



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

**UIT-T**

SECTOR DE NORMALIZACIÓN  
DE LAS TELECOMUNICACIONES  
DE LA UIT

**Serie G**

**Suplemento 35**  
(11/1988)

SERIE G: REDES DIGITALES, SECCIONES DIGITALES  
Y SISTEMAS DE LÍNEA DIGITALES

---

**Directrices relativas a la medición de la  
fluctuación lenta de fase**

Recomendaciones UIT-T de la serie G – Suplemento 35

Originalmente publicado en el Libro Azul (1988) - Fascículo III.5

---

## NOTAS

1 El Suplemento 35 a las Recomendaciones de la serie G se aprobó en Melbourne (1988) y se publicó en el fascículo III.5 del *Libro Azul*. Este fichero es un extracto del *Libro Azul*. Aunque la presentación y disposición del texto son ligeramente diferentes de la versión del *Libro Azul*, el contenido del fichero es idéntico a la citada versión y los derechos de autor siguen siendo los mismos (Véase a continuación).

2 Por razones de concisión, el término «Administración» se utiliza en el presente Suplemento para designar a una administración de telecomunicaciones y a una empresa de explotación reconocida.

© UIT 2004

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

### 3.3 Conclusión

La temperatura del contenedor subterráneo depende del clima del lugar, del tipo del suelo, de la profundidad, de la época del año y de la disipación energética de los equipos.

El análisis matemático de la transmisión de calor hace posible calcular la temperatura máxima del contenedor teniendo en cuenta el efecto de los parámetros que intervienen.

Se puede considerar la utilización del material seleccionado de relleno y evaluar los efectos resultantes.

#### TIPO DE CONTENEDOR: CAI/24

Temperatura en régimen permanente (°C)

Dimensiones del contenedor (m) Ø 0,85 altura 0,9

Energía disipada (vatios)	100
Mes	8
Temperatura media del lugar (°C)	12,7
Amplitud de la variación térmica (°C)	11,7
Conductividad del suelo ( $W m^{-1} K^{-1}$ )	0,44
Densidad del suelo ( $kg \cdot m^{-3}$ )	1550
Calor específico del suelo ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )	1255
Conductividad térmica del material de relleno ( $W m^{-1} K^{-1}$ )	0,8
Profundidad del material de relleno (m)	0,4
Radio exterior del material de relleno (m)	1,2

#### Referencia

- [1] JEN-HU-CHANG: Ground Temperature, *Blue Hill Meteorological Observatory, Harvard University*, Vol. I, II, Hilton 86, Massachusetts, 1958.

#### Bibliografía

- KREITH (F.): Principles of heat transfer, *Int. Textbook Co.*, Scranton Pen.  
CARLSLAW JAEGER: Conduction of heat in solids, *Oxford Press*.

### Suplemento N.º 35

#### DIRECTRICES RELATIVAS A LA MEDICIÓN DE LA FLUCTUACIÓN LENTA DE FASE

(Contribución de Estados Unidos de América, citada en las Recomendaciones G.812 y G.824)

#### Metodología de medición de la fluctuación lenta de fase

La finalidad de este suplemento es presentar un método adecuado de verificación de la precisión de temporización de los relojes. En el suplemento N.º 38 de la serie O figuran directrices sobre la medición de la fluctuación de fase.

#### 1 Medición de la fluctuación lenta de fase de salida

##### 1.1 Reloj subordinado

La estrategia de medición consiste en deducir los valores de los parámetros del modelo del anexo a la Recomendación G.812 para el reloj subordinado que se está probando.

Una vez que se han obtenido estos valores de los parámetros, puede verificarse el cumplimiento de las especificaciones de la Recomendación G.812.

Para caracterizar el comportamiento de un reloj subordinado debe realizarse una serie de pruebas. En general, estas pruebas corresponden a una de las tres categorías siguientes:

- 1) funcionamiento ideal;
- 2) funcionamiento forzado;
- 3) funcionamiento mantenido.

### 1.1.1 Configuración de prueba

El objetivo del procedimiento de prueba consiste en poder estimar los parámetros del modelo de reloj descrito anteriormente para un determinado reloj en prueba. En la figura 1 se muestra la arquitectura de un montaje de prueba de relojes. A continuación se describen los componentes y su interconexión.

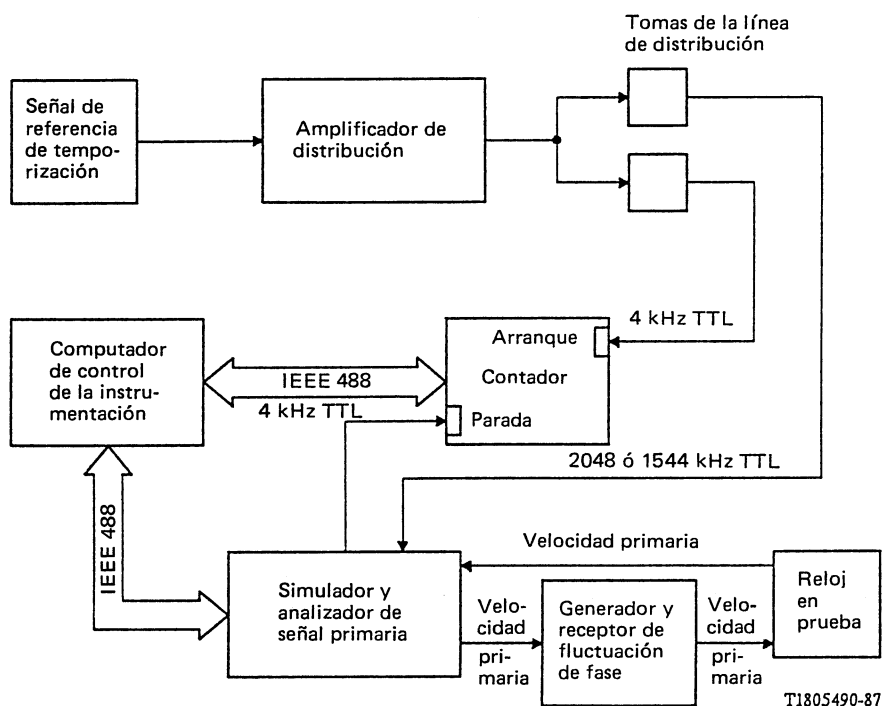


FIGURA 1  
Configuración de prueba

#### 1.1.1.1 Reloj de referencia

La configuración de prueba está pensada para proporcionar al reloj en prueba una referencia de tiempo digital a velocidad primaria obtenida a partir de un oscilador de referencia estable. En las pruebas de los relojes el punto crucial<sup>1)</sup> estriba en la fase y tiempo relativos comparados con la entrada de referencia. Así pues, la precisión absoluta de la entrada de referencia no resulta crucial. Es importante que la inestabilidad a corto plazo del oscilador de referencia sea pequeña para garantizar un ruido de medición bajo y un error de seguimiento de fondo en el bucle de control del reloj que se está probando.

<sup>1)</sup> En la prueba de funcionamiento mantenido, la estabilidad y deriva a más largo plazo del oscilador de referencia son importantes.

### 1.1.1.2 *Simulación de la referencia digital*

El montaje de prueba ha sido concebido para proporcionar una referencia digital a la velocidad primaria con una degradación que permite la prueba forzada del reloj. Para conseguir esta situación, se utiliza un simulador de señal digital a velocidad primaria que tiene la posibilidad de sincronizarse exteriormente. Para la señal<sup>2)</sup> digital a la velocidad primaria de 1544 kHz, se suministra al analizador/simulador una señal de tiempo a 1544 kHz para controlar la señal de temporización de salida. La señal de 1544 kHz se obtiene a través de un amplificador de distribución y una toma del sintetizador. Este montaje de distribución permite obtener múltiples tomas de señales de temporización a partir de la entrada de 10 MHz procedente del oscilador de referencia. Cada toma es un sintetizador especializado que entrega la señal de tiempo deseada. La fluctuación de fase producida por estos sintetizadores debe ser inferior a 1000 ps eficaces.

El simulador de degradaciones a la velocidad primaria se programa mediante el bus de control IEEE 488 para conseguir los fenómenos de interrupción deseados para forzar el reloj. La señal digital a la velocidad primaria se puentea a continuación a través de un generador de fluctuación de fase y un receptor. El generador de fluctuación de fase se utiliza para insertar la fluctuación de fondo a la señal digital. Es importante simular un nivel realista de la fluctuación de fase de fondo por varias razones. En primer lugar, cuando se producen interrupciones, la fluctuación de fase de fondo puede ser la fuente principal del error de fase producido, puesto que la unidad de sincronización intenta puentea la interrupción. En segundo lugar, pueden evaluarse las características de transferencia de la fluctuación de fase del reloj.

La unidad de generación de la fluctuación de fase está dotada de una entrada de modulación exterior de la fluctuación de fase. La señal de fluctuación de fase utilizada es ruido blanco de banda limitada. Se filtra una señal procedente de un generador de ruido blanco utilizando un filtro paso bajo de un solo polo con una frecuencia de corte a 3 dB igual a 150 Hz. La razón principal para un filtraje paso bajo radica en evitar que se produzcan errores en los bits debido a una fluctuación de fase en la alineación de alta frecuencia. La amplitud de la fluctuación de fase debe fijarse de forma que refleje unos niveles realista de fluctuación de fase en la red. Es importante evitar que la fluctuación de fase sinusoidal se utilice como señal de prueba de fluctuación de fase a la entrada, ya que ciertas técnicas de detección de fase son muy sensibles a la fluctuación de fase sinusoidal.

### 1.1.1.3 *Recuperación de la señal de temporización de salida*

Para comprobar un reloj, se proporciona una entrada de referencia procedente de la salida del generador de fluctuación de fase. Para recuperar la señal de temporización de salida del reloj, se selecciona una señal saliente a la velocidad primaria en la unidad controlada por el reloj que se está probando. Se conecta esta señal digital a la parte de recepción del simulador y analizador de velocidad primaria. En esta unidad la función de temporización del receptor está desacoplada de la señal de temporización de transmisión utilizada en el generador. El receptor extrae una señal de temporización de trama a 4 kHz de la señal de entrada y entrega esta señal de temporización en un puerto exterior. Esta señal de temporización de 4 kHz es coherente en fase con la temporización saliente del reloj que está probando.

### 1.1.1.4 *Recopilación de los datos de fase-tiempo*

Se utiliza un contador para observar el error de fase-tiempo de la señal de temporización de salida a 4 kHz comparada con una señal de temporización de referencia a 4 kHz. Esta última se obtiene de las unidades de amplificador de distribución y sintetizador. La fluctuación de fase del sintetizador cuando genera la señal de referencia a 4 kHz es inferior a 1000 ps. Al realizar la comparación de fase a 4 kHz el margen de observación de la variación de fase es 250  $\mu$ s. Si se tiene la precaución de iniciar una prueba cerca del punto medio de dicho margen, no deben producirse problemas asociados al deslizamiento de ciclos durante todas las pruebas a excepción de la prueba con funcionamiento sostenido. Sin embargo, incluso este margen puede ampliarse eliminando los deslizamientos de ciclos mediante el programa de recopilación de datos.

En realidad, la resolución de las mediciones está limitada por la fluctuación de fase intrínseca del contador así como el error de disparo. La experiencia ha mostrado que la fluctuación de fase de la resolución de las mediciones puede mantenerse por debajo de los 100 ps eficaces si se tiene un cuidado razonable con el cableado y los niveles de disparo. Lo que es más importante, puede verificarse el nivel de ruido global de la fluctuación de fase de fondo, antes de las pruebas, para garantizar el funcionamiento adecuado. Para los componentes utilizados en el sistema concreto que se describe, se pueden alcanzar típicamente, los niveles de fluctuación de fase global de 1000 ps eficaces. Este valor excede lo adecuado para medir los niveles de estabilidad de fase esperados en los relojes.

<sup>2)</sup> El siguiente análisis se aplica de la misma forma a la señal digital que a la velocidad primaria de 2048 kHz.

#### 1.1.1.5 *Recopilación de datos*

Debe utilizarse un computador de control de la instrumentación para automatizar el procedimiento de prueba y recoger y analizar los datos de fase-tiempo. El interfaz del computador de control tanto con el contador como con el simulador y analizador digital de velocidad primaria se realiza mediante el bus IEEE 488.

Una función clave del computador de control es la recogida de datos de fase-tiempo del contador. La unidad de control del instrumento obtiene una muestra de fase-tiempo del contador cada 10 segundos. El contador está programado para promediar 4000 muestras en una ventana de 3 segundos y devolver el valor medio a la unidad de control. La anchura de banda de medición resultante es de 0,33 Hz. Los datos de tiempo-fase se procesan en tiempo real para obtener estimaciones en funcionamiento de la varianza de Allan en intervalos de observación de 10, 100, 1000 y 10 000 segundos. El programa calcula igualmente una estimación en funcionamiento de la desviación y la deriva de frecuencia.

#### 1.1.1.6 *Análisis de datos*

El objetivo del análisis de los datos es calcular a partir de los datos, los parámetros asociados con el modelo del reloj. A partir de los datos de la varianza de Allan, se puede determinar la presencia de las MP de ruido blanco y MF de ruido blanco esperadas según el modelo. El estimador de la desviación de frecuencia es el término  $y_{\text{bias}}$  del modelo y el estimador de deriva D es la componente de deriva del modelo.

#### 1.1.2 *Técnica y procedimiento básicos*

Este punto incluye las técnicas y procedimientos básicos para probar las tres categorías de funcionamiento de un reloj subordinado. El apéndice I proporciona algunos ejemplos de aplicación de estas pruebas utilizando datos reales de medición.

##### 1.1.2.1 *Funcionamiento ideal*

El objetivo de esta prueba consiste en obtener una métrica de referencia del comportamiento de un reloj. El modelo predice que los relojes en condiciones ideales deben producir una inestabilidad de fase del tipo MFase con ruido blanco. Esta MFase con ruido blanco debe ser pequeña ya que representa el comportamiento en el caso más favorable de un reloj [claramente menos de 1  $\mu\text{s}$  según los requisitos actuales de salida de máximo error relativo en el intervalo de tiempo (MERIT)]. Debe medirse en presencia de niveles realistas de la fluctuación de fase para garantizar una transferencia aceptable de la fluctuación de fase.

En el procedimiento de prueba normalizado que se ha descrito, la anchura de banda de las mediciones es de 0,33 Hz. En algunos diseños de reloj existe un ruido significativo entre esta frecuencia de corte de 0,33 Hz y la frecuencia de corte de 10 Hz asociada con la fluctuación de fase. Es importante evaluar la fluctuación de fase en dicha banda. Esto podría realizarse desarrollando un programa de medición adicional para capturar estos datos rápidos de la fluctuación de fase lenta.

##### 1.1.2.2 *Funcionamiento forzado*

Esta prueba tiene una importancia crucial para evaluar convenientemente los relojes. La dificultad en esta prueba radica en la selección de los fenómenos de corte apropiados. Para algunos relojes, cualquier fenómeno que aparece, como un segundo con muchos errores, provocará un fenómeno de reconstrucción de fase. En algunos relojes cualquier interrupción o impulso de ruido espurio perturbará un contador en la detección de fase provocando un golpe de fase espuria que puede o no dar lugar a una reconstrucción de fase según su seriedad. Por otro lado, pueden diseñarse los relojes para observar la posición de los impulsos de la estructura de trama para extraer la fase. En este tipo de relojes, una interrupción no provoca necesariamente un fenómeno de reconstrucción de fase, a menos que exista un desplazamiento real en la posición de impulsos de la estructura de trama (por ejemplo, un fenómeno de conmutación de protección).

Una prueba forzada que debe realizarse consiste en simular un fenómeno de segundos con muchos errores (SME) con una corta interrupción (100 ms) con 10 segundos con muchos errores por día en presencia de fluctuación de fase de fondo a la entrada. Típicamente una interrupción de esta magnitud provocará que el reloj intente reconstruir la fase sin referencias de conmutación. En el punto siguiente se incluye un ejemplo de esta prueba forzada que debe servir para aclarar los conceptos y el significado de los resultados.

Al evaluar un reloj deben considerarse igualmente otras entradas forzadas.

- *Ráfaga de errores:* Puede simularse una ráfaga de errores donde no se perturbe la forma de onda de la señal de temporización correspondiente. En estas condiciones, sería conveniente que el reloj no reconstruyera la fase. Esta prueba ganaría en importancia si se estableciera que la mayoría de los fenómenos de ráfagas de errores son realmente simples errores en los datos sin perturbación de la señal de temporización.

- *Cambios bruscos de fase:* Los cambios bruscos de fase se producen debido a la actividad de protección, o proceden de otros relojes. Son fenómenos de interrupción que deberían forzar un fenómeno de reconstrucción de fase o que serían seguidos de manera inadvertida por el reloj. En cualquier caso degradarán las prestaciones del reloj. Este aspecto será objeto de un estudio ulterior.
- *Fenómenos de rearmar:* Un fenómeno de rearmar viene asociado a un reloj que abandona su situación presente y retorna erróneamente a sus condiciones iniciales. Los resultados constituyen un fenómeno transitorio que puede resultar significativo. No deben producirse fenómenos de rearmar durante el funcionamiento normal del reloj, y por tanto no deberían probablemente incluirse en el plan general de prueba del reloj. Sin embargo, resulta importante entender y controlar mejor dicho comportamiento.
- *Cambios bruscos de frecuencia:* Es importante que los relojes no sigan las referencias que presentan grandes variaciones bruscas de frecuencia. Sin embargo la habilidad para detectar los golpes de frecuencia está estrechamente unida a la selección de la anchura de banda de seguimiento para un determinado bucle de enganche en fase (BEF) de reloj. La solución al problema dependerá de la medida en que pueda normalizarse la anchura de banda de los diferentes relojes de una red.

### 1.1.2.3 *Funcionamiento mantenido*

En el funcionamiento mantenido, el objetivo consiste en estimar el desplazamiento de frecuencia inicial ( $y_{bias}$ ) y la deriva (D) del modelo del reloj. El desplazamiento de frecuencia inicial depende de la precisión de la estimación de frecuencia obtenida en el bucle de control, y de la estabilidad de frecuencia del oscilador local. Es importante comprobar el mantenimiento a partir de una condición forzada razonable, antes de que absorba la capacidad del bucle de control de obtener una estimación precisa de la frecuencia.

Al determinar la estimación de la deriva, uno de los puntos cruciales estriba en que típicamente los intervalos de observación necesarios para obtener un estimador de la deriva estadísticamente significativo duran varios días. Esta es una realidad que no puede evitarse. Además, debe prestarse atención a las condiciones de temperatura durante la prueba. Este aspecto será objeto de un estudio ulterior.

## 1.2 *Reloj de referencia primario*

Este punto requiere un estudio ulterior.

## APÉNDICE I

(al suplemento N.º 35)

### **Ejemplos de aplicaciones**

Este punto presenta los resultados de la aplicación de algunos de los procedimientos de prueba para dos relojes. Es importante señalar que los dos relojes probados tienen diferentes arquitecturas internas. La principal conclusión de las pruebas es que éstas respaldan el modelo de comportamiento del reloj. Este modelo puede resumirse de la forma siguiente:

- 1) Para intervalos de observación cortos fuera de la anchura de banda seguimiento del bucle de enganche en fase (BEF), la estabilidad de la señal de temporización de salida viene determinada por la estabilidad a corto plazo de la base de tiempos del sincronizador local.
- 2) En ausencia de interrupciones de la referencia, la estabilidad de la señal de temporización de salida se comporta como un proceso MP de ruido blanco a medida que el periodo de observación aumenta para entrar dentro de la anchura de banda del BEF.
- 3) En presencia de interrupciones, la estabilidad de la señal de temporización de salida se comporta como un proceso FM de ruido blanco a medida que el periodo de observación aumenta hasta coincidir con la anchura de banda del BEF.
- 4) En presencia de interrupciones, la señal de temporización de salida puede incurrir en un desplazamiento sistemático de frecuencia respecto de la referencia. Esto es consecuencia de una desviación sistemática de la fase reconstruida al recuperar la referencia.

Los resultados concretos de la prueba se describen a continuación:

## I.1 *Evaluación del reloj local*

Los resultados descritos en este punto proceden de datos de comportamiento reales.

### I.1.1 *Prueba de entrada no forzada a la velocidad primaria*

La primera prueba realizada consistió en evaluar la salida de la señal de temporización en condiciones ideales de la entrada de referencia. La entrada de referencia a la velocidad primaria procede de un generador con una referencia de tiempos de cesio. La fluctuación de fase fuera de la anchura de banda del BEF de estrato 3 es muy inferior a 1 ns. Típicamente, 300 ps medidos en un contador.

Para esta prueba, se puentó el montaje de prueba de fluctuación de fase, y se llevó directamente la velocidad primaria desde el simulador y analizador de velocidad primaria al sincronizador. La prueba se desarrolló a lo largo de 67 horas. En la figura I-1 se presentan los resultados. Se dibuja la raíz cuadrada de la varianza de Allan en una función del tiempo de observación. Los puntos de los datos marcados con triángulos se refieren a esta prueba.

Los resultados resultan coherentes con el modelo. Para tiempos de observación fuera de la anchura de banda de seguimiento de este BEF (inferior a 60 segundos), la varianza de Allan indicó un ruido blanco de MF procedente del oscilador de cuarzo local. A medida que el tiempo de observación aumenta, el BEF sigue a la referencia y el proceso de ruido converge hacia una MFase con ruido blanco.

La magnitud del ruido blanco de MFase es de 85 ns eficaces. Una de las componentes de este ruido es el error cuadrático medio de tiempo del oscilador en 60 segundos (la anchura de banda de este BEF es 1/60 s). Además existe una componente procedente de la resolución del detector de fase. Un fenómeno que surge en los bucles digitales consiste en que el error puede realizar excursiones de al menos un bit en cada dirección del valor nominal. Este efecto se reduce cuando la entrada tiene un fluctuación de fase del orden de un bit del detector de fase.

### I.1.2 *Prueba con entrada forzada a la velocidad primaria*

El objetivo de esta prueba consiste en emular el comportamiento del sincronizador en las condiciones forzadas que surgen en las redes reales. Para esta prueba, se provocó un corto fenómeno de interrupción bajo control del programa mediante el simulador y analizador de velocidad primaria cada 15 minutos. La duración de los fenómenos de interrupción se hizo aleatoria con una distribución uniforme en el intervalo de 10 a 100 ms.

Para esta prueba, se puentó el montaje de prueba de fluctuación de fase, y se llevó directamente la señal de velocidad primaria del simulador y analizador de velocidad primaria al sincronizador. La prueba duró 50 horas. En la figura I-1 se presentan los resultados. Se dibuja la raíz cuadrada de la varianza de Allan en función del tiempo de observación. Los puntos de datos marcados con un signo más corresponden a esta prueba.

#### I.1.2.1 *Resultados de la varianza de Allan*

Los resultados de las pruebas son coherentes con el modelo. Para tiempos de observación fuera de la anchura de banda de seguimiento de este BEF (inferior a 60 segundos), la varianza de Allan indica un ruido blanco de MF procedente del oscilador local de cuarzo. A medida que el tiempo de observación aumenta el BEF experimenta una ruptura cada 900 segundos. El error de reconstrucción de fase residual se suma y provoca un movimiento aleatorio de la fase (MF con ruido blanco). El error de reconstrucción provocado por cada interrupción se calcula en 180 ns eficaces.

#### I.1.2.2 *Desplazamiento sistemático de frecuencia*

Los datos de la prueba forzada muestran un desplazamiento de frecuencia estadísticamente significativo. El desplazamiento de frecuencia durante las 50 horas de la prueba fue de  $3 \times 10^{11}$ . Dado el ruido blanco de MF, el error cuadrático medio es  $1,5 \times 10^{11}$ . Estas cifras reflejan un error sistemático en la fase reconstruida entre 15 y 45 ns. Estos errores sistemáticos en los relojes provocan desplazamientos de frecuencia. Las consecuencias de esta situación consisten en que, en cierta medida, todos los relojes de la red funcionan como plesiócranos. Dado un nivel del caso más desfavorable de diez rupturas diarias el desplazamiento resultante de frecuencia sería del orden de varias partes en  $10^{12}$ .



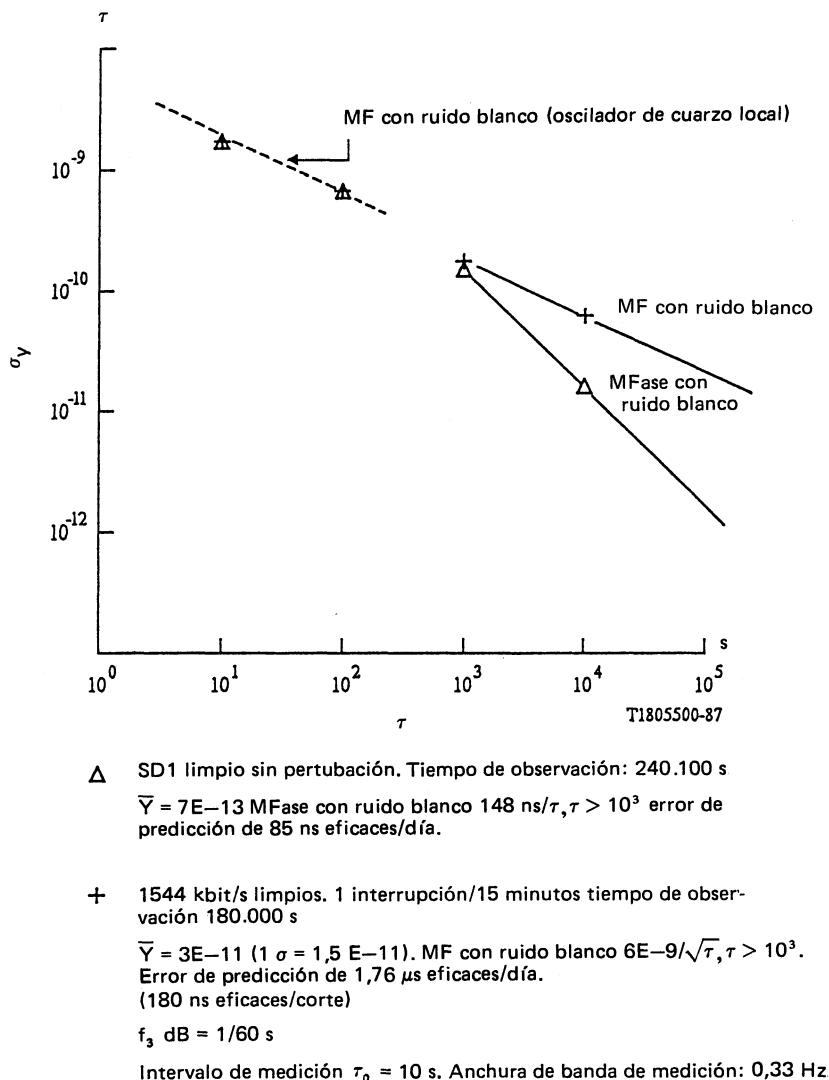


FIGURA I-1  
Ejemplo de reloj de nodo local

### I.1.2.3 Significado de los resultados de la prueba forzada

Para obtener una interpretación lógica de los resultados de la prueba forzada se debe considerar el nivel de rupturas. En esta prueba el nivel de rupturas fue de 100 rupturas diarias. Este es un orden de magnitud superior al que se puede esperar en los enlaces reales a la velocidad primaria. En este BEF en concreto, el proceso de los errores de reconstrucción es independiente de un fenómeno al siguiente. Esto puede comprobarse mediante la realización de pruebas con diferentes niveles de rupturas. Los resultados indicaron un error cuadrático medio de 180 ns por corte. Para 10 rupturas diarias el error cuadrático medio es de 570 ns por día.

## I.2 Evaluación de reloj de tránsito

Los resultados descritos en este punto se refieren a datos reales de comportamiento.

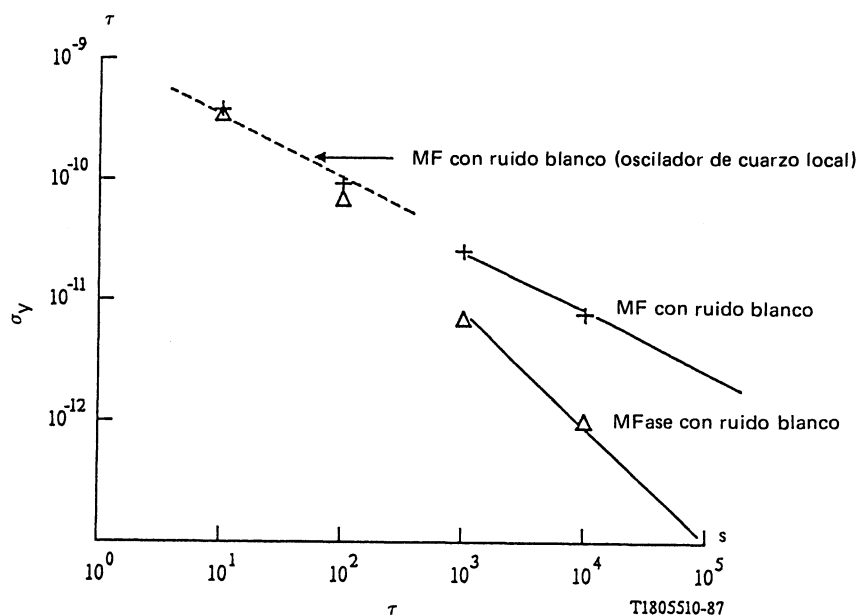
### I.2.1 Pruebas de entrada no forzada a la velocidad primaria

La primera prueba realizada consistió en evaluar la salida de la señal de temporización en condiciones ideales de la entrada de referencia. La entrada de referencia a la velocidad primaria se obtiene del simulador y analizador a la velocidad primaria con una referencia de tiempos de cesio. La fluctuación de fase fuera de la anchura de banda de seguimiento del BEF del estrato 3 es muy inferior a 1 ns. Típicamente, 300 ps medidos en el contador.

Para esta prueba, se incluyó el montaje de prueba de fluctuación de fase. Este último estaba dotado de una entrada de modulación externa de la fluctuación de fase. La señal de fluctuación de fase era ruido blanco limitado en banda. Se utilizó un filtro paso bajo de un solo polo con una frecuencia de 3 dB de 150 Hz. La fluctuación de fase se pasó por el filtro paso bajo para evitar que se produjeran errores en la estructura de trama como consecuencia de una fluctuación de fase en la alineación de alta frecuencia. Se ajustó la señal exterior para conseguir un nivel de cresta a cresta de la fluctuación de fase de 1,5  $\mu$ s. La prueba duró 23 horas. En la figura I-2 se presentan los resultados. Se dibuja la varianza de Allan en función del tiempo de observación. Los puntos de los datos marcados con triángulos se refieren a esta prueba.

Los resultados de la prueba son coherentes con el modelo. Para tiempos de observación fuera de la anchura de banda de seguimiento de este BEF (inferior a 450 segundos) la varianza de Allan indicaba un ruido blanco de MF procedente de un oscilador local de cuarzo. A medida que el tiempo de observación aumenta, el BEF sigue la referencia y el proceso de ruido converge hacia una MFase con ruido blanco.

La magnitud del ruido blanco de MFase es 6 ns eficaces. Este es un número excepcionalmente bueno y se debe a la ajustada constante de tiempo del BEF (450 segundos). En este caso la fluctuación de fase de entrada evita los efectos de salto en los bordes.



- $\Delta$  Entrada SD1<sup>a)</sup> sin perturbación. Tiempo de observación 83.000 s  
 $\bar{Y} = +6E-13$  MFase con ruido blanco  $1E-8/\tau$ ,  $\tau > 10^3$  error de predicción de 6 ns eficaces/día
- $+$  1544 kbit/s<sup>a)</sup>, 1 interrupción/30 minutos. Tiempo de observación 253.800 s  
 $\bar{Y} = +6E-13$ . MF blanco  $8E-10/\sqrt{\tau}$ ,  $\tau > 10^3$  error de predicción de 235 ns eficaces/día  
 $f_3$  dB = 1/450 s
- <sup>a)</sup> 1,5  $\mu$ s cresta a cresta. Anchura de banda de la fluctuación de fase = 150 Hz.  
Intervalo de medición  $\tau_0 = 10$  s. Anchura de banda de medición = 0,33 Hz.

FIGURA I-2

Ejemplo de reloj de nodo de tránsito

## 1.2.2 Prueba con entrada forzada a la velocidad primaria

Los objetivos de esta prueba es emular el comportamiento del sincronizador en las condiciones que se producen en las redes reales. Para esta prueba se provocó cada 30 minutos un fenómeno corto de interrupción bajo control del programa mediante el simulador y analizador de velocidad primaria. Se hizo que la duración de los fenómenos de interrupción fuera aleatoria con una distribución uniforme entre 10 y 100 ms.

Para esta prueba se incluyó el montaje de prueba de la fluctuación de fase. La señal de fluctuación de fase era ruido blanco limitado en banda. Se utilizó un filtro paso bajo de un solo polo con una frecuencia de corte a 3 dB de 150 Hz. Se hizo pasar la fluctuación de fase por el filtro paso bajo para evitar que se produjeran errores en la estructura de trama como consecuencia de una fluctuación de fase en la alineación de alta frecuencia. Se ajustó la señal externa para conseguir un nivel de cresta de la fluctuación de fase de 1,5  $\mu$ s. La prueba duró 70 horas. En la figura I-2 se presenta los resultados. Los puntos de datos marcados con un signo más se refieren a esta prueba.

### 1.2.2.1 Resultados de la varianza de Allan

Los resultados de la prueba son coherentes con el modelo. Para tiempos de observación fuera de la anchura de banda de seguimiento de este BEF (inferior a 450 segundos), la varianza de Allan indicaba un ruido blanco de MF procedente de un oscilador local de cuarzo. A medida que el tiempo de observación aumenta, el BEF experimenta una ruptura cada 1800 segundos. El error de fase residual se acumula y provoca un movimiento aleatorio de fase (MF con ruido blanco). El error de reconstrucción para cada ruptura se calculó en 34 ns eficaces. Uno de los elementos que contribuyen a este error es la fluctuación de fase de entrada a la velocidad primaria. El algoritmo promedia la entrada para mejorar la estimación del error de fase de reconstrucción.

### 1.2.2.2 Desplazamiento sistemático de frecuencia

Los datos de la prueba forzada muestran un desplazamiento de frecuencia sistemático estadísticamente insignificante. El desplazamiento sistemático a lo largo de las 70 horas de prueba fue  $6 \times 10^{-13}$ . Dado el ruido blanco de MF, el error cuadrático medio es  $1,5 \times 10^{-12}$ . Dada esta incertidumbre no existe evidencia de un sesgo en los datos. En el caso más desfavorable, la desviación sistemática no debe ser mayor que el nivel de incertidumbre de  $1,5 \times 10^{-12}$ .

### 1.2.2.3 Significado de los resultados de la prueba forzada

Para obtener una interpretación lógica de los resultados de la prueba forzada debe considerarse el nivel de rupturas. En esta prueba el nivel de rupturas era de 48 por día. Esta cifra representa cinco veces el valor que puede esperarse en los enlaces a la velocidad primaria. En este BEF en concreto el proceso de los errores de reconstrucción es independiente de un fenómeno al siguiente gracias a un conocimiento del diseño del BEF. Este punto puede comprobarse mediante la realización de pruebas para varios niveles de rupturas. Los resultados muestran un error cuadrático medio de 34 ns por ruptura. Para 10 rupturas diarias el error cuadrático medio resultante por día es de 100 ns.

## 1.3 Límites de confianza de la varianza de Allan

Las varianzas de las muestras (como la varianza de Allan de las muestras) siguen una distribución chi-cuadrada. Según J. Barnes [1], el intervalo de confianza de la varianza de Allan puede determinarse suponiendo un determinado proceso de ruido. Al calcular la varianza de Allan de las muestras se utilizó una superposición completa de los intervalos de retardo. Esto constituye la utilización más eficaz de los datos. Sin embargo, es incorrecto suponer que existe independencia entre las muestras que se solapan al calcular los intervalos de confianza. Esto se describe con detalle en [1]. Por brevedad, se utilizaron los métodos descritos en [1] para calcular el intervalo de confianza.

Los factores de confianza del 90% para ruido blanco de MFase están acotados entre 0,9 y 1,1 para todos los tiempos de retardo hasta 10 000 suponiendo un periodo de observación de un día. Para un ruido blanco de MF a lo largo de un intervalo de observación de un día los factores de confianza fueron los siguientes. Para un intervalo de retardos de 1000 segundos el límite inferior es 0,9 y el límite superior es 1,2. En 10 000 los factores de confianza son 0,75 y 1,5.

Como ejemplo de lo que significan estos factores considérese la componente de ruido blanco de MF en la figura I-2 (datos indicados con el signo más). Para el retardo de 10 000 segundos, la raíz cuadrada de la varianza de las muestras es  $8 \times 10^{-12}$ . El intervalo de confianza del 90% para la varianza verdadera está limitado por los factores de confianza multiplicados por la varianza de las muestras. Esto implica que la raíz cuadrada de la varianza de Allan se encuentre entre  $6,9 \times 10^{-12}$  y  $9,8 \times 10^{-12}$  con un intervalo de confianza del 90%.

### Referencia

- [1] BARNES (J. A.): Data Analysis and Confidence Intervals, *NBS Time and Frequency Seminar Notes*, capítulo 6, agosto de 1986.

### Suplemento N.º 36

#### ACUMULACIÓN DE FLUCTUACIÓN DE FASE Y FLUCTUACIÓN LENTA DE FASE EN LAS REDES DIGITALES

(citado en la Recomendación G.824)

En el presente suplemento se describe un modelo que se ha utilizado para calcular la acumulación de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase en las redes digitales producida por regeneradores digitales en cascada y multiplex digitales asíncronos. Este modelo no incluye otras fuentes de generación de fluctuación lenta de fase, por ejemplo, entorno, discontinuidades en la distribución de referencias de sincronización, etc.

#### 1 Acumulación de fluctuación de fase y fluctuación lenta de fase – Componente del regenerador digital

El modelo más utilizado de acumulación de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase del regenerador, atribuido a Chapman [1] trata el regenerador como un sistema lineal, de desplazamiento invariante. A fin de calcular la fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase acumulada tras N regeneradores en cascada, la fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase intrínseca del regenerador se desglosa en forma de componentes aleatoria y sistemática. El modelo de Chamzas de acumulación de fluctuación fase/fluctuación lenta de fase del regenerador [2] estudia la forma en que afectan las variaciones estocásticas en los circuitos de retemporización del regenerador a la acumulación de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase. Los resultados de este estudio demuestran que el uso de la característica media apropiada de transferencia de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase en el modelo de acumulación del regenerador idéntico, que se resume más arriba, proporciona una estimación muy buena de la acumulación de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase calculada suponiendo una variación estocástica de los circuitos de retemporización.

Utilizando el modelo de Chapman para una cadena de N regeneradores idénticos, definiendo  $H_1(j\omega)$  como la característica de transferencia de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase para un regenerador, y redefiniendo las componentes aleatoria y sistemática como componentes completamente descorrelacionada y correlacionada, respectivamente.

- la densidad espectral de potencia de la componente aleatoria de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase es:

$$\Phi_N^R(\omega) = \Phi_{i1}^R |H_1(j\omega)|^2 \frac{1 - |H_1(j\omega)|^{2N}}{1 - |H_1(j\omega)|^2} \quad (1)$$

donde  $\Phi_{i1}^R$  es la densidad espectral de potencia de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase constante, internamente generada, aleatoria (independiente de la configuración más dependiente de la configuración descorrelacionada);

- la densidad espectral de potencia de la componente sistemática de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase es:

$$\Phi_N^S(\omega) = \Phi_{i1}^S |H_1(j\omega)|^2 \frac{|1 - H_1(j\omega)^N|^2}{|1 - H_1(j\omega)|^2} \quad (2)$$

donde  $\Phi_{i1}^S$  es la densidad espectral de potencia de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase constante, internamente generada, sistemática (dependiente de la configuración correlacionada) para un regenerador  $\Phi_{i1}^R$  y  $\Phi_{i1}^S$  pueden estimarse por mediciones prácticas basadas en la respuesta de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase del regenerador a longitudes de palabra cortas y largas procedentes de un generador de configuraciones, y estudios de correlación.

Cuando no existe formación de cresta en la característica de transferencia fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase del regenerador, la fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase sistemática se acumula mucho más rápidamente que la fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase aleatoria [1], [4], [5]; resultado de ello es que la acumulación de fluctuación fase/fluctuación lenta de fase aleatoria se desprecia a menudo. Sin embargo, para un gran número de regeneradores con formación de crestas en la características de transferencia de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase, la acumulación de fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase total puede estar dominada por la componente aleatoria.



