestra en la figura 4.5, toda la distribución de sincronismo cambia para suministrar a todos los CPE con una fuente de sincronismo con el menor número de saltos posible.

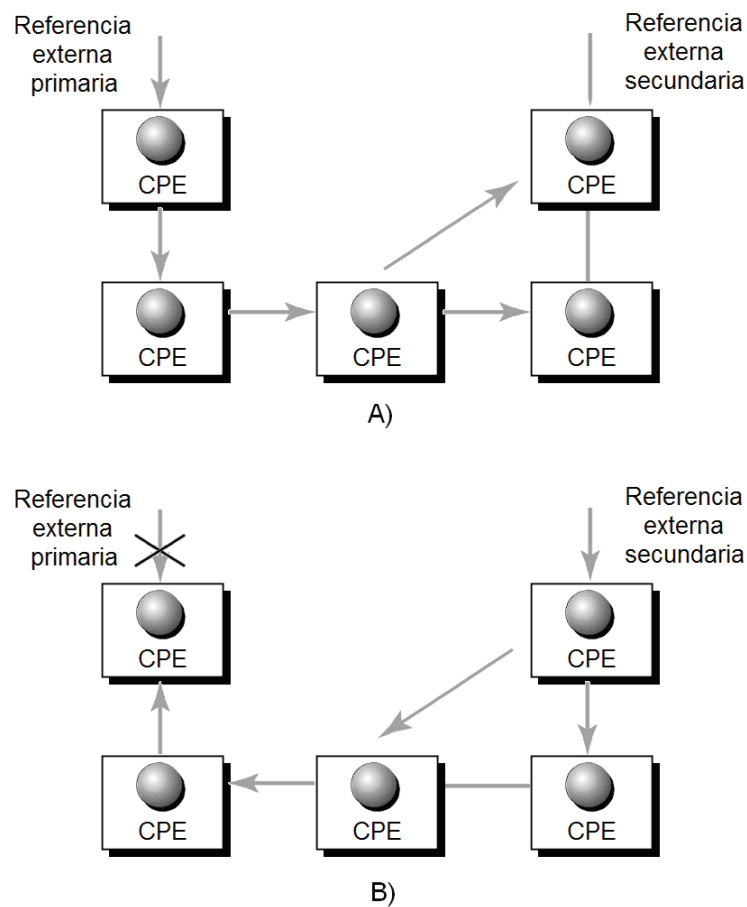


Figura 4.5. Cambio dinámico de la distribución de sincronismo

4.3 PLANIFICACIÓN DEL SINCRONISMO PARA REDES SDH

El objetivo de la planificación del sincronismo es la determinación de la manera de distribuir la señal de referencia de sincronismo y de la selección de los relojes y enlaces a ser usados para sincronizar la red.

4.3.1 Distribución de la señal de referencia de sincronismo.

Tanto la ETSI como la UIT-T han definido una cadena de referencia de conexión como guía para la distribución de la señal de referencia de sincronismo. En la cadena no debe haber más de 10 nodos locales ni de tránsito. Estos nodos hacen referencia a 10 centrales que utilizan relojes de nivel 2 o nivel 3 en sus SSU's. En medio de estas centrales existen cadenas de relojes de los elementos de red SDH (NE – Network Element). Ninguna de estas cadenas debe contener más de 20 elementos o relojes. El número total de relojes NE en una red SDH no debe sobrepasar 60. Cada reloj en la cadena recibe la señal de referencia por medio de la interfase óptica.

Esta conexión de referencia fue determinada en base a simulaciones de operación bajo condiciones ideales. Debe cumplir el requerimiento de mantener el nivel de jitter de 5 UI para el transporte de señales E1, DS1 y DS3. Cabe recalcar que el wander introducido en el transporte E1/DS1 no fue considerado. La necesidad de reducir los niveles de wander limitando el desempeño en condiciones de estrés puede requerir un cambio en esta cadena de referencia. Además, por cuestiones de confiabilidad la longitud de la cadena puede ser acortada.

4.3.2 Requerimientos del reloj SSU

Para cumplir con los requerimientos de jitter para el transporte de señales E1, DS1 y DS3 a través de la red SDH, el reloj de la SSU usado para sincronizar los equipos en la central debe ser de nivel 2 (de tránsito) o nivel 3 (local). El reloj debe tener un nivel de ruido intrínseco bajo y debe tener un filtro con un ancho de banda no mayor a 0,1 Hz para filtrar el ruido de la red. El reloj también requiere tener un período de reajuste MTIE de 1000 ns con la pendiente de fase menor que 5×10^{-8} durante la mayor parte del período de reajuste. Para limitar el wander en los tributarios E1 y DS1, se debe usar una SSU con mejores períodos de

reajuste MTIE y con un filtro más estricto. Hasta la fecha la UIT-T no ha desarrollado ninguna recomendación acerca de los requerimientos de wander para los tributarios E1/DS1.

4.3.3 Requerimientos de los relojes de los elementos de red SDH

El reloj de los elementos de red SDH (NE) es el reloj con peor desempeño en la escala de relojes de la UIT-T. Tiene un requerimiento en modo holdover de 5×10^{-8} para un desvío de frecuencia inicial y un corrimiento de frecuencia de 5×10^{-7} por día. El requerimiento del período de reajuste MTIE es menor a 1 μ seg con la pendiente de fase menor que 5×10^{-8} durante la mayor parte del período de reajuste.

La mayor diferencia entre un reloj NE SDH y un reloj SSU es el diseño de su ancho de banda. El reloj NE SDH tiene un ancho de banda de 1 a 10 Hz, está limitado a este rango por dos razones. La primera, que el ancho de banda debe ser por lo menos 10 veces el ancho de banda del reloj SSU de manera que la acumulación de wander bajo condiciones ideales de operación se minimiza. La segunda, es que el reloj NE debe soportar reajustes rápidos de sincronización.

Cuando los NE SDH están configurados en un anillo y un enlace que lleva la sincronización es interrumpido, la distribución del sincronismo en el anillo es reconfigurado. Todo el anillo de 20 NE SDH debe reconfigurar su distribución de sincronización en aproximadamente 15 segundos. Esto significa que cada NE debe reconfigurar su sincronización y tener una salida estable en menos de un segundo. Este requerimiento de un segundo limita la rapidez con la que reacciona el NE SDH y por consiguiente limita el ancho de banda del filtro.

4.4 GESTION DE LAS REDES DE SINCRONISMO

De manera análoga a las redes de transmisión y conmutación, las redes modernas de sincronismo no consisten simplemente de los enlaces de transporte y de relojes, sino además constan de sistemas de gestión y protección, lo cual asegura una mejor calidad y confiabilidad de toda la distribución de sincronismo.

Las redes más avanzadas de sincronismo son manejados por sistemas diseñados conforme la recomendación de la UIT-T M.3010 (*Principios para la Gestión de una Red de Telecomunicaciones – TMN*). Algunos otros sistemas son manejados por el protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*), que fue originalmente diseñado para los equipos de internet. De cualquier manera, todos los últimos sistemas de gestión de las redes de sincronismo tienen un abundante conjunto de comandos para poder controlar y operar la red de sincronismo de manera total.

4.4.1 Áreas Funcionales y Niveles de Abstracción de la Gestión de Red

El marco de gestión de la OSI identificó al principio cinco áreas funcionales de la gestión de red:

- *Gestión de Fallas* (Fault Management), que trata con la detección, aislamiento y corrección de operaciones anormales. Es el conjunto de herramientas que permiten la detección, aislamiento y corrección de una operación anormal (falla). Las posibles causas de una operación anormal son los errores de diseño e implementación, perturbaciones externas y caducidad del tiempo de vida de un equipo. Ejemplos de fallas son la pérdida de la señal de referencia en la entrada de los relojes, fallas de hardware, etc. Por lo tanto, la gestión de fallas incluye funciones de:
 - ↳ Mantener y examinar los registros (logs) de fallas,
 - ↳ Aceptar y actuar después de una notificación de falla (alarma),
 - ↳ Rastrear e identificar fallas,
 - ↳ Ejecutar pruebas de diagnóstico
 - ↳ Corregir las fallas, en lo posible (por ejemplo, re-enrutar la señal de sincronización)
- *Gestión de Configuración* (Configuration Management), que trata con la configuración e identificación de los equipos. Es el conjunto de herramientas que permiten, por ejemplo
 - ↳ Grabar los datos de configuración (por ejemplo, constantes de loop-time de los relojes esclavos),
 - ↳ Grabar los cambios de los datos de configuración

- ↳ Actualizar los datos de configuración
 - ↳ Identificar los componentes de red al encenderse y removerlos de la pantalla de visualización de red al apagarse,
 - ↳ Asignar nombres simbólicos a los equipos de la red.
- *Gestión de Contabilidad* (Accounting Management), que trata con la identificación de los costos del uso de los recursos de hardware y software;
 - *Gestión de Desempeño* (Performance Management), que trata con los registros de la calidad de servicio (QoS – Quality of Service). Detecta los cambios en el desempeño de la red recolectando datos estadísticos en tiempo real y registrándolos de manera periódica. El uso de estos registros no está restringido a la gestión de desempeño, sino que está también disponible su uso en otras áreas que pueden obtener información útil de estos registros:
 - ↳ Los registros de desempeño pueden ser usados por la gestión de fallas para detectar desperfectos
 - ↳ Los registros de desempeño pueden ser usados por la gestión de configuración para decidir cuando es necesario algún cambio de la configuración
 - ↳ Los registros de desempeño pueden ser usados por la gestión de contabilidad para documentar la calidad de servicio con los clientes
 - *Gestión de Seguridad* (Security Management), que trata con los procedimientos que habilitan al administrador la operación de las funciones de seguridad que gestionan los recursos de acceso a los usuarios autorizados. Permite que un conjunto de procedimientos aseguren que solo personal autorizado operen las distintas funciones de gestión. Bajo este aspecto, las funciones de configuración son críticas: por ejemplo, solo la persona a cargo de la coordinación de la red de sincronismo debe ser capaz de cambiar las prioridades de referencia de la protección automática conmutada (APS – Automatic Switching Protection), constantes de tiempo, etc.

Estas cinco áreas han sido ampliamente adoptadas para clasificar las funciones de gestión. Para señalar estas áreas, el término FCAPS es normalmente usado y es derivado de las iniciales (en inglés) de las cinco áreas funcionales.

Estas cinco áreas de las funciones de gestión descritas tienen una clasificación *horizontal*. En otras palabras, estas funciones de gestión están clasificadas en cinco áreas de acuerdo a sus diferentes dominios de aplicación. Por otro lado, las funciones de gestión también pueden ser clasificadas de una manera *vertical*, aplicando un nivel de abstracción lógico. Por tanto, estas funciones son comúnmente definidas por los siguientes niveles jerárquicos de abstracción:

- *Gestión del elemento de red* (network element management), que trata por ejemplo con la configuración de los puertos tributarios o la detección de fallas de hardware;
- *Gestión de la red* (network management), que trata por ejemplo con el establecimiento y liberación de circuitos a lo largo del anillo SDH (gestión de configuración), detección de las caídas de circuitos (gestión de fallas), registro de la tasa de BER en los circuitos establecidos (gestión de desempeño) o el registro de la información del uso de los recursos de la red (gestión de contabilidad);
- *Gestión de servicio* (service management), que trata con la configuración, fallas, contabilidad, etc. del servicio ofertado al cliente, por ejemplo servicios varios de transporte sobre internet orientados y no-orientados a la conexión;
- *Gestión de negocios* (business management), al nivel más alto de abstracción, que trata con la gestión de todos los servicios ofrecidos a los clientes.

Además, las funciones de gestión en un nivel dependen de las funciones de gestión de los niveles jerárquicos inferiores para proveer su servicio. Este modelo se lo ilustra en la figura 4.6.

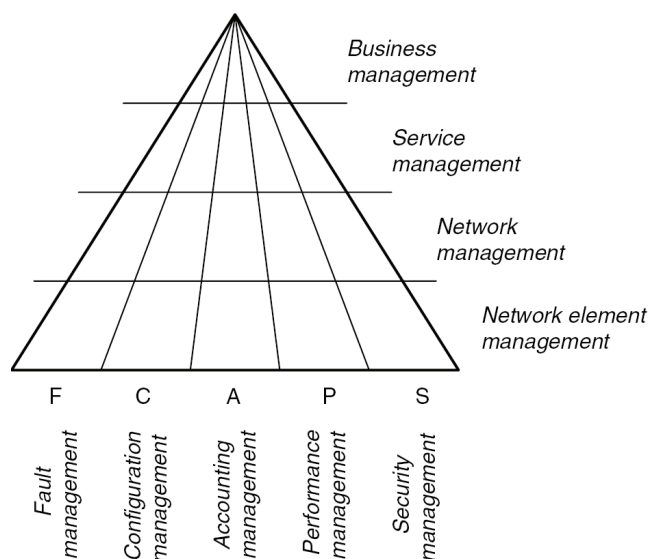


Figura 4.6. Áreas funcionales y niveles jerárquicos de abstracción de la gestión de red

En lo referente a los niveles de abstracción, los sistemas de gestión de sincronismo están enfocados en la gestión de elementos (por ejemplo, la gestión de los relojes, su configuración, sus referencias activas, etc.) y en la gestión de red (por ejemplo, establecer las rutas de sincronización). Es evidente que la gestión de la red de sincronismo debe trabajar conjuntamente con el sistema de gestión de la red de transmisión, la cual está a cargo del transporte de las señales de referencia de sincronismo.

4.4.2 Monitoreo del Desempeño de una Red de Sincronismo

Las redes de sincronización avanzadas están provistas con sistemas de monitoreo que permiten verificar de manera continua, en tiempo real, el desempeño alcanzado en la distribución de las señal de referencia de sincronismo.

En principio, el desempeño de la sincronización en cualquier central puede ser verificado comparando la señal de referencia local (por ejemplo, extraída de una línea E1 o DS1 proveniente de un SASE local) con otra señal de referencia derivada de una fuente conocida y alta exactitud. El monitoreo de una señal E1/DS1 que lleva tráfico se lo puede realizar en tiempo real usando un repetidor entrelazado y realizando algún tipo de medición comparativa con alguna otra señal de referencia.

Los datos del desempeño de la sincronización recolectados en cada nodo son reportados en tiempo real al sistema de gestión de la red, donde se procesa y se sintetiza la información del desempeño, para producir reportes significativos y para establecer las acciones correctivas de ser necesario.

El objetivo del monitoreo del desempeño de la sincronización es la necesidad de ser proactivo, es decir, detectar la degradación de la señal de referencia antes de que esta afecte algún servicio. Existen varias posibles fuentes que afectan severamente a la señal de referencia: las actividades de mantenimiento, reinstalación de equipos, diagnósticos de los relojes, micro-interrupciones de los enlaces que transportan la señal de referencia, etc. La mayoría de estos fenómenos producen golpes de fase abruptos en la señal de referencia o inclusive la pérdida de la misma, por lo que pueden ser fácilmente reconocidos. Sin embargo, ser capaces de detectar las degradaciones más sutiles, como por ejemplo desvíos

lentos de frecuencia o un wander excesivo con un error de frecuencia promedio igual a cero, puede ser el factor decisivo que permita garantizar que la calidad del servicio no se vea afectada de manera repentina a futuro. Estas degradaciones sutiles no son fáciles de diagnosticar con los sistemas de alarma tradicionales.

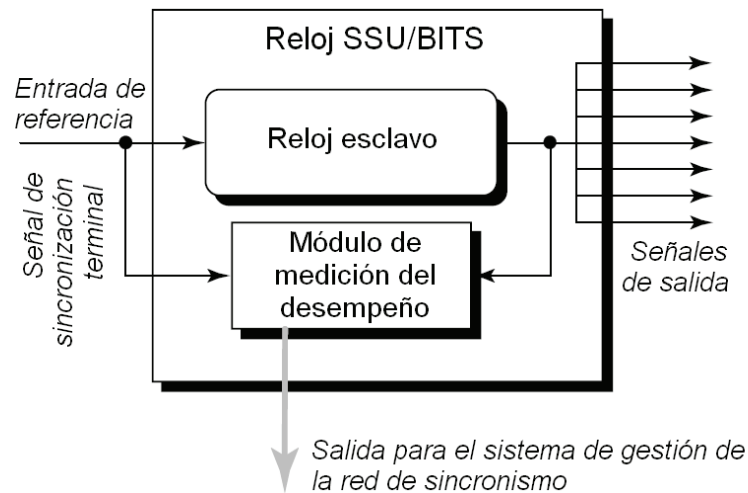
4.4.3 Métodos para el Monitoreo del Desempeño de una Red de Sincronismo

Las mediciones locales del desempeño del sincronismo de una red son ejecutadas en un nodo comparando la señal de referencia local (generada por el reloj SSU/BITS local), con una o más señales provenientes de otros nodos de la red. Estas dos señales son comparadas midiendo el error de fase o tiempo existente entre ellas. El *error de fase* es la diferencia $\Delta\phi$ entre dos señales y es medida en radianes. El *error de tiempo* es la medida en nanosegundos del retraso de una señal comparada con la otra. Esta función, normalmente, es integrada e implementada dentro de los relojes SSU/BITS.

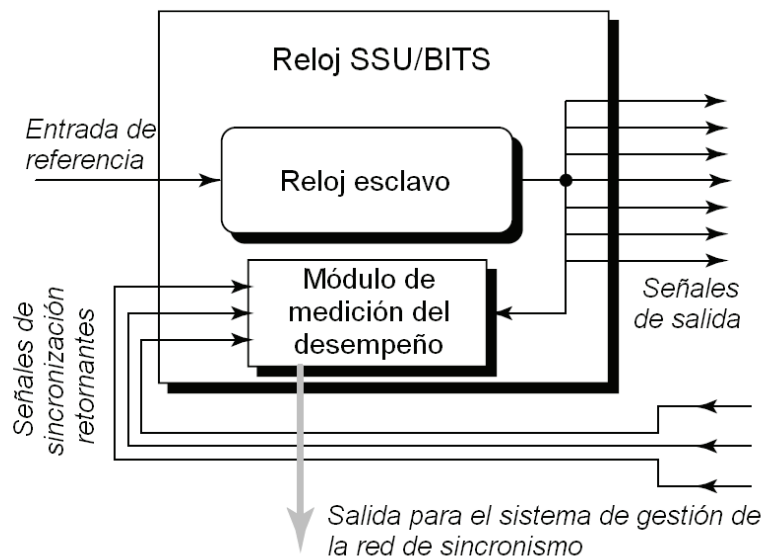
4.4.3.1 Estrategias para el Monitoreo del Desempeño de una Red de Sincronismo

Los relojes SSU/BITS están equipados (la mayoría) con módulos para la medición del desempeño que comparan la referencia local con una o más referencias externas, para medir el error de fase entre ellas. La estrategia de monitoreo del desempeño de sincronismo puede ser centralizada o descentralizada según el tipo de señal de referencia externa usada para hacer la comparación.

Cuando se compara la señal de referencia de entrada (terminal) con la señal de referencia local de salida de un reloj esclavo SSU/BITS para medir los errores de fase y de tiempo, como se muestra en la figura 4.7(a), se tiene una *estrategia de monitoreo descentralizada*. Por otro lado, si se compara la referencia local en la salida del reloj con otras señales de referencia retornantes, como se muestra en la figura 4.7(b), se habla de una *estrategia de monitoreo centralizada*. Por lo tanto, el módulo de medición de desempeño de la figura 4.7 incluye las siguientes tres funciones básicas:



(a) Comparación de la señal referencia de entrada (terminal) con la señal de referencia local de salida



(b) Comparación de la referencia local en la salida del reloj con otras señales de referencia retornantes

Figura 4.7. Monitoreo del desempeño del sincronismo en un reloj SSU/BITS de acuerdo con las estrategias (a) descentralizadas y (b) centralizadas

- Adquisición y medición de los datos del error de tiempo entre la señal de salida del reloj y cada una de las señales de referencia
- Evaluación de las mediciones de calidad de sincronismo (MTIE y TDEV) basados en los datos adquiridos
- Comunicación con el sistema de gestión para el reporte del desempeño.

En el esquema representado en la figura 4.7(a), el monitoreo del desempeño se lo realiza midiendo el error de tiempo entre la entrada y la salida del reloj esclavo local. Esta configuración es estandarizada como *la configuración de medición de reloj-sincronizado* (synchronized-clock measurement configuration) por la ETSI EN 300 462 y la UIT-T G.810.

En el esquema representado en la figura 4.7(b), el monitoreo del desempeño de sincronismo se lo realiza midiendo el error de tiempo entre la salida del reloj local y algunas señales de referencia de sincronización retornantes, provenientes de nodos de nivel jerárquico inferior que están sincronizados por el reloj local, directa o indirectamente, y por lo tanto tienen trazabilidad con el mismo. Esta configuración también está estandarizada por la ETSI EN 300 462 y la UIT-T G.810.

Generalmente no es posible distinguir de manera no-ambigua si los defectos de fase revelados en los resultados de la medición son consecuencia de algún problema en el oscilador local o en alguno de los relojes a lo largo de la cadena, de donde viene la señal de referencia retornante. De cualquier manera, la disponibilidad de varias señales de referencia retornantes para el monitoreo, permiten aplicar un tipo de voto mayoritario para interpretar los resultados de la medición: razonablemente, si solamente una señal de referencia retornante presenta problemas, se asume que el problema está en el enlace de la cadena; en cambio, si todas las señales de referencia retornantes fallasen, se asume que el problema está en el reloj local.

4.5 PROTECCIÓN DE LA RED DE SINCRONIZACIÓN

El valor que tiene la red de sincronismo es tan alto que es necesario asegurar la confiabilidad y la fiabilidad. Por eso, los relojes normalmente son duplicados. Además, los algoritmos de protección de sincronización automática permiten a los relojes recuperar la señal de referencia de al menos dos rutas de sincronización, a condición de que existan rutas diversas. Estos algoritmos de protección de sincronización están diseñados para que la jerarquía de la red siempre se mantenga (los relojes recuperan la señal de referencia de relojes que tengan igual o superior nivel en la escala jerárquica).

La detección de fallas en las entradas de los relojes es el método más común utilizado para desencadenar al sistema de protección automática. Por ejemplo, en la entrada de un NE-SDH, la detección de alguno de los siguientes estados de alarma en la interfase de sincronización normalmente iniciará la conmutación de protección de sincronismo: *Loss of Signal* (LOS), *Alarm Indication Signal* (AIS), *Loss of Frame* (LOF), *Excessive Bit Error Rate* (E-BER), *Loss of Pointer* (LOP). Además, inclusive las degradaciones más pequeñas en la calidad de la señal de referencia, detectadas por los módulos de medición de desempeño, pueden ser configuradas para que inicien el sistema de protección de sincronismo.

4.5.1 Criterios para el Diseño de un Algoritmo de Protección de Sincronismo

La disponibilidad de múltiples referencias en las entradas de los relojes de la red implica que algún algoritmo de decisión debe ser diseñado, para permitir que la red recupere la distribución de la señal de referencia usando rutas alternas en caso de falla. La ETSI EG 201 793 recomienda la consideración de los siguientes requerimientos básicos, al momento de diseñar un algoritmo de protección:

- No deben crearse lazos de sincronización después de los ajustes realizados en la distribución de la señal de referencia.
- Cuando un reloj entra en modo holdover, este no debe ser usado como referencia de relojes que tengan mejor estabilidad (nivel jerárquico más alto).
- Cada NE debe ser sincronizado por la fuente de mejor calidad de entre las disponibles

4.5.2 Mensajes de Estado de Sincronismo

Los organismos de estandarización UIT-T, ETSI y ANSI han definido los mecanismos automáticos para la selección de la señal de referencia de sincronismo y la autoprotección en caso de fallas de sincronización, basados en un esquema de calidad que proporciona una indicación de la calidad de la señal de referencia, usando *Mensajes de*

Estado de Sincronismo (SSM – Synchronization Status Messages). Estos SSM están incrustados en las señales de sincronismo.

Los SSM son identificadores incrustados dentro de las señales digitales que son usadas como fuentes de sincronismo por los relojes SSU/BITS u otros elementos de red. Con los SSM, el nodo originario declara la calidad de la fuente de sincronización de la cual su señal es, en última instancia, trazable (es decir, el tipo de reloj que sincroniza al nodo directa o indirectamente por medio de la cadena de relojes de referencia) o si la señal que entrega es útil como fuente de sincronismo. Esta información de calidad está basada según el tipo de reloj (PRC, SSU, SEC, etc.) y no refleja ninguna medida de la calidad actual de la señal. Por tanto, esta información no refleja las degradaciones provocadas por el jitter y wander del transporte, impedimentos incidentales en el reloj, etc.

Los SSM han sido definidos para permitir que los relojes seleccionen la mejor fuente de sincronismo de entre todas las referencias disponibles siguiendo un esquema de prioridad. El propósito principal es evitar la formación de lazos de sincronismo, y al mismo tiempo permitir que los relojes se reconfiguren automáticamente después de una falla de sincronización. Los SSM han sido diseñados para permitir que las estrategias de selección de la referencia de sincronismo sean compatibles con la mayoría de topologías de red, como punto-a-punto, lineal, de malla o de anillo.

4.5.3 Mensajes de Estado de Sincronismo en Redes SDH

En las redes SDH (de acuerdo con los estándares de la UIT-T y ETSI), los SSM son transportados sobre las señales STM-*N* en los bits 5 a 8 del byte S1 en la sección MSOH, según lo definido por la recomendación de la UIT-T G.707 (*Network Node Interface for the Synchronous Digital Hierarchy*). En la tabla 4.1 están los valores de los bits asignados según el estándar de los SSM. Cuatro valores son asignados para los cuatro niveles jerárquicos G.803: PRC, SSU de tránsito, SSU local y SEC. Además, dos valores de bit adicionales han sido asignados: uno para indicar que la calidad de la sincronización es desconocida y el otro para indicar que la señal no debe ser usada como referencia. Los

restantes valores de bit posibles están reservados para futuros niveles de calidad que puedan ser definidos por los administradores de red o fabricantes.

Tabla 4.1. Mensajes SSM para el uso en redes SDH según la UIT-T Rec. G.707.

S1 Bits b5 – b8 (SDH)	Nivel de calidad de la sincronización
0 0 0 0	<i>Calidad desconocida</i>
0 0 0 1	Reservado
0 0 1 0	<i>Reloj de referencia primaria (PRC) (UIT-T Rec. G.811)</i>
0 0 1 1	Reservado
0 1 0 0	<i>Reloj SSU de nodo de tránsito (UIT-T Rec. G.812)</i>
0 1 0 1	Reservado
0 1 1 0	Reservado
0 1 1 1	Reservado
1 0 0 0	<i>Reloj SSU de nodo local (UIT-T Rec. G.812)</i>
1 0 0 1	Reservado
1 0 1 0	Reservado
1 0 1 1	<i>Reloj de equipo SDH (SEC) (UIT-T Rec. G.813)</i>
1 1 0 0	Reservado
1 1 0 1	Reservado
1 1 1 0	Reservado
1 1 1 1	<i>No usar para la sincronización</i>

El mensaje de *Calidad desconocida* ha sido definido para permitir la integración de nodos que no soportan mensajes de estado de sincronismo a redes que soportan SSM.

La razón de escoger al patrón ‘1 1 1 1’ para el mensaje *No usar para la sincronización* se basa en el hecho de que este patrón puede ser emulado por fallas en los equipos y en particular por la señal de indicación de alarma de la sección de multiplexación (MS-AIS – Multiplex Section - Alarm Indication Signal). Los equipos que receptan un MS-AIS no lo interpretan necesariamente como una falla en la interfase física de la fuente de sincronización por lo que se hizo obligatorio escoger este patrón para definir este estado (No usar para la sincronización). La asignación de este patrón, permite el reconocimiento de este estado independientemente de la interacción del proceso de detección de un MS-AIS.

4.5.4 Mensajes de Estado de Sincronismo en Redes PDH

En la señal europea E1, se puede usar los bits 4 al 8 del byte TS0 (bits S_{a4} , S_{a5} , S_{a6} , S_{a7} , y S_{a8}) en las tramas que no contienen la palabra de alineamiento de trama para transportar los mensajes SSM. Esto constituye un canal de enlace de 4 kbit/s. Generalmente estos mensajes SSM tienen la misma codificación de 4 bits estandarizada para las redes SDH y son transmitidos en la posición de bit antes mencionada sobre la multitrama en un lapso de 4 tramas básicas E1.

4.5.5 Ejemplo de una Protección Automática de Sincronismo en un Anillo SDH usando SSM

Los anillos SDH y SONET han sido ampliamente adoptados a nivel mundial, debido a su robustez inherente a fallas en los nodos y enlaces. Se han especificado varios procedimientos automáticos para la protección del tráfico en varios estándares internacionales. De cualquier manera, la restauración del tráfico no implica necesariamente la restauración de la sincronización. Por tanto, los SSM han sido definidos intencionalmente para llenar este vacío, al permitir también la recuperación automática en caso de fallas en la sincronización.

El ejemplo de la protección de sincronismo está resumido en tres pasos en la figura 4.8. Seis nodos (SDH ADM – Add Drop Multiplexer), numerados del 1 al 6, están conectados por dos anillos de fibra rotacionales, uno para el tráfico activo y el otro de reserva para protección del tráfico. El nodo 1 está ubicado en la central donde un reloj SSU (conforme UIT-T G.812) es desplegado. Los relojes de los ADM SDH están acorde a la norma UIT-T G.813.

Durante una operación normal (Figura 4.8(a)), el anillo está sincronizado por el nodo 1 (nodo principal), mediante el reloj SSU local, que a su vez está sincronizado por una señal de referencia trazable al PRC (UIT-T G.811) de la red a través de la red de sincronización. Todos los anillos de la red, con excepción del nodo principal, pueden tomar la referencia de ambos lados por medio de los enlaces activos y de protección, que circulan en ambas direcciones a lo largo del anillo. En este ejemplo, todos los nodos están

enganchados al enlace de tráfico activo, en sentido de las agujas del reloj (las flechas grises gruesas del gráfico). Por lo tanto, todos los nodos transmiten en sentido de las agujas del reloj al siguiente nodo el mensaje SSM ‘PRC (G.811)’, para indicar que su referencia tiene trazabilidad con el PRC de la red. En la dirección contraria, en sentido contrario a las agujas del reloj, el mensaje SSM transmitido es ‘No usar para la sincronización’ para prevenir la formación de lazos de sincronismo (timing loops). Además, el nodo 1 también está enviando el mensaje SSM ‘PRC (G.811)’ en sentido contrario.

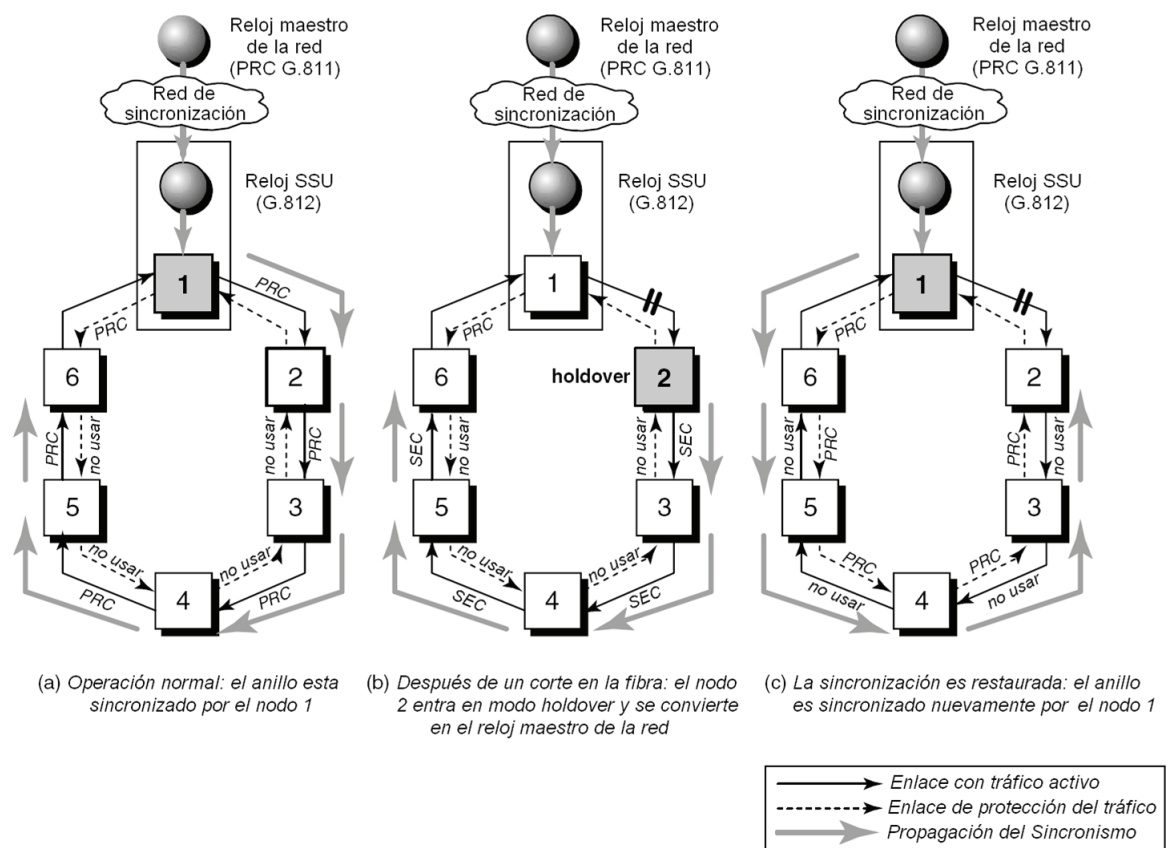


Figura 4.8. Protección del sincronismo en un anillo SDH usando SSM

Después de la falla en el enlace con tráfico activo entre los nodos 1 y 2 (Figura 4.8(b)), el reloj del ADM en el nodo 2 pierde su referencia de sincronismo y, después de un tiempo, entra en modo holdover. Luego, empieza a enviar en sentido de las agujas del reloj al siguiente nodo el mensaje SSM ‘SEC (G.813)’, para informar a los nodos subsecuentes que a partir de este momento ellos están recibiendo su referencia de un reloj de equipo SDH (SEC – SDH Equipment Clock) corriendo de manera autónoma

(holdover). Entonces, también el nodo 3, después de haber recibido el mensaje SSM 'SEC (G.813)' del nodo 2, empieza a enviar en sentido de las agujas del reloj al siguiente nodo el mismo mensaje SSM 'SEC (G.813)'. Los nodos 4, 5 y 6 hacen lo mismo.

La restauración de la sincronización (Figura 4.8(c)) ocurre cuando el nodo 6, tan pronto como recibe el mensaje SSM 'SEC (G.813)' del nodo 5, conmuta su referencia y se engancha al nodo 1, del cual recibe un mejor mensaje SSM 'PRC (G.811)'. Después de un tiempo que permite al nodo 6 realizar la conmutación de referencia, este empieza a transmitir al nodo 5 (en sentido contrario a las agujas del reloj) el mensaje SSM 'PRC (G.811)', para indicar que su referencia es ahora trazable al PRC de la red. Así mismo, el nodo 5, tan pronto como recibe este nuevo mensaje del nodo 6, cambia su referencia del nodo 4, del cual recibe un mensaje SSM 'SEC (G.813)', al nodo 6. El mismo comportamiento ocurre en los nodos 4, 3 y 2 que cambian su referencia. Al final de este proceso de reconfiguración, la sincronización óptima es restaurada: el anillo vuelve a ser sincronizado por el nodo 1, aunque la referencia es ahora distribuida en sentido opuesto a las agujas del reloj sobre los enlaces de protección de tráfico.

4.6 EJEMPLOS DE REDES SINCRONIZADAS

4.6.1 La red de Sincronismo de AT&T (USA)

La AT&T ha sido el primer operador a nivel mundial en instalar una red de sincronismo, para brindar sincronización a su propia red nacional de telecomunicaciones, a las redes privadas digitales de los clientes, a la mayoría de operadoras del consorcio Bell y a varias compañías telefónicas independientes.

Como se mencionó en el capítulo dos, la primera red de sincronismo fue instalada por AT&T en los años 70, para solucionar el problema de la distribución de frecuencias piloto a los multiplexadores y demultiplexadores FDM. Estas frecuencias piloto eran distribuidas como señales analógicas de 2.048 MHz derivadas de un arreglo de relojes de cesio, conocido como la 'Frecuencia de referencia básica de sincronización' (BSRF – Basic Synchronization Reference Frequency) y que estaba ubicado en Hillsboro, Missouri. La señal de referencia BSFR era distribuida por sistemas de radio analógico y coaxial.

Inclusive los sistemas FDM más críticos podían tolerar un desvío de frecuencia de 10^{-9} , el cual era garantizado por los sistemas de distribución BSRF hasta en presencia de impedimentos con la transmisión. De cualquier manera, al concluir la digitalización de la red de transmisión y conmutación, AT&T se vio obligado a mejorar el sistema de distribución analógico y luego realizar una planificación de una nueva red de sincronismo.

Esta nueva red de sincronismo fue planificada e instalada por AT&T a principios de los años 80. Fue la primera red de sincronismo en el mundo diseñada acorde a las necesidades modernas, pensando en las centrales de conmutación digitales y equipos de transmisión SONET.

La red de sincronismo de AT&T está diseñada acorde a una estrategia jerárquica múltiple maestro-esclavo, dependiendo de los GPS para brindar una exactitud a largo plazo. Esta red de sincronismo tiene incorporada un sistema de monitoreo de sincronismo lo que le brinda la capacidad de verificar la calidad en varios niveles y de verificar la precisión de la señal de referencia distribuida a lo largo de la red nacional.

En el primer nivel de la jerarquía de sincronización, existen 16 PRC desplegados en sitios estratégicos: 14 están ubicados en el continente norteamericano, uno en las islas Hawai y otro en Puerto Rico, como se muestra en la figura 4.9.

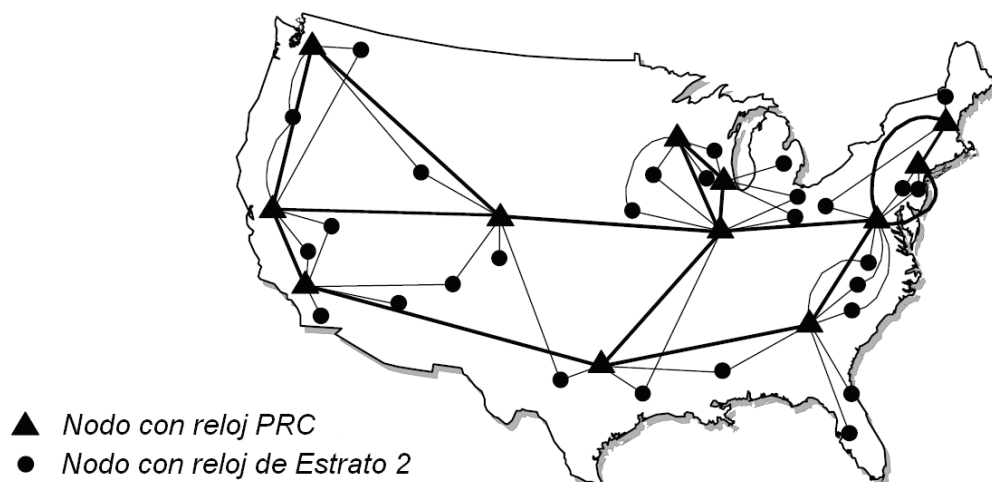


Figura 4.9. Representación de la topología de la red de sincronismo de AT&T

Los PRC consisten de dos estándares secundarios atómicos de frecuencia (osciladores de rubidio) guiados por GPS. De ahí, la estabilidad a corto plazo es provista por los osciladores de rubidio mientras que la estabilidad a largo plazo es provista por la guía del GPS. Además, se logra un desempeño óptimo en modo hold-over.

La señal de referencia del PRC se transmite de cada nodo primario a sus nodos secundarios más cercanos, los cuales no cuentan con un PRC. Cada PRC monitorea simultáneamente la referencia que recibe de al menos dos otros nodos primarios (con PRC) así como la referencia proveniente de los nodos secundarios para obtener datos de la estabilidad a largo plazo. De esta manera, la estabilidad a largo plazo de la señal de referencia de cada PRC es verificada con una exactitud alrededor de 10^{-13} , virtualmente la misma que la del UTC. La arquitectura está diseñada de manera que los nodos secundarios sean monitoreados independientemente por diferentes PRC's. Los enlaces para la distribución de la señal de referencia entre los PRC son señales DS1 a 1.544 Mbps, transportados sobre sistemas de transmisión PDH ópticos.

En el segundo nivel de la jerarquía de sincronización, los nodos secundarios están constituidos de un reloj de estrato 2, incorporados ya sea en el sistema de transmisión o en el sistema de conmutación. Los relojes de estrato 2 reciben su referencia DS1 de sincronismo de diversos nodos primarios. La distribución intra-nodo es la misma para los nodos primarios y secundarios.

4.6.2 La Red de Sincronismo de Telecom-Argentina

A principios de los años 90, Telecom-Argentina instaló una red backbone de transmisión óptica SDH, que conecta las ciudades principales de Argentina, además montó una red de sincronismo, que fue una de las más modernas en el mundo en la época de la instalación.

La arquitectura de la red de sincronismo de Telecom-Argentina está representada en la figura 4.10. El diseño de la red consiste de una arquitectura clásica maestro-esclavo, con tres niveles y bastantes enlaces redundantes.

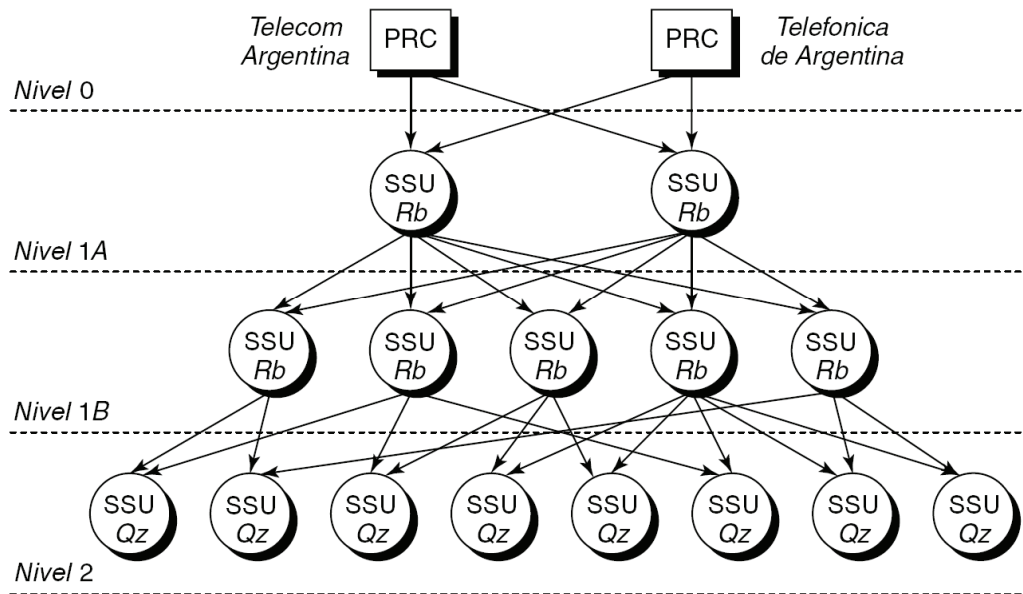


Figura 4.10. Arquitectura de la Red de Sincronismo de Telecom-Argentina

En el nivel 0, el PRC, ubicado en la central principal en Buenos Aires, está equipado con dos estándares de frecuencia primarios basados en dos osciladores de cesio y un receptor GPS. La señal de salida de referencia del PRC es una combinación de estas tres referencias. Para incrementar aun más la confiabilidad del sistema, Telecom-Argentina realizó un convenio de cruce de referencias con Telefónica Argentina que posee otro PRC de características similares al de Telecom-Argentina. Bajo este convenio, cualquier PRC puede suplir de una referencia a la otra operadora en caso de que existiera una falla en el PRC principal.

En el nivel 1, existen más de once relojes SSU, cada uno equipado con dos estándares de frecuencia secundarios basados en dos osciladores de rubidio. Entre esos once relojes, dos relojes (nivel 1A) están directamente sincronizados por los dos PRC's y actúan como los distribuidores principales de la señal de referencia de sincronismo para toda la red. Los otros nueve relojes (nivel 1B) reciben la señal de referencia de ambos relojes de nivel 1A y sincronizan diferentes segmentos de la red, usando múltiples enlaces para mejorar la confiabilidad.

En el nivel 2, hay más de 35 relojes SSU, cada uno equipado con dos relojes redundantes basados en dos osciladores de cuarzo de alta precisión.

La distribución internodo entre los relojes SSU se la realiza mayoritariamente a lo largo de cadenas de relojes SEC's, siguiendo la cadena de referencia definida por la UIT-T y la ETSI, por medio de señales STM-*N* (figura 2.7). La distribución intra-nodo, por otro lado, se la hace por medio de señales analógicas de 2.048 MHz conforme la recomendación UIT-T G.703.

Toda la red de sincronismo esta administrada por un moderno sistema de gestión. Cada reloj SSU esta conectado al sistema de gestión por medio de una red de conmutación de paquetes. Las funciones de gestión constan de gestión de fallas, de desempeño y de configuración. El alcance de la gestión de configuración incluye los distribuidores SSU pero no a los osciladores SSU. El sistema de gestión incluye un sistema de monitoreo de desempeño. Las unidades SSU pueden monitorear la calidad de las señales terminales entrantes así como las señales retornantes de 2.048 Mbps provenientes de las centrales de conmutación remotas ubicadas en un nivel mas bajo en la escala jerárquica de sincronización.

CAPITULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha visto que el desempeño de la sincronización tiene un fuerte impacto en los servicios de datos digitales, servicios encriptados y en las tecnologías de transporte como SDH y SONET. El factor principal en el desempeño de una red de sincronismo es el desvío de frecuencia que el reloj receptor presenta relativo a la fuente de referencia primaria al cual esta enganchado. Esta degradación en el desempeño puede ser controlado con la introducción de varias fuentes de referencia primaria, con el uso de relojes más robustos, y con una adecuada planificación y diseño de la sincronización.

Las redes SONET y SDH presentan grades demandas en la red de sincronización. El desempeño a corto tiempo del wander es crucial y requiere el uso de buenos relojes. La operación de la red en condiciones de stress debe ser limitada. Esto requiere la disminución de la longitud de las cadenas de sincronización, necesitando el uso de múltiples relojes de referencia primaria. Todas estas acciones son necesarias para mantener las tasas de errores de transmisión en valores aceptables para las señales DS1, E1 y DS3 que atraviesan SDH y SONET.

Se debe realizar una planificación estricta de los sistemas de sincronismo si se desea cumplir con los objetivos de desempeño y servicio. En las redes de transporte, el objetivo principal de la planificación de sincronismo es la determinación de las rutas para la distribución de la señal de referencia y la selección de las instalaciones y relojes a ser usados para sincronizar la red. Se debe prestar atención en la selección de las SSU y las referencias. En las redes privadas, el objetivo principal es reducir los errores causados y propagados por los relojes CPE. Esto requiere limitar el uso de dichos relojes así como limitar la longitud de la distribución, el uso de tantas fuentes de referencia externas de calidad como fuese posible, y el uso de arquitecturas SSU/BITS.

La sincronización es el medio para mantener todos los equipos digitales en una red de comunicaciones operando a la misma frecuencia media. Para la transmisión digital, la información es codificada en pulsos discretos. Cuando estos pulsos se transmiten a través de enlaces y nodos en una red digital de comunicaciones, todas estas entidades deben estar sincronizadas.

El objetivo de las redes de sincronización es la distribución de información de tiempo y frecuencia sobre una red de relojes extendidos en un área geográficamente amplia. Los relojes están en diferentes localizaciones y normalmente están interconectados por algún medio, como cable, fibra o radio enlaces. La intención es sincronizar en tiempo y frecuencia las escalas de todos los relojes a lo largo de la red utilizando para ello la capacidad de algunos de los canales de datos digitales de estos enlaces. En algunas aplicaciones el interés es establecer, distribuir y mantener una referencia de tiempo como por ejemplo el GMT (Greenwich Mean Time). La hora local puede ser fácilmente obtenida sumando el offset de tiempo apropiado.

Existen aplicaciones sensibles al registro de eventos en el tiempo que necesitan de una sincronización de relojes en tiempo real que permita validar los datos obtenidos. El estampado de tiempo con la hora legal es un requisito para la validación de transacciones, transferencias de fondos o derechos, compras, ventas, cambios de tarificación, facturación de servicios de aplicaciones por tiempo (ISP, ASP). Entre más crítica es una aplicación con relación al tiempo, con mayor razón se debe buscar una fuente de sincronización precisa y propia, caso contrario se está completamente indefenso en disputas relacionadas con el tiempo, como por ejemplo para refutar una hora a la que fue puesta una orden de compra o venta, o el periodo de facturación de servicios telefónicos o de Internet. El receptor GPS ofrece una fuente de tiempo precisa y económica.

Para muchas personas involucradas en el ámbito de las telecomunicaciones, el término *sincronización* se les es familiar pero con un sentido restringido. Generalmente se asume que la sincronización es un recurso dado que consiste en una mera señal de reloj y se descuida el hecho de que esta señal tiene que ser de alta calidad y que debe cumplir con ciertos requerimientos para que sirva a su propósito.

ANEXOS

ANEXO 1

Introducción a la Sincronización de Tiempo Real

Introducción a la sincronización del tiempo real

La escala de tiempo estandarizada utilizada por la mayoría de las naciones del mundo es el Universal Time Coordinated (UTC), el cual está basado en la rotación de la tierra alrededor de su eje, y alrededor del Calendario Gregoriano, que está basado en la rotación de la tierra alrededor del sol. La escala de tiempo UTC esta disciplinada con respecto al Tiempo Atómico Internacional (TAI) insertando segundos de salto en intervalos de alrededor de 18 meses. El tiempo UTC es difundido por varios medios, inclusive la radio y sistemas de navegación por satélite, los módems telefónicos y relojes portátiles.

Receptores de propósito especial están disponibles para muchos servicios de diseminación de tiempo, inclusive el Sistema Global de Posición (GPS) y otros servicios operados por varios gobiernos nacionales. Por razones de costo y conveniencia, no es posible equipar cada computadora con uno de estos receptores. Sin embargo, sí es posible equipar a un número pequeño de computadoras para que actúen como servidores primarios de tiempo que sincronicen un número mucho más grande de servidores y clientes secundarios interconectados por una red común. Para hacer esto se requiere de un protocolo distribuido de sincronización de reloj de red que pueda leer al reloj del servidor, transmitir la lectura a uno o más clientes y ajustar cada reloj cliente como sea requerido. Los protocolos que hacen esto incluyen al Protocolo de Temporización de Red NTP (Network Time Protocol), al Protocolo Digital de Sincronización de Tiempo DTSS (Digital Time Synchronization Protocol) y otros.

Aspectos de Diseño del protocolo

El protocolo de sincronización determina la desviación de tiempo (offset) del reloj-servidor relativo al reloj-cliente. Todos los protocolos de sincronización actualmente disponibles lo hacen de manera diferente, pero todos siguen el mismo modelo general. A petición de los interesados (clientes), el servidor envía un mensaje incluyendo su valor actual de reloj o etiqueta de tiempo (timestamp) y el cliente registra su propio timestamp a la llegada del mensaje. Para una mejor precisión, el cliente necesita medir el retardo de propagación servidor-cliente para determinar la desviación del reloj relativa al servidor. Debido a que no es posible determinar los retardos en un solo sentido, a menos que se conozca la verdadera desviación de reloj, el protocolo mide el retardo total (roundtrip) y asume que los tiempos de propagación son estadísticamente iguales en cada dirección. En general, ésta es una aproximación útil; sin embargo, en el Internet de hoy día, las rutas de red y los retardos asociados pueden diferir significativamente debido a los proveedores de Internet individuales.

La comunidad servida por el protocolo de sincronización puede ser muy grande. Por ejemplo la comunidad de NTP en el Internet hasta hace pocos meses incluyó más de 500 servidores de tiempo primarios, sincronizados por radio, satélite y módem, y sobre los 400.000 servidores y clientes secundarios. Además, hay miles de comunidades privadas en las redes gubernamentales, institucionales y corporaciones. Cada comunidad esta organizada de manera jerárquica (diagrama de árbol) o subredes, con los servidores primarios en la raíz y los servidores secundarios y clientes desplegados a lo largo de la red, niveles mayores de stratum. Es necesario en cada nivel de stratum emplear servidores redundantes y diversas rutas para proteger la seguridad de la hora contra fallas de software o de las conexiones de hardware y los enlaces de red.

Los Protocolos de sincronización trabajan en uno o más modos de asociación, dependiendo del diseño del protocolo. El modo cliente/servidor, también llamado maestro/esclavo, es soportado por ambos protocolos mencionados: NTP y DTSS. En este

modo, un cliente se sincroniza a un servidor mediante un modelo convencional de llamada de procedimiento remoto RPC (Remote Procedure Call). El protocolo NTP también soporta el modo simétrico, que permite que cualquiera de los dos servidores sincronice al otro, para proporcionar respaldo mutuo. NTP y DTSS soportan un modo emisor (broadcast) y permite que muchos clientes se sincronicen a uno o a algunos pocos servidores, reduciendo el tráfico de la red especialmente cuando muchos clientes están en ella. En NTP se puede utilizar la multidifusión (multicast) de IP cuando la subred atraviesa varias redes.

La administración de la configuración puede ser un grave problema en subredes grandes. Varios esquemas que indexan las bases de datos públicas y los servicios de directorio de red se utilizan en NTP y DTSS para descubrir nuevos servidores. Ambos protocolos usan el modo de difusión (broadcast) para brindar soporte a un gran número de clientes; pero, debido a que los clientes en modo de solo escucha (listen-only clients) no pueden calibrar el retardo, la precisión sufre. En NTP, los clientes determinan el retardo al momento en que un servidor es descubierto por primera vez mediante sondeos (polling) en el modo cliente/servidor y entonces cambian al modo de solo escucha. Además, los clientes de NTP pueden difundir un mensaje especial de "manycast" para solicitar las respuestas a los servidores cercanos y continuar en el modo de cliente/servidor con los que respondan.

La seguridad Pública

Un servicio seguro de tiempo para una red requiere tomar las precauciones necesarias para prevenir ataques accidentales o maliciosos en los servidores y clientes de dicha red. La necesidad de conseguir una hora exacta, o la "**confiabilidad**", requiere que los clientes puedan determinar que los mensajes recibidos son auténticos; o sea, si fueron enviados realmente por el servidor accesado y no fueron fabricados ni modificados por un intruso. La presencia de la misma hora en varios servidores y clientes, o la "**ubicuidad**" o capacidad de compartir la hora con muchas máquinas al mismo tiempo, requiere que cualquier cliente puede verificar la autenticidad de cualquier servidor que utilizando sólo información pública. Esto es muy importante en aquellos servicios de red ubicuos como son los servicios de directorio, administración de clave con criptografía y la sincronización horaria.

NTP incluye las provisiones necesarias para autenticar criptográficamente los servidores individuales utilizando criptografía de clave simétrica en donde los clientes autentican a los servidores usando claves secretas compartidas. Sin embargo, las claves secretas deben ser distribuidas usando medios seguros que están más allá del alcance del protocolo. Esto puede ser difícil y frágil con se tiene una población grande de clientes potenciales, que incluyen posiblemente a piratas informáticos o "hackers".

La criptografía moderna de clave pública proporciona los medios necesarios para ligar las credenciales de identificación del servidor y los valores relacionados de los usuarios usando los servicios públicos de directorio. Sin embargo, estos medios tienen un alto costo, especialmente cuándo están involucrados muchos clientes con necesidades críticas de tiempo, como sucede a menudo en el caso de los servidores de NTP. Además, existen problemas exclusivos de NTP en la interacción entre las funciones de autenticación y sincronización, debido a que la una requiere de la otra.

La Versión 4 de NTP incluye un modelo de seguridad revisado y un esquema de autenticación que soporta tanto la criptografía simétrica como la criptografía de clave pública. La variante de clave pública está especialmente hecha para reducir el riesgo de intrusiones, minimizar el consumo de recursos de procesador y la disminuir la vulnerabilidad al ataque de los hackers.

El Modelo de Reloj de la computadora y el Análisis del Error

La mayoría de las computadoras incluyen un oscilador de cuarzo con resonador estabilizado y un contador que interrumpe al procesador en intervalos de unos pocos milisegundos. En cada interrupción, una cantidad llamada **tick** se añade a una variable del sistema que representa la hora del reloj. El reloj puede ser leído por programas del sistema y por aplicaciones y ocasionalmente enganchado a una referencia externa. Una vez enganchado, el reloj lee los incrementos a una tasa nominal, dependiendo del valor del tick. Los núcleos o “**kernels**” típicos del sistema Unix proporcionan un mecanismo programable para aumentar o disminuir el valor del tick en intervalos pequeños y fijos de manera que amorticen suavemente un ajuste de hora o tiempo dado sobre múltiples intervalos de ticks.

Los errores del reloj se deben a variaciones en el retardo de la red y a las latencias en el hardware de la computadora y en el software (jitter), así como la inestabilidad del oscilador del reloj (wander). El tiempo de un cliente relativo a su servidor puede ser expresado como:

$$T(t) = T(t_0) + R(t - t_0) + 1/2 D(t - t_0)^2$$

Dónde:

- t = tiempo actual,
- T = desviación de tiempo (offset) en la última medición de la actualización t_0 ,
- R = desviación de la frecuencia (offset) y
- D = corrimiento debido al envejecimiento del resonador.

Los tres términos incluyen las desviaciones sistemáticas que pueden ser corregidas y las variaciones aleatorias que no pueden serlo. Algunos protocolos, incluyendo el DTSS, estiman sólo el primer término de esta expresión, mientras que los otros, incluyendo NTP, estiman los primeros dos términos. Para los errores debidos al tercer término, si bien es importante modelar el envejecimiento del resonador en aplicaciones de precisión, es poco considerado, ya que son parte, generalmente, de los errores de los dos primeros términos.

El protocolo de sincronización estima $T(t_0)$ (y $R(t_0)$, donde es pertinente) en intervalos regulares τ y ajusta el reloj para minimizar $T(t)$ en el futuro. En casos comunes, R puede tener las desviaciones sistemáticas de varios cientos partes por millón (ppm) con variaciones aleatorias de varios ppm debido a cambios en la temperatura ambiente. Si no son corregidas, los errores resultantes pueden acumularse a segundos por día. Para que estos errores no excedan una especificación nominal, el protocolo debe periódicamente re-estimar T y R y compensar las variaciones ajustando el reloj en intervalos regulares. Como un tema práctico, para precisiones nominales de decenas de milisegundos, se requiere que los clientes cambien los mensajes con servidores en intervalos del orden de decenas de minutos.

Los análisis de los osciladores de cuarzo con resonador estabilizado muestran que los errores son una función del promedio del tiempo, el cual depende, en cambio, del intervalo entre las correcciones. En intervalos de corrección menores a unos pocos cientos de segundos, los errores son dominados por el jitter, mientras, en intervalos mayores, los errores son dominados por el wander. Como se explica más adelante, las características de cada régimen determinan el algoritmo usado para disciplinar al reloj. Estos errores se acumulan en cada nivel de stratum desde la raíz hasta las hojas del árbol de la subred. Es posible cuantificar estos errores por medios estadísticos, como en NTP. Esto permite que aplicaciones de tiempo real puedan ajustar el retardo en la reproducción de audio o video, por ejemplo. Sin embargo, las estadísticas requeridas pueden ser diferentes según las

clases de aplicaciones. Algunas aplicaciones necesitan que el error absoluto garantizado nunca se exceda, como lo previsto por los siguientes principios de exactitud.

Principios de exactitud (Correctness)

Las Aplicaciones que requieren sincronización segura de tiempo, como el control del tráfico aéreo, o los sistemas de tarificación o intermediación tarifaria, deben tener la confianza de que el reloj local sea el correcto dentro de lo relativo a una escala de tiempo dada, tal como el UTC. Hay suficiente literatura que estudia estos temas con respecto a varios modelos fracasados, como la falla por paro del reloj y por desacuerdos entre servidores. Mientras estos modelos inspiran mucha confianza dentro de una apreciación teórica, la mayoría requiere de múltiples series de mensajes para cada medida y sería poco práctico en una red grande de computadoras tal como el Internet. Sin embargo, puede demostrarse que el peor-caso de error, al leer un reloj remoto de un servidor, no puede exceder la mitad del retardo de roundtrip medido por el cliente. Es una apreciación valiosa, porque da argumentos fuertes sobre la exactitud del sistema de temporización.

En el esquema de Sincronización Probabilística del Reloj PCS (Probabilistic Clock Synchronization) concebido inicialmente, una tolerancia máxima del error es establecida a priori; y, las muestras del valor de tiempo asociadas con los retardos de roundtrip, que exceden dos veces este valor, son desechadas. Por el argumento descrito anteriormente, las muestras restantes deben representar los valores de tiempo dentro de la tolerancia especificada. Cuando la tolerancia disminuye más muestras fallan la prueba hasta un punto en donde no hay muestras que sobrevivan. La tolerancia puede ser ajustada para un mejor arreglo entre la precisión más alta que sea coherente con la tasa aceptable de sobrevivencia de muestras.

En un esquema posterior, usado en NTP y DTSS, el error del peor-caso especificado para cada servidor determina un intervalo de la exactitud. Si cada uno de entre varios servidores es sincronizado a una escala de tiempo común, el tiempo verdadero debe estar contenido en la intersección de sus intervalos de exactitud. Si algunos intervalos no se cruzan, entonces el grupo exclusivo que contiene el número máximo de intersecciones es asumido como correcto o *truechimer* y los otros se asumen como inexactos o *falseickers*. Sólo el truechimer se utiliza para ajustar el reloj del sistema.

Los principios de exactitud del reloj del sistema requieren que las lecturas de reloj estén siempre en aumento, así dos lecturas sucesivas no serán iguales. Mientras la latencia de lectura exceda la resolución de hardware, esta conducta es garantizada. Con las latencias que caen por debajo de un microsegundo en los procesadores modernos, el reloj del sistema para los sistemas operativos modernos corre en nanosegundos, en lugar de los microsegundos usados en el kernel original de Unix. Con las velocidades de procesadores sobre 1 GHz, esta suposición se pone a duda.

Los datos que Arreglan los Algoritmos

Por su naturaleza, la sincronización del reloj es un proceso continuo, teniendo como resultado una sucesión de medidas con cada uno de los posibles servidores y teniendo como resultado un ajuste de reloj. En algunos protocolos, los algoritmos realizados se usan para mejorar las estimaciones de tiempo y frecuencia y refinar el ajuste del reloj. Los algoritmos están basados en métodos de recorte promedio y de filtrado. El algoritmo de filtro del reloj que se usa en NTP está basado en la observación anterior de que el intervalo de exactitud depende del retardo del roundtrip. El algoritmo acumula las muestras de la desviación/retardo (offset/delay) en una ventana de varias muestras y escoge la muestra de offset asociada con el mínimo retardo. En general, los tamaños más grandes

de ventana proporcionan mejores estimaciones; sin embargo, las consideraciones de la estabilidad limitan el tamaño de ventana a ocho muestras.

El mismo principio podría ser utilizado al escoger el mejor subconjunto de servidores y combinar sus desviaciones para determinar el ajuste de reloj. Sin embargo, diferentes servidores muestran a menudo desviaciones sistemáticas diferentes, de modo que la mejor estadística para la tendencia central de la población de servidores puede no ser obvia. Varias clases de algoritmos para grupos (clusters) han sido útiles para este propósito. Uno utilizado en NTP clasifica las desviaciones por una calidad métrica, se calcula la varianza de todos los servidores relativos a cada servidor separadamente. El algoritmo desecha repetidas veces el dato de **outlier** o resultante, con la variación más grande, mientras que dichos desechos no mejoren la variación residual o hasta que un número mínimo de servidores permanezca. El ajuste final del reloj es computado como una media ponderada de los servidores sobrevivientes.

El Algoritmo de Disciplina del reloj

Los relojes modernos de PCs utilizan un contador para generar interrupciones del procesador en intervalos del orden de pocos milisegundos. En cada interrupción el procesador incrementa el reloj del sistema de software con el número de microsegundos o nanosegundos. Este incremento es llamado **tick** o **jiffy**. La resolución del software del reloj del sistema es definida como el valor del tick. La mayoría de los procesadores modernos implementan contadores de hardware de alta resolución que pueden ser utilizados para interpolar entre ticks. La resolución del hardware del reloj del sistema es definida como el tiempo entre los incrementos de este contador. Sin embargo, la latencia verdadera de la lectura debida a la interfase kernel y al código de interpolación puede variar de unas pocas decenas de microsegundos en procesadores más viejos a menos de un microsegundo en procesadores modernos.

En el corazón del protocolo de sincronización está el algoritmo usado para fijar el reloj del sistema de acuerdo con el ajuste final, determinado por los datos que arreglan los algoritmos, llamados **data grooming**, que se conoce como el **algoritmo de disciplina del reloj** o simplemente “**la disciplina**”.

Los algoritmos se clasifican según: si minimizan la desviación de tiempo o de frecuencia o las dos. Por ejemplo la disciplina en **DTSS minimiza sólo la desviación de tiempo**, y en **NTP minimiza las desviaciones de tiempo y de frecuencia**. Mientras DTSS no puede quitar los errores residuales debido a errores sistemáticos de frecuencia, el NTP es más es severo y perdona menos los errores de diseño e implementación.

Todas las disciplinas de reloj funcionan como lazo de realimentación, con desviaciones medidas para ajustar la fase y la frecuencia del oscilador del reloj y para emparejarse con la fuente externa de sincronización. La conducta de los lazos de realimentación es bien entendida y modelada mediante análisis matemático. El parámetro significativo del diseño es la constante de tiempo, o la capacidad de respuesta a variaciones externas o internas en el tiempo o la frecuencia. La selección óptima de la constante de tiempo depende del intervalo entre los mensajes de actualización (update). En general, los intervalos más largos dan una mayor constante de tiempo y viceversa. En la práctica, y con configuraciones típicas de red, los intervalos óptimos del sondeo (polling) varían entre uno y veinte minutos para rutas de red hasta varios miles de minutos para rutas de módem.

ANEXO 2

AAL

ATM Adaptation Layer

AAL: ATM Adaptation Layer (AAL0, AAL2, AAL3/4, AAL5)

The ATM Adaptation Layer (AAL) relays ATM cells between ATM Layer and higher layer. When relaying information received from the higher layers, it segments the data into ATM cells. When relaying information received from the ATM Layer, it must reassemble the payloads into a format the higher layers can understand. This operation, which is called Segmentation and Reassembly (SAR), is the main task of AAL. Different AALs were defined in supporting different traffic or service expected to be used. The service classes and the corresponding types of AALs were as follows:

Class A - Constant Bit Rate (CBR) service: AAL1 supports a connection-oriented service in which the bit rate is constant. Examples of this service include 64 Kbit/sec voice, fixed-rate uncompressed video and leased lines for private data networks.

Class B - Variable Bit Rate (VBR) service: AAL2 supports a connection-oriented service in which the bit rate is variable but requires a bounded delay for delivery. Examples of this service include compressed packetized voice or video. The requirement on bounded delay for delivery is necessary for the receiver to reconstruct the original uncompressed voice or video.

Class C - Connection-oriented data service: For connection-oriented file transfer and in general, data network applications where a connection is set up before data is transferred, this type of service has variable bit rate and does not require bounded delay for delivery. Two AAL protocols were defined to support this service class, and have been merged into a single type, called AAL3/4. But with its high complexity, the AAL5 protocol is often used to support this class of service.

Class D - Connectionless data service: Examples of this service include datagram traffic and in general, data network applications where no connection is set up before data is transferred. Either AAL3/4 or AAL5 can be used to support this class of service.

Operation Administration and Maintenance (OA&M) - OA&M is defined for supervision, testing, and performance monitoring. It uses loop-back for maintenance and ITU TS standard CMIP, with organization into 5 hierarchical levels: Virtual Channel (F5 - Between VC endpoints), Virtual Path (F4- Between VP endpoints), Transmission Path (F3- Between elements that perform assembling, disassembling of payload, header, or control), Digital Section (F2 Between section end-points, performs frame synchronization) and Regenerator Section (F1- Between regeneration sections).

Protocol Structure - AAL: ATM Adaptation Layer (AAL0, AAL2, AAL3/4, AAL5)

AAL0 PDU:

AAL0 payload consists of 48 bytes without special field, is also referred to as raw cells.

AAL1 PDU:

1	3 bits	3 bits	1	47 Bytes
SN		SNP		SAR
CSI	SC	CRC	P	Payload

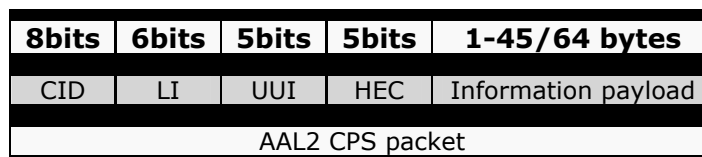
- **SN**- Sequence number. Numbers the stream of SAR PDUs of a CPCS PDU (modulo 16).
- **CSI**- Convergence sublayer indicator. Used for residual time stamp for clocking.
- **SC**- Sequence court.
- **NP**- Sequence number protection.
- **CRC**- Cyclic redundancy check calculated over the SAR header.
- **P**- Parity calculated over the CRC.

- **SAR PDU payload**- 47-byte user information field.

AAL2 PDU: AAL2 is perfect for low-rate voice traffic, with compression, silent and idle channel suppression. AAL type 2 is subdivided into the Common Part Sublayer (CPS) and the Service Specific Convergence Sublayer (SSCS).

AAL2 CPS Packet

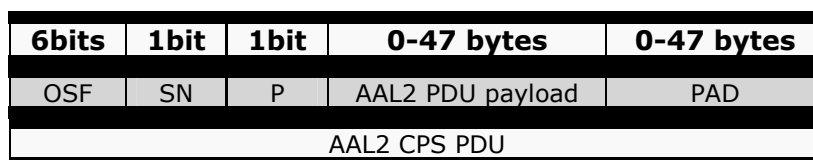
The CPS packet consists of a 3 octet header followed by a payload. The structure of the AAL2 CPS packet is shown in the following illustration.



- **CID**- Channel identification.
- **LI**- Length indicator: the length of the packet payload associated with each individual user. Value is one less than the packet payload and has a default value of 45 bytes (may be set to 64 bytes).
- **UII**- User-to-user indication. Provides a link between the CPS and an appropriate SSCS that satisfies the higher layer application.
- **HEC**- Header error control.
- **Information payload**- Contains the CPS/SSCS PDU.

AAL2 CPS PDU

The structure of the AAL2 CPS PDU is shown as follows:



- **OSF** - Offset field. Identifies the location of the start of the next CPS packet within the CPS-PDU.
- **SN** - Sequence number. Protects data integrity.
- **P** - Parity. Protects the start field from errors.
- **SAR PDU payload** - Information field of the SAR PDU.
- **PAD** - Padding.

AAL2 SSCS Packet

The SSCS conveys narrowband calls consisting of voice, voiceband data or circuit mode data. SSCS packets are transported as CPS packets over AAL2 connections. The CPS packet contains a SSCS payload. There are 3 SSCS packet types: Type 1 Unprotected; this is used by default; Type 2 Partially protected; and Type 3 Fully protected: the entire payload is protected by a 10-bit CRC which is computed as for OAM cells. The remaining 2 bits of the 2-octet trailer consist of the message type field.

AAL2 SSCS Type 3 Packets:

The AAL2 type 3 packets are used for Dialed digits; Channel associated signalling bits, Facsimile demodulated control data, Alarms and User state control operations. The general structure of AAL2 SSCS Type 3 PDUs is shown as follows. The format varies according to the actual message type.

2bits	14bits	16bits	6bits	10bits
Redundancy	Time stamp	Message dependant information	Message type	CRC-10
AAL2 SSSCS Type 3 PDU - General Structure				

- Redundancy - Packets are sent 3 times to ensure error correction. The value in this field signifies the transmission number.
- Time stamp - Counters packet delay variation and allows a receiver to accurately reproduce the relative timing of successive events separated by a short interval.
- Message dependant information
Packet content that varies, depending on the message type.
- Message type - The message type code.
- CRC-10 - The 10-bit CRC.

AAL3/4 PDU:

2	4	10 bits	44 Bytes	6 bits	10 bits
ST	SN	MID	PDU Payload	LI	CRC

- **ST** -Segment Type: BOM (Begin of Message), COM (Continuation of Message), EOM (End of Message), SSM (Single Segment Message).
- **SN** -Sequence number. Numbers the stream of SAR PDUs of a CPCS PDU (modulo 16).
- **MID** - Multiplexing Indication
- **PDU payload** -44-byte user information field.
- **LI** -Length indicator.
- **CRC** -Cyclic redundancy check calculated over the SAR header.

AAL3/4 CS PDU:

1	1	2 bits	40 Bytes	1	1	2 bits
CPI	BTag	BAsize	PDU Payload + PAD	AL	ETag	LEN

- **CPI** - Common Part Indication
- **BTag** -Beginning Tag
- **BAsize** -Buffer Allocation Size
- **PDU payload** -Variable length user information field up to 40 Bytes
- **PAD** -Padding (up to 3 bytes) used to cell align the trailer.
- **AL** -Alignment. A filling byte coded with zero
- **ETag** -End Tag.
- **LEN** -Length of Information Field

AAL5 CS PDU:

0-48 Bytes	0-47	1	1	2	4 Bytes
PDU payload	PAD	UU	CPI	LI	CRC-32

AAL5 is the simple and efficient AAL (SEAL) which is the one used most for data traffic; it has no per-cell length nor per-cell CRC fields.

- **PDU payload** -Variable length user information field
- **PAD** -Padding used to cell align the trailer which may be between 0 and 47 bytes long.
- **UU** -CPCS user-to-user indication to transfer one byte of user information
- **CPI** - Common Part Indication
- **LI** -Length indicator.

For OA&M cells, there are pre-defined (reserved) VPI/VCI numbers:

- 0/0 Unassigned or Idle
- 0/1 Meta-signaling
- 0/3 Segment F4 Flow
- 0/4 End-to-end F4 flow
- 0/5 Signaling 0/15 SMDS
- 0/16 Interim Layer Management Interface (ILMI)

F4/F5 OA&M PDU format:

4 bits	4 bits	45 Bytes	6 bits	10 bits
OAM Type	Function Type	Function Spec	Reserve	CRC-10

- OAM type / Function type- The possible values for OAM type and function type are defined for Fault, Performance, Activation/Deactivation
- CRC-10 -Cyclic redundancy check calculated over the SAR header. $G(x) = x^{10} + x^9 + x^5 + x^4 + x + 1$

Related Protocols

SONET , ATM , LAN Emulation , PNNI , MPOA , Q.2931

Sponsor Source

ATM Adaptation Layers are defined by ITU in document I.366.2.Reference

<http://www.atmforum.com/standards/approved.html>: ATM Forum approved specifications

http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito_doc/atm.htm : ATM Overview

ANEXO 3

General GPS Antenna Information

General GPS Antenna Information

Global Positioning System and Precise Time & Frequency

The Global Positioning System (GPS) is a worldwide radio-navigation system formed from a constellation of 24 satellites that continuously orbit the earth. Each GPS satellite has on board several atomic clocks that are precisely synchronized to Universal Time Coordinated (UTC) provided by the U.S. Naval Observatory (USNO). Coded signals are broadcast by each of the satellites with the exact time and position of the satellite. All GPS receivers use an antenna to receive these signals. By using a GPS receiver optimized for time and not position it is possible to get extremely precise time synchronization with the satellite's atomic clocks.

GPS Antennas and Cables

The signals from the GPS satellites operate in the "semi-visible" spectrum of the L1 band (1575.42 MHz) with a minimum signal level of -162.0 dBW. With this very low signal strength the GPS antenna must be able to "see" the sky to acquire the signals. Practically speaking the antenna must have a clear view of the sky and thus be mounted on a roof, or in some cases in a window. The antennas are relatively small, coffee cup size or smaller, and are connected to the GPS receiver typically via coaxial cable.

Since the GPS signal is very weak the antenna usually amplifies the signal to drive it through the cable to the receiver. Antenna cable however offers some resistance and the GPS signal strength will attenuate as it travels down the cable. GPS receiver sensitivity is finite so if the cable length is too

long the signal will be too weak for the receiver to detect it. Consequently it is very important to know the distance in advance between the antenna and the receiver so that the proper cable solution can be installed.

Antenna Types

There are two basic antenna types used with GPS timing receivers; roof mounted and window mounted. The roof mounted antenna is required for the more accurate GPS clocks since at least three satellites are required to be in view at all times to maintain timing accuracy, typically nanoseconds to UTC. The window mounted antenna is applicable for the network time servers which operate with a lesser degree of accuracy, typically microseconds or in some cases low milliseconds to UTC, and can function with as few as one intermittent satellite in view. The roof mounted antenna is always preferable since by nature of its location has the best view of the sky. A variation on the roof antenna is the GPS Down/Up converter used for very long cable runs. This is a special GPS antenna that receives the GPS signal and down converts it to a lower frequency that is then sent down the cable. Next to the GPS receiver is an up converter that converts the signal back to the original frequency and delivers it to the GPS receiver. This process is transparent to the GPS receiver.

Antenna Placement and Mounting

Roof Antenna Placement: When selecting a site for the roof antenna, find an outdoor location that provides full 360-degree visibility of the horizon. In most cases, this means locating the antenna as high as possible, such as on the roof. Any obstructions may degrade unit performance by blocking the satellite signals. Blocked signals can increase the time for satellite acquisition, or prevent acquisition altogether.

A short mounting mast and hose clamps are provided with the roof antenna to mount the antenna to a pole or the peak of a building. The antenna mounting mast and clamps are well suited to attach the antenna to a vent pipe or mast affixed to the roof. The pipe must be rigid and able to withstand high winds without flexing (see Figure 1).

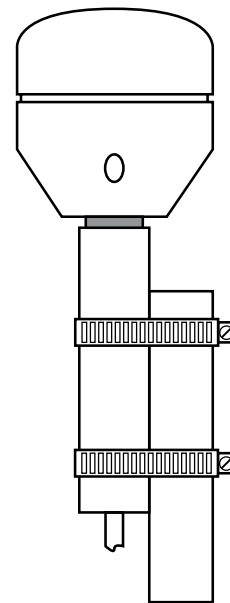


FIG.1 Typical roof antenna mounting

GPS Receivers can be susceptible to reflected GPS signals called multipath. Multipath interference is caused by reflected signals that arrive at the antenna out of phase with the direct signal. This interference is most pronounced at low elevation angles from 10 to 20 degrees above the horizon. The height of the mast/antenna may be extended upward to prevent multipath interference. The antenna should also be at least three to six feet (1-2 m) from a reflecting surface.

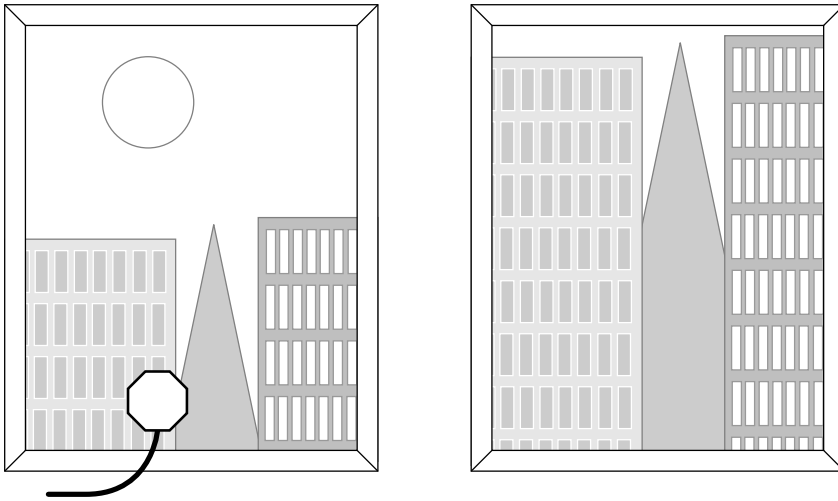


FIG.2 Antenna is in the preferred window

Attach the antenna above the window sill versus at the top of the window. This will improve the upward visibility from the antenna to the sky. Note that some window glazing treatments may reduce or block the GPS signals, preventing the time server from acquiring the time.

Antenna Cable Configurations/Options

Antenna cabling solutions typically vary depending on how far the antenna is installed from the GPS receiver. 150 feet (45 m) is the unaided cable length limit for many GPS timing receivers. Adding a GPS inline amplifier extends the cable length an additional 150 feet (45 m). Beyond 300 feet (90 m) alternative methods may be used. Figure 3 highlights the cable lengths and the antenna solutions that enable them.

Window Antenna Placement: The window mount antenna is suitable for use only with the network time server products with appropriate versions of firmware. For window mounted antenna installations it is best to use a window with the best view of the sky. For windows with equivalent views, orientations that face the equator are preferred. Generally more satellites will be in view toward the equator than away from it, east or west facing windows will also work. Polar facing windows will also work but in general are not preferred. Windows that have the best view of the sky are always preferred regardless of orientation (see Figure 2).

In-line Amplifier: In-line amplifiers overcome signal attenuation in by amplifying the GPS signal, adding an additional 150 feet (45 m) in cablelength. The inline amplifier attaches directly in line with the antenna cable and uses the same power as the antenna; no extra wiring is required. Mounting the amplifier inside the mounting mast helps protect it from moisture and exposure to the elements. See Figure 4 for a typical mast mount application.

GPS Down/Up converter: The GPS Down/Up converter makes cable runs of 250 to 1500 feet (75 m to 457 m) possible. GPS signal down

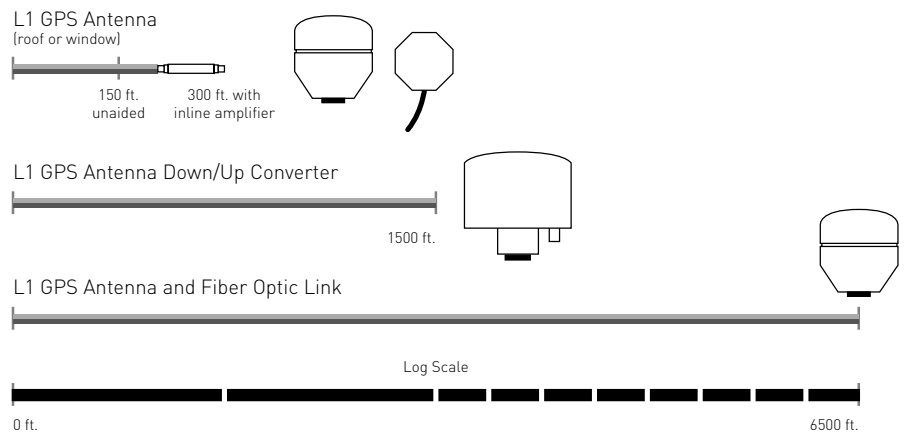


FIG.3 Cable lengths and antenna solutions

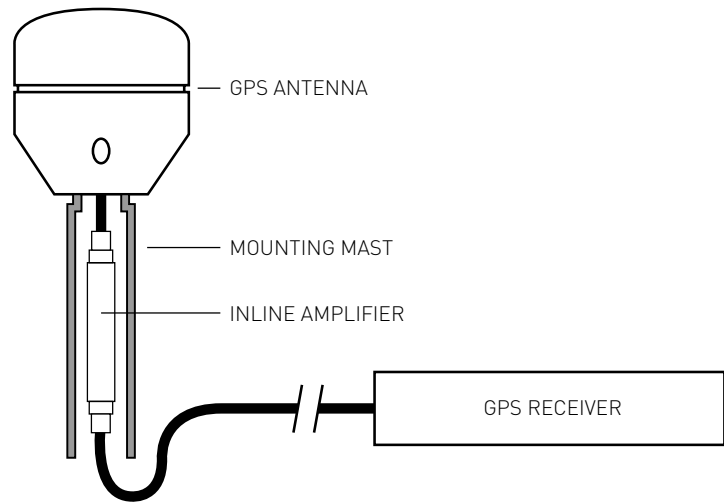


FIG.4 Typical mast mount of in-line amplifier

conversion requires a special GPS antenna and corresponding signal up-converter. The antenna module converts the signal down to a lower frequency that is less susceptible to attenuation, and transmits it the length of the cable to the up-converter. The up-converter restores the signal to the normal GPS signal frequency for the receiver (see Figure 5). The down/up conversion process is transparent to the GPS receiver. As with any precision GPS timing receiver, only cable delay and down conversion delays need to be entered into the receiver. Power is supplied by the GPS receiver. In the case of Bus level GPS receivers an external power supply is used. It is important to note that the cable used in GPS down/up conversion is different than the standard cable.

Fiber Optic Links: Fiber-optic connections function as a transparent link between the antenna and GPS receiver equipment. These links eliminate the limitations of copper systems by enabling longer transmission distances while retaining the highest level of signal quality. In addition, fiber optics provide several other significant network advantages, including simplified network design, ease of installation, and immunity from EMI/RFI and lightning (see Figure 6).

Lightning Arrestor: In-line lightning arrestors are mounted on a low impedance ground between the antenna and the point where the cable enters the building. They require no additional power or wiring except the ground lead.

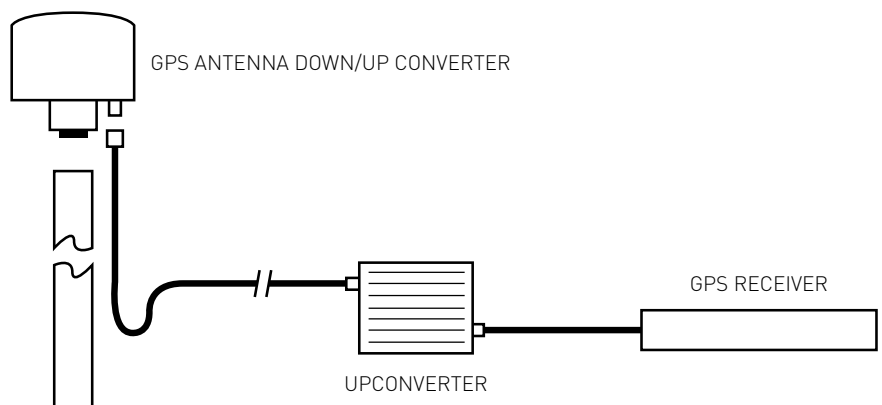


FIG.5 GPS down/up converter

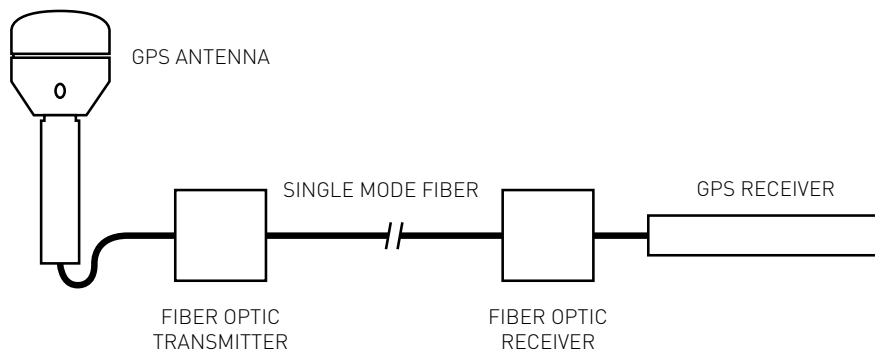


FIG. 6 Fiber optic connections

Cable Delay

GPS position as well as precise UTC time is determined at the point the GPS signals are received at the antenna. Since the antenna is typically attached to the GPS timing receiver via a cable, signal propagation delays through the cable cause the time calculated by the receiver to be slightly behind UTC. In GPS clocks with nanosecond and microsecond accuracies this is a critical factor. In products such as network time servers cable delay is not important because time transfer over IP networks degrades the time to the millisecond level.

Cable delay is a function of the cable type. RG-59 cable for example typically delays the signal 1.24 ns/ft. For 50 feet of cable (15 m) the delay would be 62 nanoseconds. Cable delay is removed by advancing the antenna signal inside the GPS receiver. In this example, advancing the signal +62 nanoseconds removes all cable latency. Solutions such as the GPS Down/up converter also introduce signal latency but this latency can also be removed by adjusting the signal. All precision GPS timing receivers with nanosecond or microsecond timing accuracy have the ability to compensate for cable delay.

Advanced Planning

It is time well spent to estimate in advance the cable length from the GPS antenna to the receiver for any planned installation. Cable lengths that are too short or too long can each introduce problems. In some cases adding an inline amplifier and some extra cable may be a quick and economical solution. In other instances retrofitting for a GPS down/up converter may be necessary which will require installing a different cable type. Keep in mind that some extra cable coiled in a ceiling leftover from over estimating the cable length is not necessarily negative. Provided you know the length of the total cable, the cable delay can be accounted for and the timing accuracy maintained.

ANEXO 4

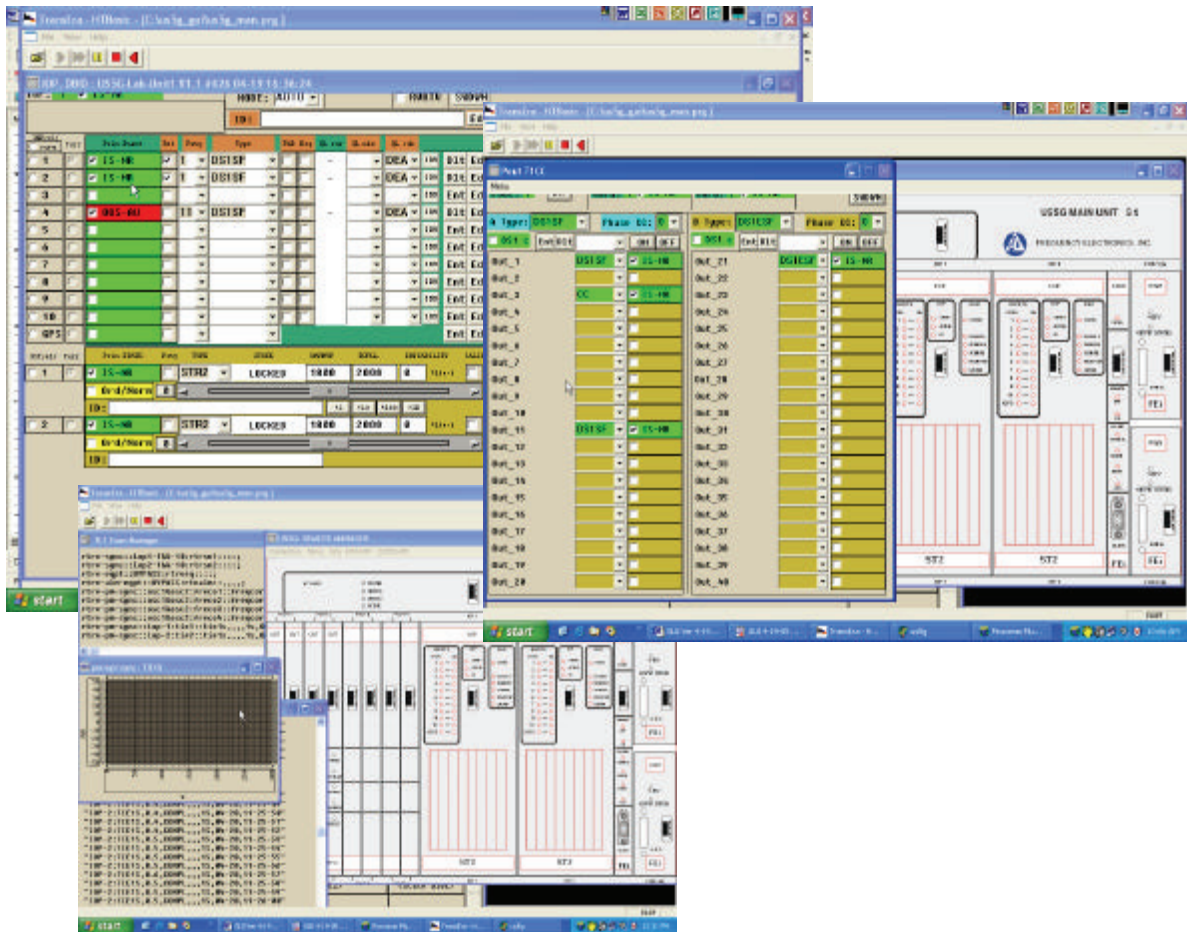
Datasheet de una SSU US5Ge de Gillam-FEi

US5Ge

Synchronization Supply Unit



US5Ge Overview
Doc. Ref. : 4372/DL-JMEbf/UK Rev. 1



GILLAM-FEI S.A.
Frequency, Electronics & Telecommunication

Mont Saint-Martin 58
4000 LIEGE - BELGIUM
Tel.: (+32) 4 232 95 95 - Fax: (+32) 4 223 42 76
www.gillam-fei.be info@gillam-fei.be

INTRODUCTION

Founded in 1974, GILLAM-FEI is highly experienced in designing, manufacturing, implementing and marketing high quality products for the area TELECOM NETWORKS SYNCHRONIZATION.

GILLAM-FEI can provide Telecoms operators with the right turnkey solution for the synchronization of their networks. These solutions are designed to fully satisfy operators and are suitable for all network levels.

GILLAM-FEI's references in this field are so many proves of quality and reliability of its products: several major Telecom operators are already satisfied with our products, both in wireless & wireline networks.



US5Ge is the latest state of the art Synchronisation Supply Unit (SSU/BITS), with all sub-assemblies, as well as local and remote interfaces fully redundant, designed to comply with ITU-T G.811 / GR 2830 and ITU-T G.812 / GR 378 and GR1244.

It is designed to function as a Synchronisation Supply Unit (SSU) / Building Integrated Timing Supply (BITS) for common clock distribution to all Network Elements (NE's) requiring external timing for synchronization.

Dual Modular Architecture for All Hardware System Elements

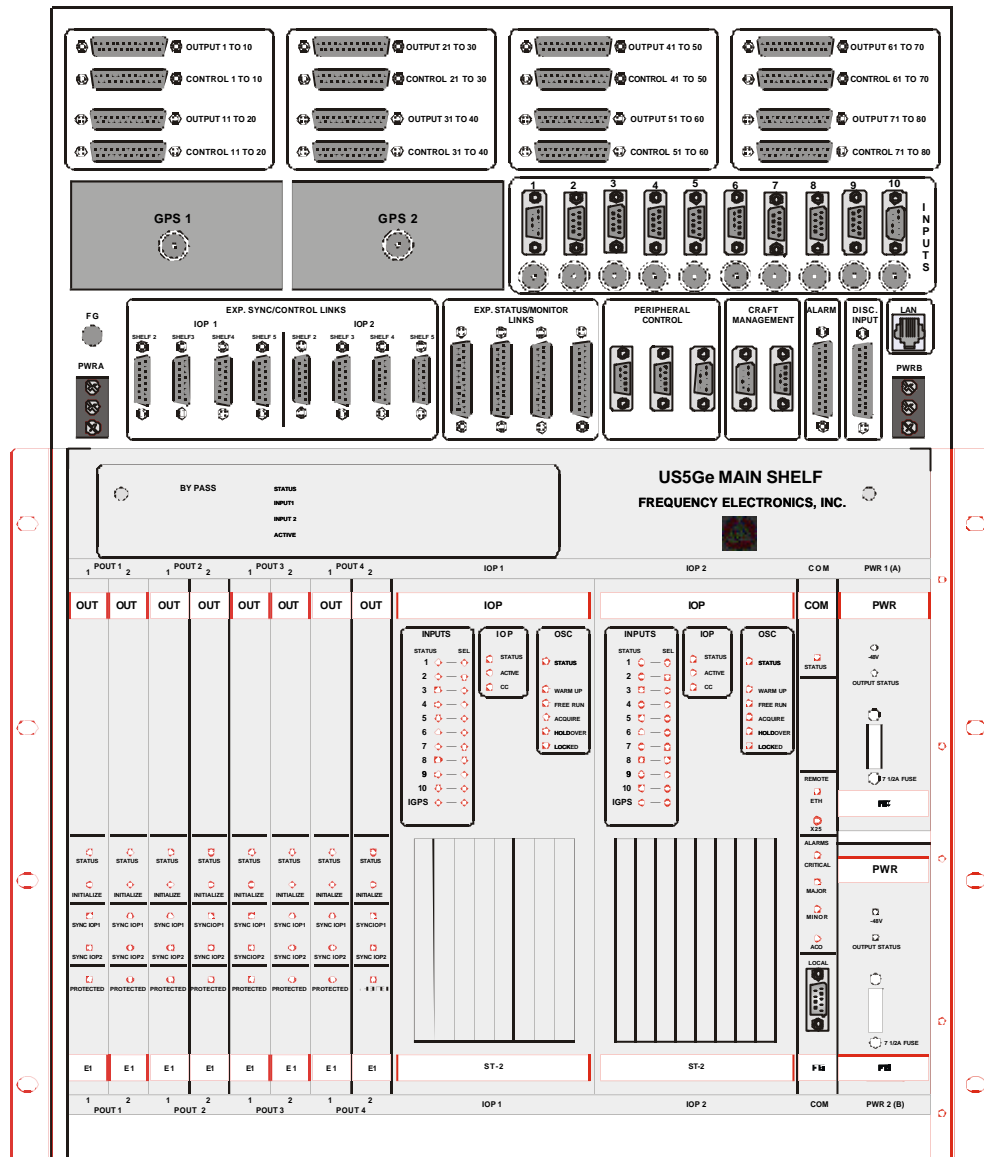
- Dual Power Inputs and Power Supply Modules,
- Multiple Reference/Monitor Inputs—Up to 10 per IOP Clock module,
- Each Input is bridged to both IOP clock modules,
- Dual On-Board GPS Reference Receivers (optional),
- Dual GPS Antenna Inputs,
- Redundant clocks (G812 type I, II or III),
- Output module with 1+1 redundant mode,
- Redundant alarmed umbilicals to each expansion shelf — no “daisy chaining” of expansion shelves,
- Multiple Alarm Surveillance Methodologies,
 - Visual and audible
 - Alarm Contact Closure — Local and Remote
 - GUI with TL-1 Autonomous Messaging and/or via Remote Network Connections (Ethernet, etc.)

Main US5Ge shelf delivers, depending on the output card type: 160 1+1 protected outputs, 80 1+1 protected outputs, 80 1+1 protected outputs and 80 monitor inputs.

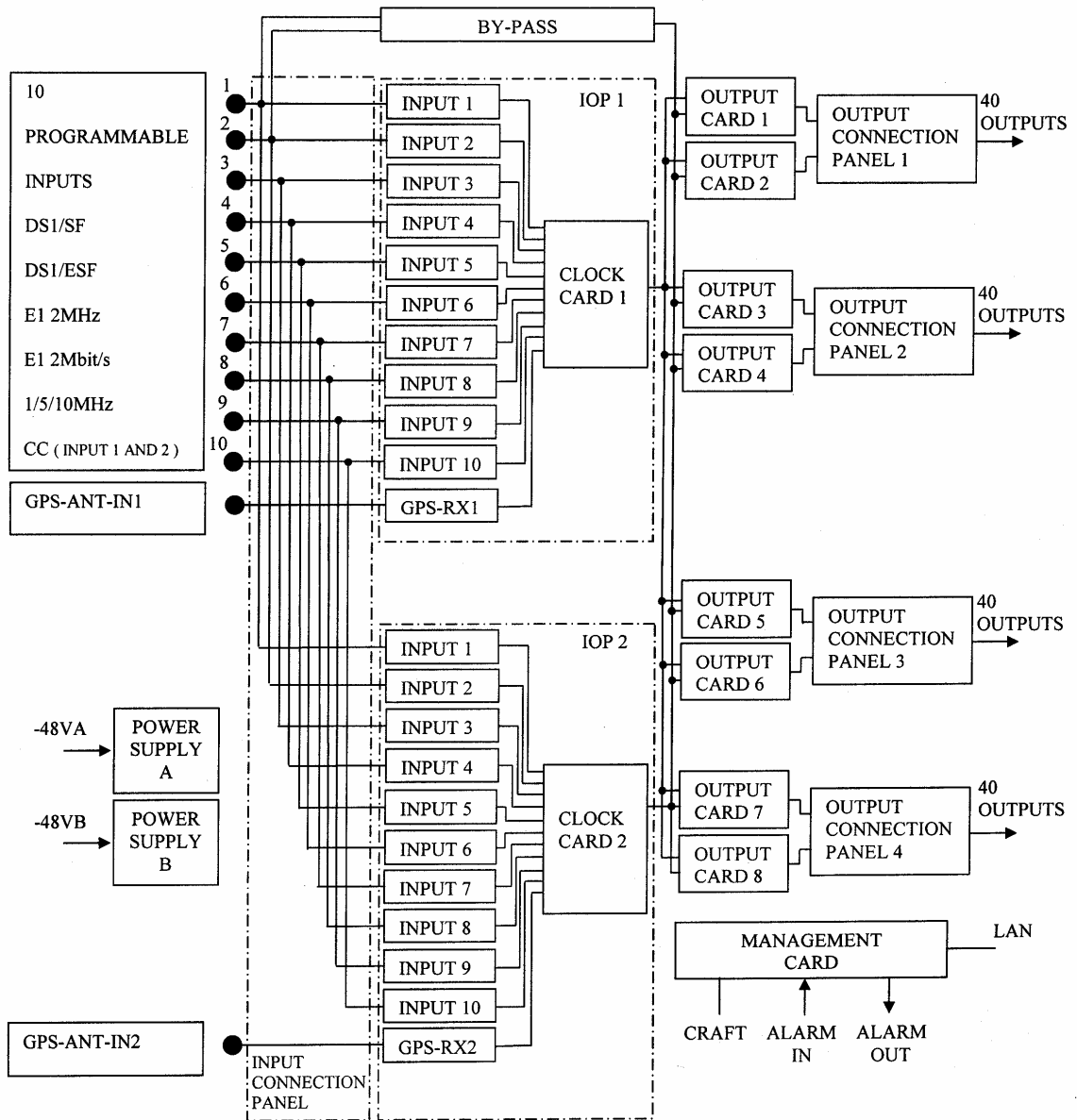
With expandability to 4 additional shelves the US5G provides an astounding 1440 protected timing outputs at full capacity.

The US5Ge can optionally be supplied with independent integrated GPS reference receivers to provide a Primary Reference Clock (PRC) capability, in conformity with the ITU-T G.811, ETS 300 462-6, ANSI T1.101 and Telcordia GR-2830/1244-CORE recommendations.

As GPS inputs are bridged internally on each clock module, the 10 bridged input ports capacity is maintained.



US5Ge BLOCK DIAGRAM



We will notice on this block diagram two IOP clock modules and also the Bypass.

Input modules

All input functions operate in the IOP modules and both have access to the same reference signal. The US5Ge bridges each input to both IOP modules and there are 10 inputs available. On each IOP clock module, there is a pluggable module for each input. For example, if the user requests only three inputs, he/she must only install 6 input modules: three modules on the IOP1 and three others on the IOP2. This is a cost effective solution. All inputs could be used equally as reference and monitor.

GPS receiver

Dual or single GPS receiver configuration.

For short antenna cable length, the antenna is directly connected to the GPS receiver without down converter.

At the opposite an antenna with down converter is used. The interface between US5Ge and the Antenna with down converter is then simpler and requires only cheap RG59 cable for a distance up to 350 meters without amplifier.

Clocks

If the US5Ge is used as Primary Reference Clock (PRC) and therefore supplied with GPS reference receivers to provide a capability in conformity with the G811 / GR2820 recommendations, the best performances in holdover mode will be maintained with Rubidium oscillator.

If the US5Ge is only nodal clock, the user will choose oscillator type in function of the network. Indeed, for E1 network the clock must be G812 type I, therefore high performance oscillator quartz will be selected.

On the other hand for T1 network, it is necessary to distinguish:

- if the clock is "MASTER TSG", it must be G812 type II (Stratum 2), and Rubidium will be chosen.
- if the clock is "SLAVE TSG", it must be G812 type III (Stratum 3E) and in this case quartz oscillator will be chosen.

1 + 1 Protected output card

As draw in the block diagram, in the protected mode the connection panel output adaptor panel combines the outputs of the paired modules. The output port in normal operation has a signal presence supplied simultaneously from each of the paired modules. If there is a hardware fault on one of the modules, the unaffected module maintains a consistent signal level to the NE. The same process occurs when one port fails or the entire module is removed, therefore there isn't any phase jump perturbation.

If the output impedance requested is 120Ω , the interface is directly implemented on the US5Ge DB25 connectors. For 75Ω or other type of connectors patch panel interface will be used.

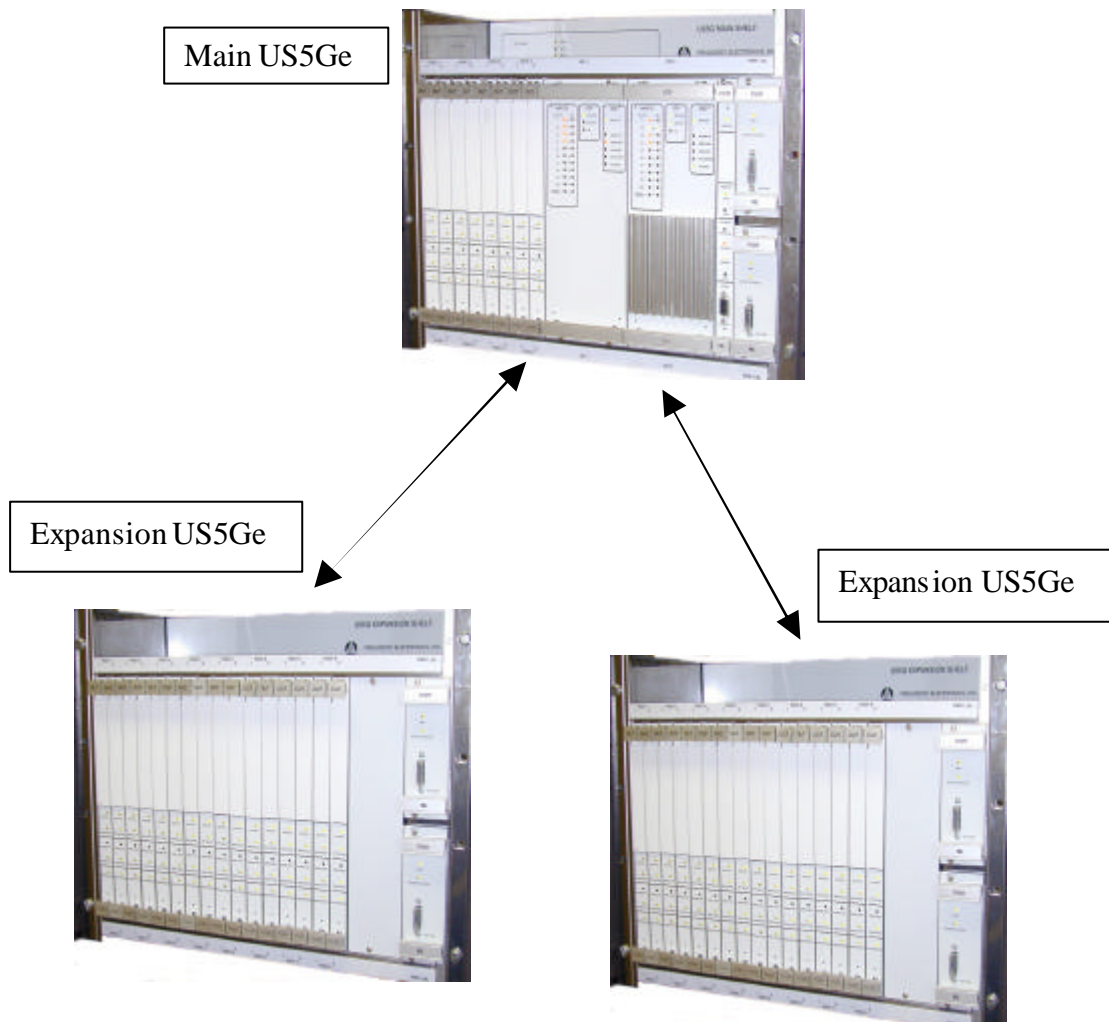
Bypass

The optional Clock BYPASS Module provides survivability in the event both IOP modules fail or are simultaneously removed. In this case the input signal clock selection is directly bridged to the output cards.

US5Ge expansion shelves

Connecting the US5Ge expansion shelf to the main shelf requires the installation of three (3) shelf interconnecting cables of 10m length.

Each expansion shelf can contain up to 16 output cards.
1440 protected timing outputs at full capacity.



SPECIFICATIONS

US5Ge modules

- Power modules
 - Equal Load sharing
 - Redundancy for automatic load management
 - Fuse with front access on each module
 - Voltage : - 36 à - 72 VDC
 - Current : 6A maximum

- Communications module (COM)
 - Primary system CPU which runs the operating system software for external communications
 - System active database for communications
 - Provisioning database for reference inputs and all signal outputs
 - Security database with all user accounts and passwords
 - Manages the backup of all system databases to duplicate storage locations on the IOP modules
 - Manages the verification of Hardware and Software revision level compatibility of all modules upon initial insertion
 - Manages software downloads as needed to each module of revision levels compatible with the current operating system
 - Transaction Language 1 (TL1) interpreter
 - Controls the activation of relays that transmit Critical, Major and Minor alarms to network alarm collection devices
 - Local and remote interfaces management.

- Input/Oscillator/Processor (IOP)
 - Clock modules with several oscillator types :

Holdover G812 type I (or STRATUM 2)	:	2 10 ⁻¹² /day at constant t°
G812 type II (ITU-T E1)	:	1 10 ⁻¹⁰ /day at constant t°
G812 type III (or STRATUM 3E)	:	2 10 ⁻¹⁰ /day at constant t°

 - Input module

All input functions operate in the IOP modules and both have access to the same reference signal. The US5Ge bridges each input to both IOP modules for redundancy purpose.

Each IOP module could be equipped from 0 up to 10 input sub modules.

The US5Ge can be equipped with 10 redundant input ports. Each input port is independently software configurable for standard signal frequencies as follows:

 - DS-1 1.544MBit/s, Framing selectable - SF or ESF,
 - E-1 2.048MBit/s (ITU-T G.703, G.704 : CRC-4, CAS16),
 - 2.048 MHz (ITU-T G.703 § 13),
 - Composite Clock,
 - 1/5/10 MHz.

- GPS receiver module (optional)
 - Active Antenna with or without down converter (-35 to + 80°C)
 - Up to 350m RG59 antenna cable with Antenna with down converter
 - Cable attenuation without down converter: 10 dB
- Backup database through redundant COM module and survivability with duplicate database maintains in Flash memory on both IOP 1 and IOP 2
- Output modules

Output modules are built to be plugged in the eight first slots of the Main US5Ge shelf, from the left to the right on the US5Ge front panel.

Three different output modules could be implemented:

1. module with 40 output ports: this module allows a maximum capacity of 160 ports in 1+1 redundant mode.
2. module with 20 output ports: this module allows a maximum capacity of 80 ports in 1+1 redundant mode.
3. module with 20 output ports and 20 monitor input ports: this module allows a maximum capacity of 80 ports in 1+1 redundant mode and 80 monitor input ports.

Expandability up to 4 additional US5Ge shelves. Each expansion shelf can contain up to 16 output cards.

Each output port is independently software configurable for standard signal frequencies as follows:

- For T1 module:
 - DS-1 1.544MBit/s, Framing selectable - SF or ESF and Composite Clock (CC)
- For E1 module:
 - E-1 2.048MBit/s (ITU-T G.703, G.704 : CRC-4, CAS16) and 2.048 MHz (ITU-T G.703 § 13)
- Bypass module
 - Bypass functionality allows to directly bridge the input signal clock 1 and 2 to the output cards, when IOP modules fail or are simultaneously removed. At power on, the Bypass module is automatically configured and detects automatically the reference clock available and selectable on the input 1 and 2.

Performance Monitoring

Each input is continuously monitored for frequency accuracy and stability. Performance Monitoring (PM) data is collected for:

- Fractional Frequency Offset—FFOFF,
- Time Interval Error—TIE,
- Maximum Time Interval Error—MTIE,
- Time Deviation—TDEV, and
- Latest Maximum Relative Time Interval Error—LMRTIE

This data is collected for multiple time periods from 3 seconds to 100,000 seconds.

The user may software assign each input a priority number from 1 to 11.

Communication and management

Craft/Local Ports

3 EIA-232 (1 on the communication module)
Supports ASCII, TL1, SNMP

Remote Management

1 RJ-45 Ethernet, 10 Base-T, TCP/IP
DB-25 alarm connector – Critical, Major and Minor (NC/NO)
Remote/Audible/Local.

Software Interface

TL1 command line interface (GUI interface)
SNMP Element Management System
TL1 Management System

Physical/environmental

Operating Temp.	0° C to 50° C (GR63 compliant)
Humidity	5% to 95%
Dimensions	577 x 446 x 255 mm (without fixation kit)

7 BIBLIOGRAFÍA

- D. W. Allan, N. Ashby, C. C. Hodge. “The Science of Timekeeping”. Application Note 1289, Hewlett-Packard Company, Julio 1997.
- “Synchronizing Telecommunication Networks – Basic Concepts”. Application Note 1264-1, Hewlett-Packard Company, Abril 1995.
- “Synchronizing Telecommunication Networks – Synchronizing SDH/SONET”. Application Note 1264-2, Hewlett-Packard Company, Julio 1995.
- “Synchronizing Telecommunication Networks – Fundamentals of Synchronization Planning”. Application Note 1264-3, Hewlett-Packard Company, Julio 1995.
- “GPS and Precision Timing Applications”. Application Note 1272, Hewlett-Packard Company, Enero 1996.
- Bregni Stefano. “*Synchronization of Digital Telecommunication Networks*”. I edición, Editorial JOHN WILEY & SONS, 2002.
- “Synchronization Network Engineering”. EG 201 793 V1.1.1, ETSI, Octubre 2000.
- “Arquitectura de Redes de Transporte basadas en la Jerarquía Digital Síncrona”. Recomendación UIT-T G.803, Marzo 2000
- “Definiciones y Terminología para Redes de Sincronización”. Recomendación UIT-T G.810, Agosto 1996.
- “Principios para una Red de Gestión de las Telecomunicaciones”. Recomendación UIT-T M.3010, Febrero 2000.

HOJA DE LEGALIZACION

Erwin Antonio Barriga Pérez

C.I. 171312989-6

Ing. Gonzalo Olmedo
Coordinador de Carrera

Dr. Jorge Carvajal
Secretario Académico