

MÉTODOS DE CALIBRACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Ing. Francisco Jiménez T. y Dr. Mauricio López R.
 Centro Nacional de Metrología
 Metrología Eléctrica
 km 4.5 Carr. a Los Cués, El Marqués, 76241, Qro., México
 (442) 211-05-00, ext 3207. fjimenez@cenam.mx
 (442) 211-05-00 ext. 3202, jlopez@cenam.mx

Resumen: Se presentan los métodos de calibración en el dominio del tiempo más empleados, ejemplos para cada caso y consideraciones para realizar las mediciones.

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier método de medición de tiempo o frecuencia requiere elementos básicos para su implementación, estos son: i) el oscilador de referencia o patrón de referencia, generalmente este elemento es el mejor oscilador con el que dispone el laboratorio, ii) el instrumento comparador, puede ser un Frecuencímetro o contador de intervalos de tiempo según sea el caso, iii) el oscilador bajo calibración.

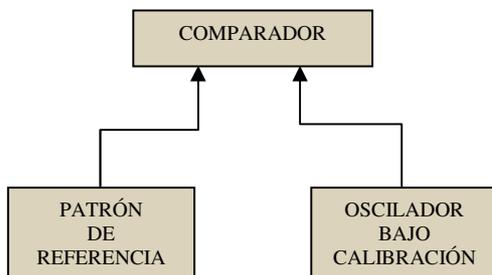


Fig. 1 Esquema general de medición

La estadística usada en metrología de tiempo y frecuencia para determinar la incertidumbre del oscilador bajo calibración no es la misma que la usada en otras magnitudes. Mientras en otras magnitudes se emplea la estadística normal, como la desviación estándar, en metrología de tiempo y frecuencia se usa la Varianza de Allan.

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} \langle (\Delta y_i)^2 \rangle \quad (1)$$

Así, el CENAM a través de la División de Tiempo y Frecuencia aplica y promueve el uso de la Raíz de la Varianza de Allan como estimador de la incertidumbre de osciladores.

En la ecuación (1), los corchetes “ $\langle \rangle$ ” significan promedio. La estimación de la Varianza de Allan requiere que la toma de mediciones sea llevada con cierta cadencia, es decir, el intervalo de tiempo entre la toma de una medición el cual debe ser constante, a esto se le llama tiempo de promediación τ .

Para llevar a la práctica esto último, es necesario utilizar sistemas de adquisición de datos que nos permitan registrar y almacenar una cantidad suficientemente grande de mediciones siempre con el mismo intervalo de tiempo entre cada una.

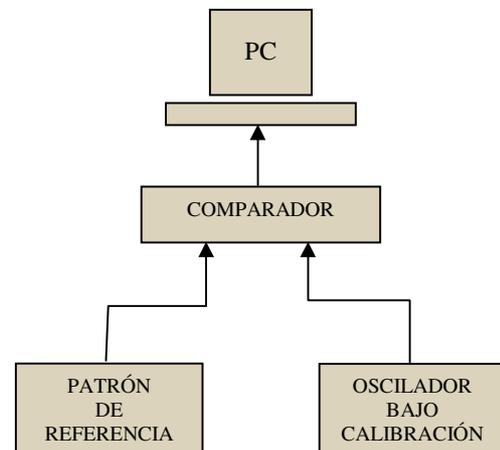


Fig. 2 Esquema de medición con sistema de adquisición de datos.

2. MÉTODOS DE MEDICIÓN

Como en cualquier medición de magnitudes eléctricas, es necesario tomar en consideración que los niveles de tensión y los acoplamientos de

impedancias sean los adecuados. La mayor parte de las ocasiones las tensiones de entrada de los instrumentos medidores varía alrededor de 1,5 Vpp con impedancias de 50 Ω.

En todos los casos, el Patrón de referencia es empleado para *amarar* en frecuencia al instrumento medidor, es decir, que el oscilador interno o base de tiempo del medidor se hace esclavo del patrón de referencia oscilando con la misma estabilidad de éste.

2.1 Medición directa de frecuencia.

Uno de los métodos de medición más sencillos de implementar, consiste básicamente en conectar el instrumento bajo calibración al comparador, el comparador puede ser un contador de frecuencias, un frecuencímetro o un contador de intervalos de tiempo.

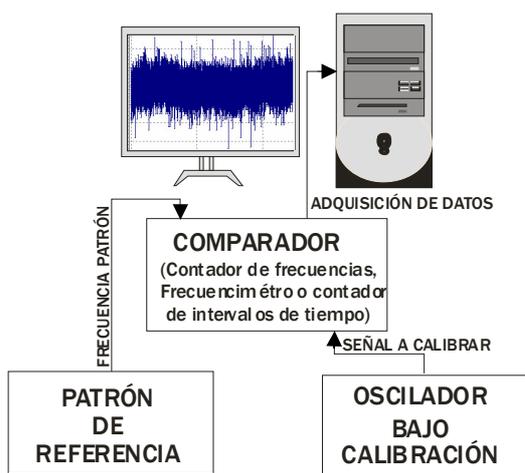


Fig. 3 Esquema del método de medición directa de frecuencia.

Este método es directo, con tan solo asegurar que el nivel de tensión y el valor de las impedancias son los correctos se pueden realizar mediciones de frecuencia. Este método es recomendado para medir la frecuencia de osciladores con pobre exactitud y estabilidad. Es siempre recomendable contar con un sistema automático de adquisición de datos.

En la Fig. 4 se muestra el ejemplo de un gráfico de mediciones directas de frecuencia. El comportamiento en el gráfico es típico de un oscilador de cuarzo de regular calidad metrológica. Las mediciones de la Fig. 4 corresponden a 13

horas de medición con tiempos de promediación, τ, de 1 s.

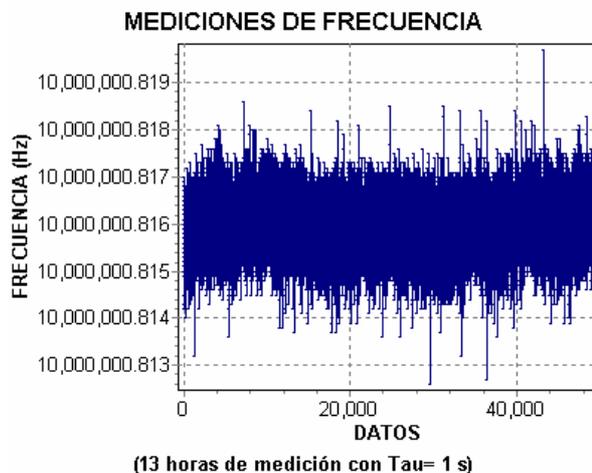


Fig. 4 Gráfico típico de mediciones de frecuencia.

La desviación fraccional de frecuencia de estas mediciones respecto al Patrón es:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} = 8,16 \times 10^{-8}$$

La Raíz de la varianza de Allan o Desviación de Allan para ventanas de observación de entre 1 segundo y 4 horas se puede apreciar en la Fig. 5.

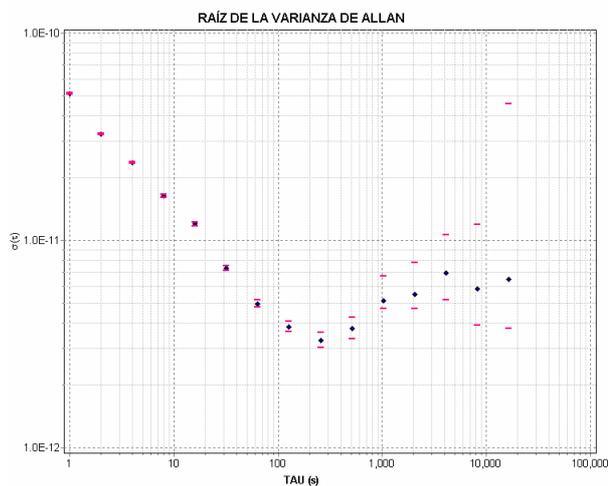


Fig. 5 Raíz de la varianza de Allan de las mediciones de la Fig. 4

2.2 Medición directa de diferencia de fase.

Las mediciones de diferencia de fase son siempre más deseadas ya que proporcionan mayor información sobre el comportamiento del oscilador a diferencia de las mediciones de frecuencia, ya que para éstas el instrumento necesita contar un buen número de cruces por cero para determinar la frecuencia, en cambio, para las mediciones de diferencias de fase es suficiente con un solo cruce por cero, haciendo que las mediciones de diferencia de fase se conviertan en un histórico fiel del comportamiento del oscilador.



Fig. 5 Esquema del método de medición directa de diferencia de fase.

Para implementar este método es necesario contar con un Contador de Intervalos de Tiempo como elemento Comparador. En la Fig. 5 se muestra el diagrama esquemático de este método.

En el gráfico de la Fig. 6 se presenta un ejemplo típico de mediciones de diferencia de fase. Note que las mediciones tienen unidades de grados, de -180 a +180. Dependiendo del equipo comparador que se utilice estas mediciones pueden estar dadas en unidades de grados, radianes o segundos.

Cuando se realizan mediciones de diferencia de fase, hay que asegurar que en el intervalo del tiempo de promediación no ocurra acumulación de periodos completos. Para emplear este método se recomienda que un período de fase acumulado ocurra en al menos 5τ , siendo deseable que el número de intervalos de tiempo de promediación sea muy grande.

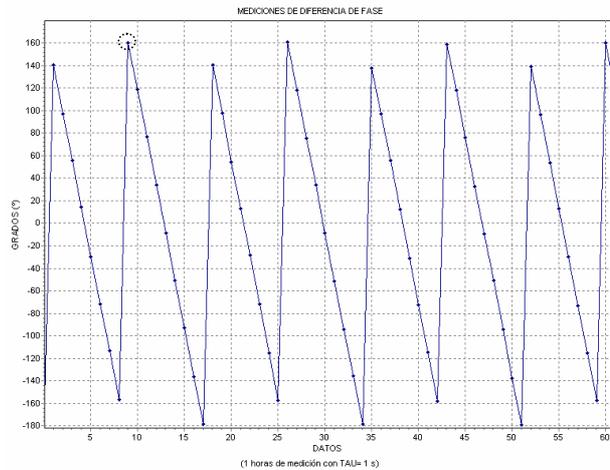


Fig. 6 Gráfico típico de mediciones de diferencia de fase.

Para determinar la estabilidad de este oscilador, es necesario procesar los datos para generar la fase acumulada, esto es, obtener los datos del gráfico continuo restando, en este caso, a cada medición el producto del número de periodos que hasta ese momento han ocurrido por el período de la señal. Por ejemplo, el nuevo valor de la medición encerrado con un círculo en la Fig. 6 será: $160^\circ - (1 \times 360^\circ) = -200^\circ$.

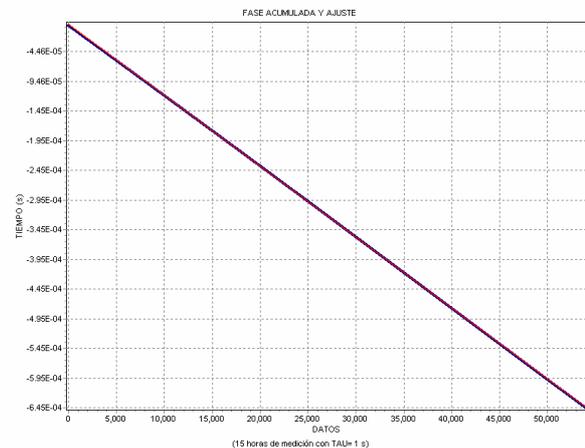


Fig. 7 Gráfico con la fase acumulada.

La desviación fraccional de frecuencia de estas mediciones respecto al Patrón son:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} = 1,19 \times 10^{-8}$$

La Raíz de la varianza de Allan o Desviación de Allan para ventanas de observación de entre 1 segundo y 4 horas se puede apreciar en la Fig. 8.

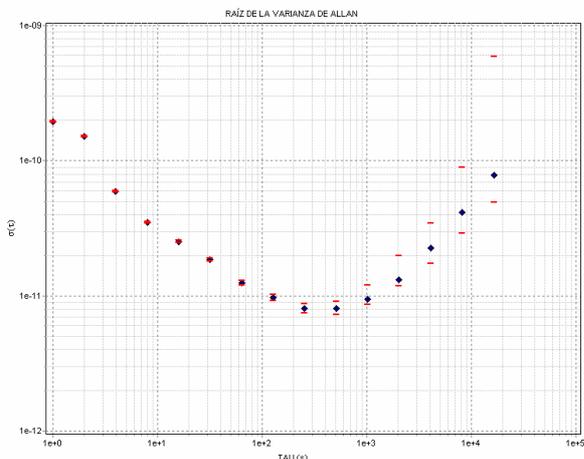


Fig. 8 Raíz de la varianza de Allan de las mediciones de la Fig. 6

2.3 Medición de diferencia de frecuencias con mezclador.

El mezclador es un dispositivo fácil de utilizar, realiza el producto de dos señales de entrada y en su salida se obtiene una señal con la suma de las frecuencias y otra con la resta de las frecuencias, colocando a la salida un filtro pasa bajas obtendremos solo la señal con la diferencia de las frecuencias, esto es:

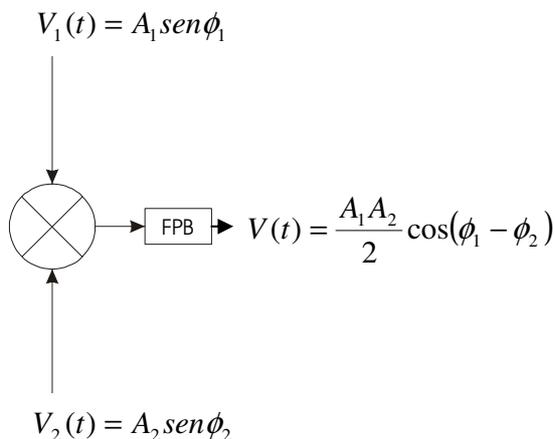


Fig. 10 Esquema del funcionamiento del mezclador.

La frecuencia de corte del filtro deberá de ser mayor que la diferencia de frecuencia esperada y menor que la suma de las dos frecuencias. Este método proporciona una mayor resolución y es recomendable para osciladores que cuentan con buena estabilidad.

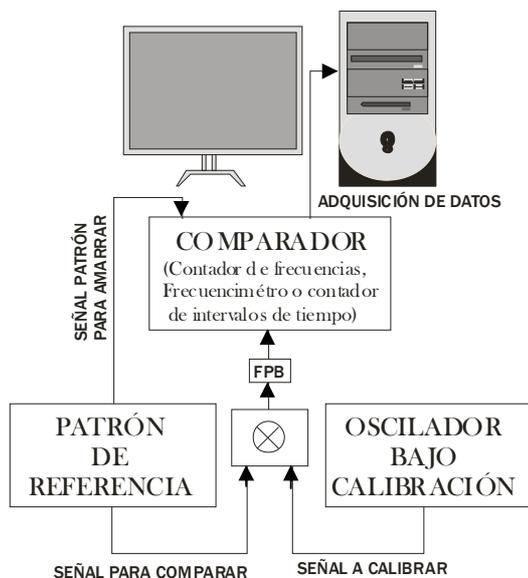


Fig. 10 Esquema del método de medición de diferencias de frecuencia con mezclador.

En el gráfico de la Fig. 11 se muestra un ejemplo de mediciones de diferencia de frecuencias, note que el valor de frecuencia registrado está por debajo de 1 Hz.

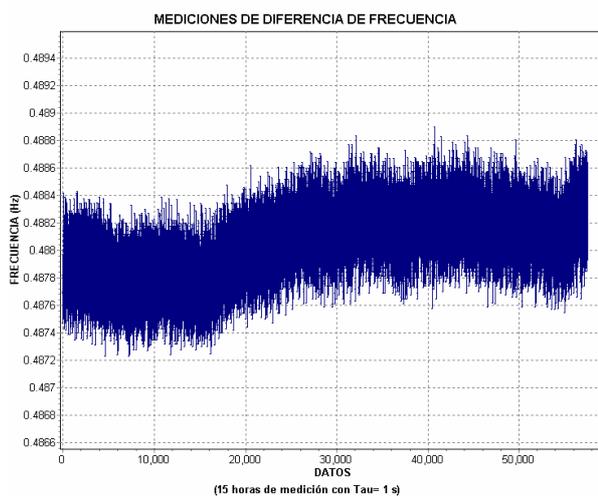


Fig. 11 Gráfico típico de mediciones de diferencia de frecuencias.

La desviación fraccional de frecuencia de estas mediciones respecto al Patrón son:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} = -9,76 \times 10^{-8}$$

La Raíz de la varianza de Allan o Desviación de Allan para ventanas de observación de entre 1 segundo y 4 horas se puede apreciar en la Fig. 12.

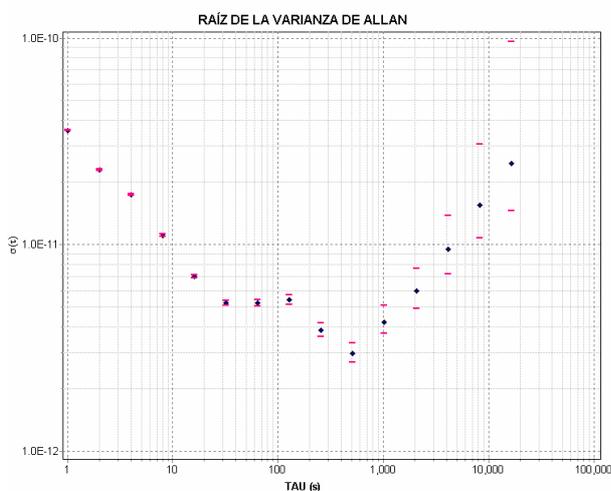


Fig. 12 Raíz de la varianza de Allan de las mediciones de la Fig. 11.

2.4 Medición de diferencia de fases con mezclador dual.

Este método consiste en medir la diferencia de fase existente entre la frecuencia resultante de la diferencia de frecuencias entre el oscilador común y el patrón de referencia y la frecuencia resultante de la diferencia de frecuencias entre el oscilador común y el oscilador bajo calibración.

Cada frecuencia a comparar es obtenida usando un mezclador y un filtro pasa bajas. La frecuencia del oscilador común es ajustada para generar una diferencia de frecuencias nominal de 500 Hz, de tal forma que el instrumento comparador estará midiendo la diferencia de fase entre dos señales de 500 Hz relativas cada una al Patrón de referencia y al oscilador bajo calibración respectivamente. En la Fig. 13 se muestra el diagrama esquemático de este método.

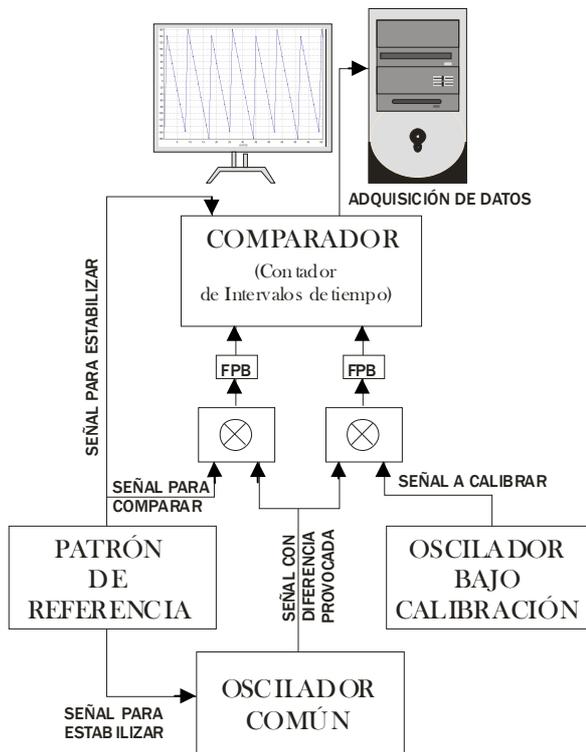


Fig. 13 Esquema del método de medición de diferencias de fase con mezclador dual.

Este método es recomendado para comparar osciladores con frecuencias muy iguales y de muy alta estabilidad, ya que aumenta la resolución permitiendo medir diferencias muy pequeñas entre las frecuencias.

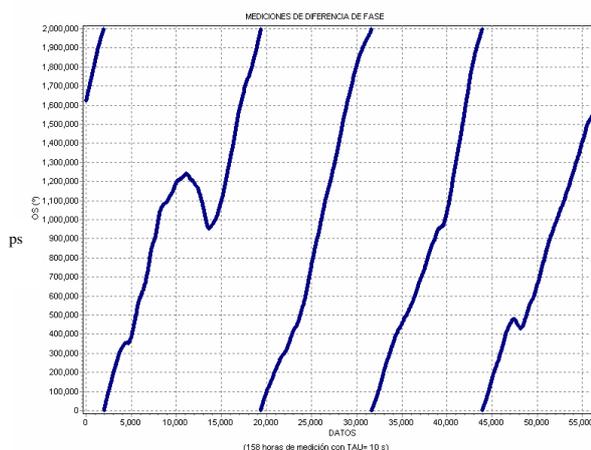


Fig. 14 Gráfico típico de mediciones de diferencia de fase de un oscilador de rubidio.

En el gráfico de la Fig. 14 se muestran las mediciones de diferencia de fase de un oscilador de rubidio respecto a un cesio. Note que las unidades son picosegundos y que en poco más de 6 días de medición se registraron solo 4 períodos acumulados, lo cual refleja que el oscilador tiene características metrológicas muy buenas.

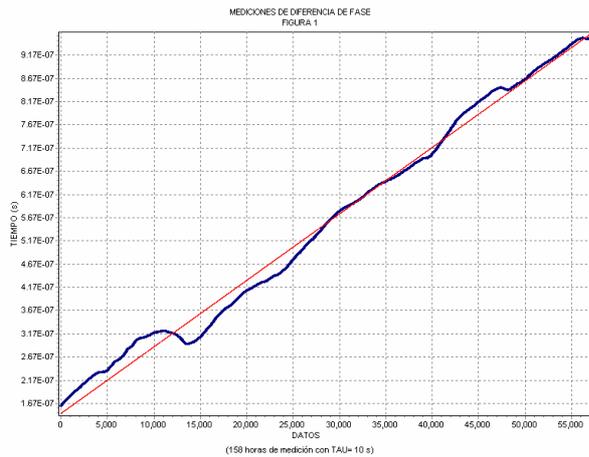


Fig. 15 Fase acumulada de un oscilador de rubidio respecto a un cesio.

La línea gruesa del gráfico corresponde a la fase acumulada y la línea angosta es la recta de ajuste. Cabe mencionar que las irregularidades observadas en la línea gruesa son debidas a la estabilidad del oscilador. Es decir, mientras en un oscilador de cuarzo esta línea normalmente se aprecia completamente recta la estabilidad se observa solo

a través de la varianza de Allan, mientras que en este caso, la estabilidad se puede observar ya desde las mediciones.

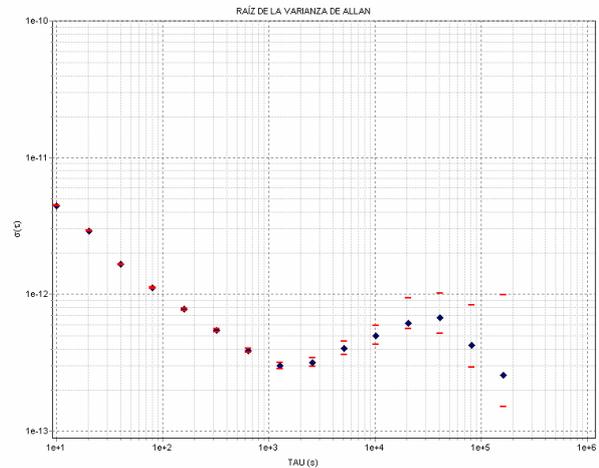


Fig. 16 Estabilidad del oscilador de rubidio.

REFERENCIAS

[1] D.B. Salivan, D. W. Allan, D. A. Howe y F. L. Walls, Characterization of Clocks and Oscillators, NIST Technical Note 1337.