

GUÍA TÉCNICA SOBRE TRAZABILIDAD E INCERTIDUMBRE EN LA METROLOGÍA DE TIEMPO Y FRECUENCIA

México, Abril 2008

Derechos reservados ©

PRESENTACIÓN

Durante la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios de calibración y de ensayo, la demostración de la trazabilidad y la estimación de la incertidumbre de las mediciones, requiere la aplicación de criterios técnicos uniformes y consistentes.

Con el propósito de asegurar la uniformidad y consistencia de los criterios técnicos en la evaluación de la trazabilidad y la incertidumbre de las mediciones, la entidad mexicana de acreditación, a. c. (ema), solicitó al Centro Nacional de Metrología que encabezara un programa de elaboración de Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones.

Los Comités de Evaluación, a través de los Subcomités de los Laboratorios de Calibración y de Ensayo, se incorporan a este programa y su participación está orientada a transmitir sus conocimientos y experiencias técnicas en la puesta en práctica de las Políticas de Trazabilidad y de Incertidumbre establecidas por ema, mediante el consenso de sus grupos técnicos de apoyo. La incorporación de estos conocimientos y experiencias a las Guías, las constituyen en referencias técnicas para usarse en la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios de calibración y ensayo.

En este programa, el CENAM se ocupa, entre otras actividades, de coordinar el programa de las Guías Técnicas; proponer criterios técnicos sobre la materia; validar los documentos producidos; procurar que todas las opiniones pertinentes sean apropiadamente consideradas en los documentos; apoyar la elaboración de las Guías con eventos de capacitación; asegurar la consistencia de las Guías con los documentos de referencia indicados al final de este documento.

La elaboración de las Guías está vinculada con la responsabilidad que comparten mutuamente los laboratorios acreditados de calibración y de ensayo, de ofrecer servicios con validez técnica en el marco de la evaluación de la conformidad. La calidad de estos servicios se apoya en la confiabilidad y uniformidad de las mediciones, cuyo fundamento está establecido en la trazabilidad y en la incertidumbre de las mismas. Los que ejercitan la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios, así como los que realizan la práctica rutinaria de los servicios acreditados de calibración y ensayo, encontrarán en las Guías una referencia técnica de apoyo para el aseguramiento de las mediciones.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones no reemplazan a los documentos de referencia en que se fundamentan las políticas de trazabilidad e incertidumbre de **ema**. Las Guías aportan criterios técnicos que servirán de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. La consistencia de las Guías con esta norma y con los demás documentos de referencia, permitirá conseguir el propósito de asegurar la confiabilidad de la evaluación de la conformidad por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

Dr. Héctor O. Nava Jaimes
Director General
Centro Nacional de Metrología

María Isabel López Martínez
Directora Ejecutiva
entidad mexicana de acreditación a.c.

Grupo de Trabajo que participó en la elaboración de esta Guía:

GUTIÉRREZ GUZMÁN, Fernando A., CANEFER, S.A. DE C.V.

LÓPEZ MARTÍNEZ, M. Federico, CFE-LAPEM

LÓPEZ ROMERO, J. Mauricio, CENAM

VILLAVERDE LOZANO, Ariel, ININ

ÍNDICE

	página
PRESENTACIÓN	2
GRUPO DE TRABAJO QUE PARTICIPÓ EN LA ELABORACIÓN	4
ÍNDICE	5
1. PROPÓSITO DE LA GUÍA	6
2. ALCANCE DE LA GUÍA	6
3. MENSURANDO	7
4. MÉTODOS Y SISTEMAS DE MEDICIÓN	8
5. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS	14
6. TRAZABILIDAD DE LAS MEDICIONES	16
7. INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN	20
8. VALIDACIÓN DE MÉTODOS	25
9. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN	25
10. BIBLIOGRAFÍA	26
11. ANEXO	27

1. PROPÓSITO DE LA GUÍA

Esta guía técnica tiene el propósito de establecer las directrices para la evaluación de trazabilidad e incertidumbre en los servicios de calibración en tiempo y frecuencia que son ofrecidos por los laboratorios acreditados bajo el esquema de la Entidad Mexicana de Acreditación, *ema*. Las directrices establecidas en este documento deberán ser observadas por los laboratorios de metrología acreditados, o en proceso de acreditación, por la *ema*.

2. ALCANCE DE LA GUÍA

Esta guía aborda los métodos de calibración de frecuencia en el dominio del tiempo que a continuación se mencionan:

Mediciones directas de frecuencia o de fase

Esta técnica es aquella que para medir frecuencia se utiliza un frecuencímetro como patrón de medición, y no intervienen aditamentos para cambiar de manera voluntaria el valor de la frecuencia bajo calibración. En los procesos de calibración en los cuales es usada esta técnica se recomienda, siempre que sea posible, realizar el proceso de calibración directamente sobre la base de tiempo del instrumento bajo calibración. Una variante de este método consiste en realizar mediciones de diferencia de fase de la frecuencia bajo calibración respecto a la frecuencia patrón. Esta variante es considerada como método directo de medición ya que la frecuencia bajo calibración no es procesada (alterada) en ningún momento durante la calibración. El sistema de calibración debe ser automatizado tanto para la toma de mediciones como para el almacenamiento de éstas.

Nota. Para el caso en el que el instrumento bajo calibración es un sintetizador de frecuencia, el proceso de verificar el buen funcionamiento del instrumento bajo calibración para los distintos valores de la frecuencia de salida, no debe ser considerado como la calibración en sí misma, sino solamente una verificación del buen estado del instrumento. El proceso de calibración se lleva a cabo sobre la base de tiempo del instrumento.

Mediciones por mezcla de frecuencias

Este método es aquel que para medir frecuencia se utiliza un mezclador de frecuencia (un mezclador de frecuencias es un dispositivo que multiplica dos señales de frecuencia) con el objeto de “mezclar” ésta con una frecuencia patrón obteniendo así, por medio de un filtro pasa-bajos, una frecuencia que toma el valor de la diferencia entre la frecuencia del instrumento bajo calibración y la frecuencia patrón del laboratorio. La medición de diferencia de frecuencias se realiza por medio de un frecuencímetro. El sistema de calibración debe ser automatizado tanto

para la toma de mediciones como para el almacenamiento de éstas. Esta técnica mejora significativamente la resolución obtenida con el método de medición directa de frecuencias; es recomendada para la realización de calibración de osciladores de mediana exactitud.

Nota. La nota al pie de la descripción del método de medición directa de frecuencia debe ser también considerada para el caso de mediciones por mezcla de frecuencias.

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

Este método es aquel que para medir duración de intervalos de tiempo se utiliza un cronómetro.

3. MENSURANDO

En las siguientes definiciones se considera que los instrumentos bajo calibración y de medición se mantienen en operación bajo condiciones de temperatura constante (± 1 K), y el resto de las condiciones ambientales a las cuales están sujetos los instrumentos son propias de un laboratorio de metrología en magnitudes eléctricas. El mensurando se define según el método de medición que se aplique en una calibración:

Mediciones directas de frecuencia

El mensurando es la frecuencia del oscilador bajo calibración.

Mediciones por mezcla de frecuencias

El mensurando es la diferencia de frecuencia entre la frecuencia bajo calibración y la frecuencia patrón.

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

El mensurando es la diferencia de tiempo entre la medición del cronómetro bajo calibración y el patrón de referencia.

3.1 Intervalo típico de medición

El intervalo típico de medición se determina de acuerdo al método de medición que se aplique en una calibración:

Mediciones directas de frecuencia

Existen dos intervalos típicos de medición, a saber:

Bajas frecuencias: de 1 Hz hasta 200 MHz

Altas frecuencias: de 200 MHz hasta 25 GHz.¹

¹ Esta Guía cubre el caso de mediciones en bajas frecuencias.

Mediciones por mezcla de frecuencias

De 100 Hz hasta 1 MHz

Nota: observar aquí que este intervalo de medición se refiere al mensurando y no a la frecuencia del oscilador bajo calibración.

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

De 1 segundo hasta 5×10^5 segundos

3.2 Incertidumbre de medición esperada

La incertidumbre de medición esperada en los servicios de calibración es nominalmente la incertidumbre del valor de los patrones de referencia de los laboratorios, sin embargo la incertidumbre de medición final está limitada por la estabilidad en frecuencia de los osciladores bajo calibración. Las expresiones de incertidumbre de medición siguientes se refieren a incertidumbres de medición relativas, ésto es, incertidumbres de medición normalizadas a la frecuencia nominal para el caso de los dos primeros métodos y normalizada al intervalo de tiempo para el caso del tercer método².

Mediciones directas de frecuencia

De 10^{-4} a 10^{-8}

Mediciones por mezcla de frecuencias

De 10^{-7} a 10^{-9}

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

De 10^{-3} a 10^{-6}

4. MÉTODOS Y SISTEMAS DE MEDICIÓN

Mediciones directas de frecuencia

El esquema siguiente indica la configuración general básica de la implementación de la técnica de medición directa de frecuencia.

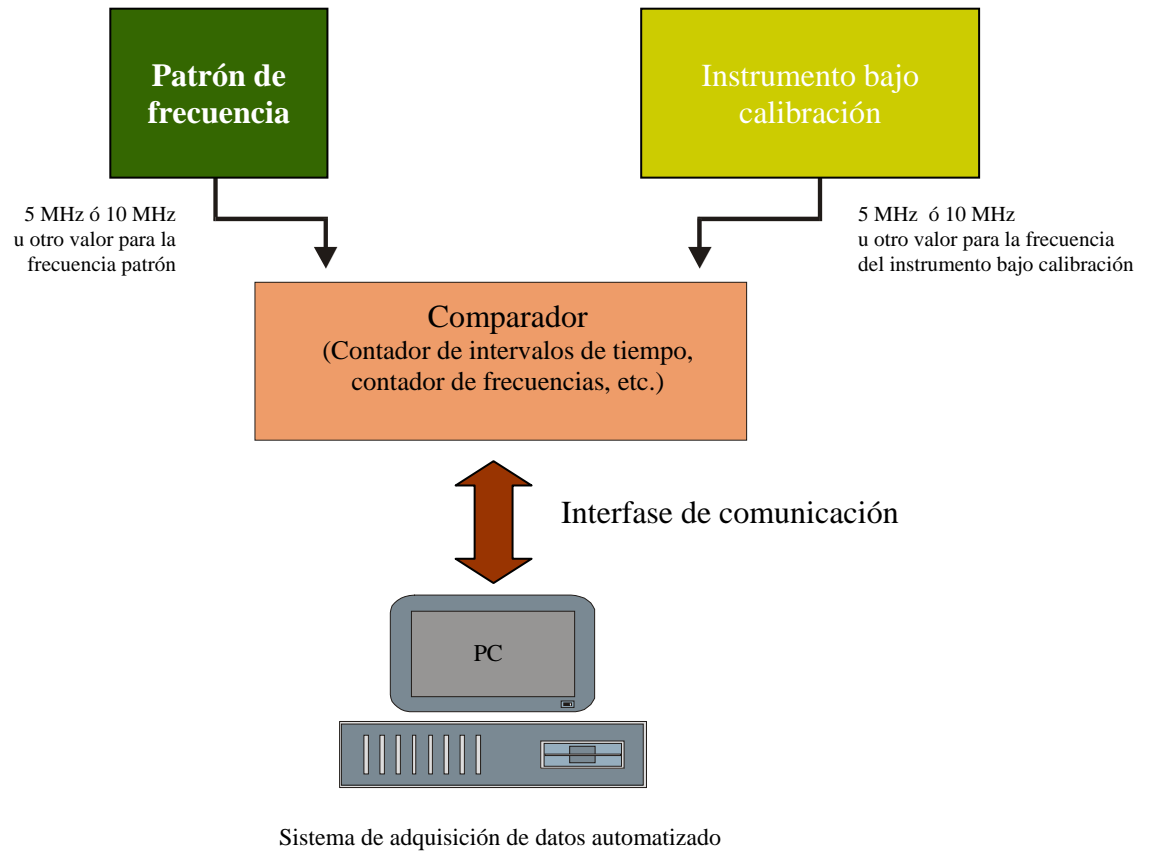


Figura 1a. Ilustración esquemática de la implementación del método de medición directa de frecuencia o de fase.

Es importante indicar que mientras sea posible, el frecuencímetro, o contador de intervalos de tiempo en su caso, deberá estar estabilizado a la frecuencia patrón del laboratorio. Usualmente los equipos utilizados en la metrología de tiempo y frecuencia (frecuencímetros, contadores de intervalos de tiempo, sintetizadores de frecuencia, etc.) cuentan con una entrada tipo BNC en su panel trasero con el objeto de estabilizar el oscilador interno del instrumento a la frecuencia de referencia del laboratorio. Una importante recomendación al utilizar este método es que se asegure que las señales de frecuencia que llegan al comparador tengan la amplitud en tensión adecuada (de acuerdo a las características del nivel de disparo del contador), así como un acoplamiento adecuado de impedancias. Un mal acoplamiento de impedancias puede ser causa de una distorsión armónica importante de las señales ocasionando eventualmente que el método no funcione adecuadamente.

En el caso particular de usar un frecuencímetro como comparador se tiene el siguiente diagrama a bloques:

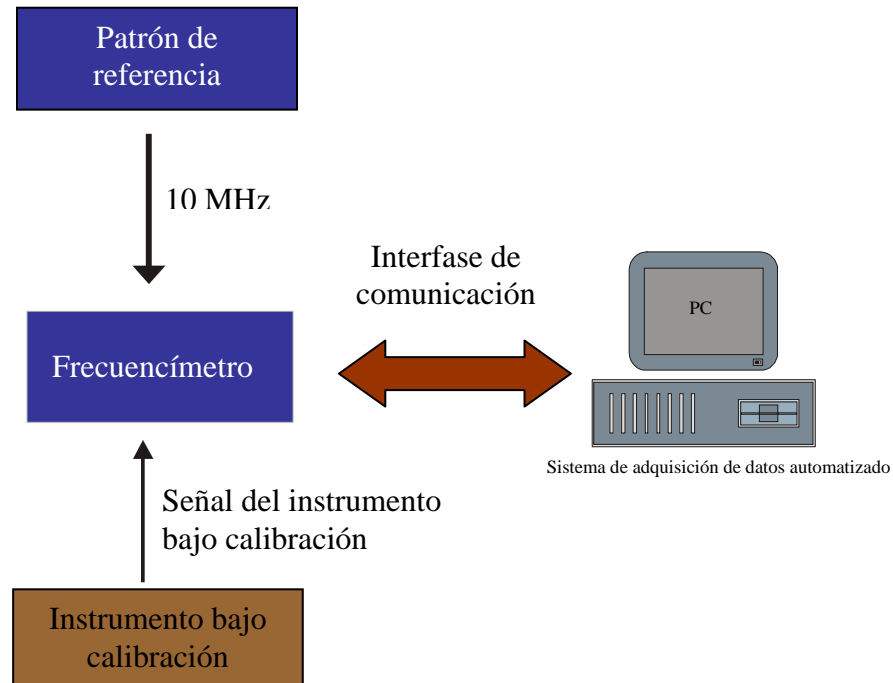


Figura 1b. Ilustración esquemática del caso particular del método de medición directa de frecuencia en donde el comparador es un frecuencímetro.

Mediciones por mezcla de frecuencias

El método de medición por mezcla de frecuencia: es usado cuando el valor de incertidumbre esperada es menor que la proporcionada por el método de medición directa. La mejora en el valor incertidumbre se logra en parte al ganar mayor resolución en la medición de frecuencia. Lo anterior puede ser entendido al considerar que en este método la frecuencia medida con el frecuencímetro es típicamente de orden de 1 kHz, o menor, con lo cual se aprovecha de menor manera la resolución del instrumento de medición. En la aplicación de este método se recomienda que la frecuencia del patrón de referencia se encuentre alrededor de los 500 Hz por arriba de la frecuencia del instrumento bajo calibración. Es necesario asegurarse que el intervalo de frecuencias de entrada y salida del multiplicador esté dentro de las frecuencias involucradas en la calibración. Como recomendación general es necesario asegurar que los niveles de tensión sean los adecuados tanto para la operación del mezclador como para el amplificador y el filtro pasa bajos.

La figura siguiente muestra un diagrama a bloques del arreglo experimental básico para implementar la técnica de medición por mezcla de frecuencias.

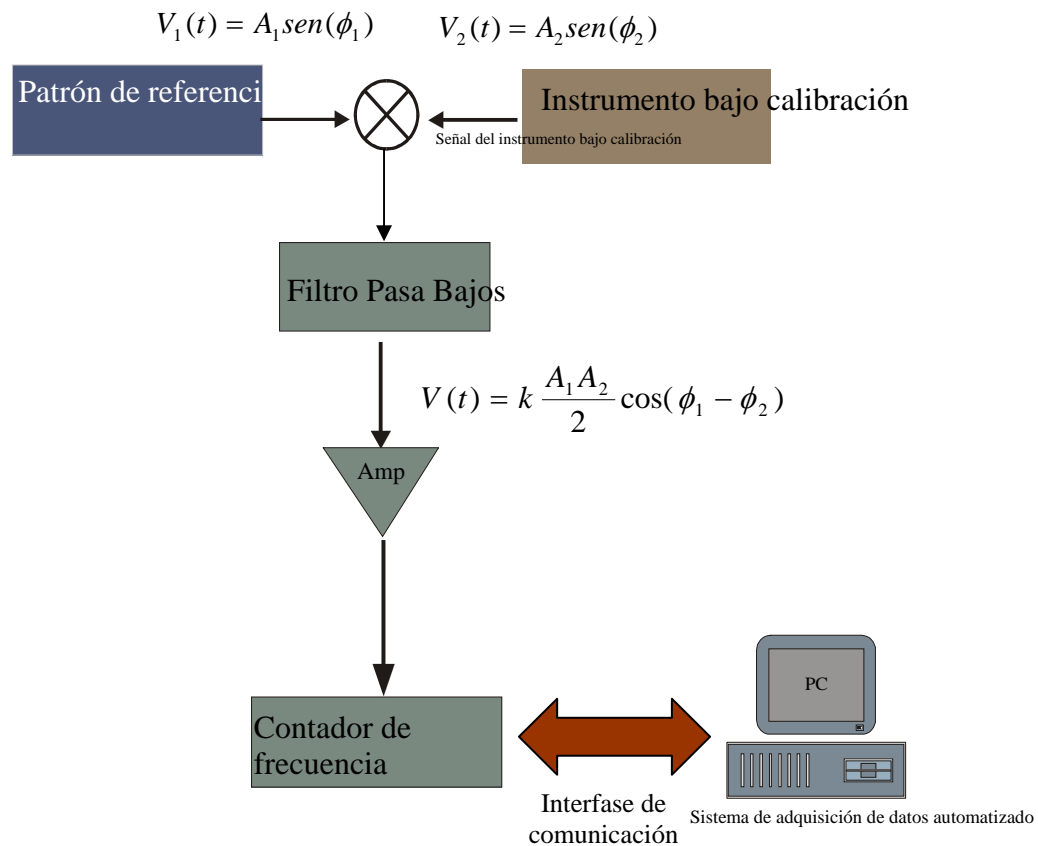


Figura 2. Ilustración esquemática de la implementación del método de medición por mezcla de frecuencias.

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

Debido a que los cronómetros usualmente no cuentan con mecanismos electrónicos para comparar directamente la frecuencia del oscilador interno con un patrón de referencia externo (como lo indicado en el primer método de esta guía) es necesario realizar la calibración por medio de mediciones de tiempo mediante las lecturas del cronómetro. Para este efecto es necesario operar el cronómetro por un tiempo suficientemente grande con el objeto de medir diferencias de tiempo claramente observables entre éste y el patrón de referencia. Los laboratorios podrán implementar distintos mecanismos de inicio/paro de los cronómetros en el proceso de calibración sin embargo el tiempo de operación del cronómetro debe ser suficientemente grande como para que los efectos de la operación en el mecanismo de inicio/paro sean pequeños comparados con las diferencias de tiempo acumuladas entre el cronómetro y el patrón de referencia.

NOTA para el Evaluador: Debe confirmar que el laboratorio implementa correctamente este método de calibración tomando cuenta de las observaciones que se indican en esta sección.

La figura 3a ilustra un caso en el cual el comportamiento típico de las mediciones de diferencia de tiempo del proceso de calibración de cronómetros es adecuada. Obsérvese cómo la dispersión de los datos al paso del tiempo es cada vez menos significativa respecto a las diferencias de tiempo. La dispersión de las mediciones alrededor del mejor ajuste lineal tiene información sobre el mecanismo de inicio/paro utilizado, pero también contiene información sobre la estabilidad en frecuencia del oscilador interno del cronómetro.

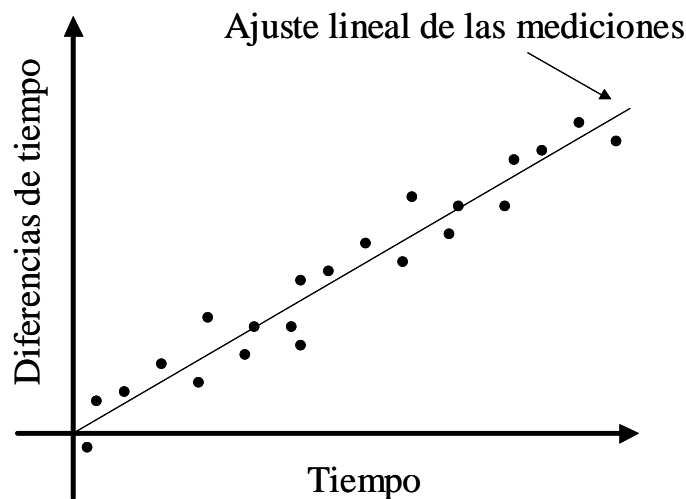


Figura 3a. Comportamiento típico de mediciones de diferencia de tiempo en el proceso de calibración de cronómetros. Obsérvese cómo la dispersión de los datos al paso del tiempo es cada vez menos significativa respecto a las diferencias de tiempo. Estas mediciones pueden utilizarse para determinar la diferencia de frecuencia entre el cronómetro y el patrón de referencia.

La figura 3b muestra un caso en el cual el tiempo de operación del cronómetro no es suficientemente grande de manera que las diferencias de tiempo acumuladas entre el cronómetro y el patrón de referencia quedan ocultas por las inestabilidades del mecanismos de inicio/paro.

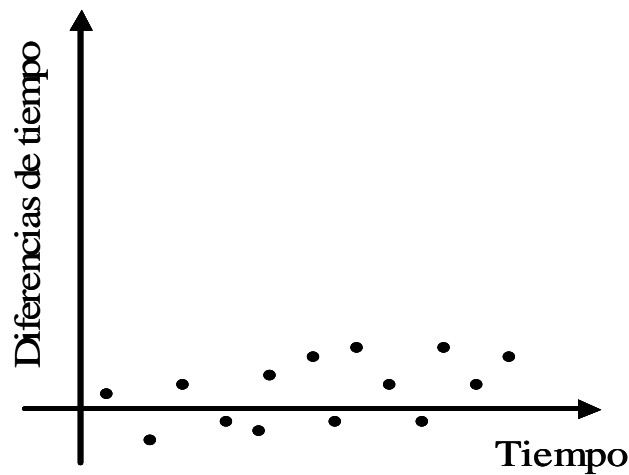


Figura 3b. Mediciones de diferencia de tiempo en el proceso de calibración de cronómetros. Obsérvese que la dispersión de los datos al paso del tiempo no permite estimar las diferencias de tiempo entre el cronómetro y el patrón de referencia, sino que, en el mejor de los casos, mediciones como estas son útiles para estimar una cota superior para la diferencia de frecuencia entre el cronómetro y el patrón de referencia.

El sistema de referencia para la calibración de cronómetros puede ser implementado básicamente bajo los siguientes dos esquemas:

1. Sistemas de referencia que utilizan diversos métodos de acceso al UTC(CNM)², entre ellos: teléfono e INTERNET (servidor cronos). El servidor cronos es accesado vía internet utilizando programas de comunicación que utilicen el protocolo de comunicación NTP (Network Time Protocol), existen comercialmente diversos programas que hacen esta función (Present Tense, Settime, entre otros). Los programas deben configurarse para acceder al servidor cronos cuya dirección electrónica es www.cronos.cenam.mx

El Acceso vía telefónica al UTC(CNM), y a los tiempos geográficos nacionales, se hace en los siguientes números telefónicos

Tiempo Universal Coordinado, UTC(CNM): 01 442 215 3902
 Tiempo del Centro: 01 442 211 0506 (=UTC(CNM) – N)
 Tiempo de la Montaña: 01 442 211 0507 (=UTC(CNM) - (N+1))
 Tiempo del Pacífico: 01 442 211 0508 (=UTC(CNM) – (N+2))

Donde N = 6 horas para el período comprendido entre el primer domingo de abril y el último domingo de octubre (tiempo de verano) y N = 5 horas para el período

² La escala de Tiempo Universal Coordinado generada por el CENAM es denotada por UTC(CNM).

- comprendido entre el último domingo de octubre y el primer domingo de abril (tiempo de invierno).
2. Sistemas de referencia para medición de tiempo cuyo oscilador es trazable al Patrón Nacional de Tiempo.

En la utilización de cualquiera de estos esquemas debe observarse la recomendación hecha con anterioridad de que los intervalos de tiempo en los cuales se opera el cronómetro deben ser suficientemente grandes para observar con claridad la diferencia de tiempos entre el cronómetro y la referencia utilizada (ver figura 3a).

5. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS

Las características metrológicas de los patrones de referencia utilizados en cada uno de los métodos que esta guía considera se muestran a continuación:

a. Mediciones directas de frecuencia o de fase

Patrón de referencia:

Sistema de medición de tiempo (comparador) cuya frecuencia del oscilador es trazable al Patrón Nacional de Tiempo.

Incertidumbre de medición: El nivel de incertidumbre del comparador debe ser, por lo menos, mejor en un factor de diez que el nivel de incertidumbre del instrumento bajo calibración. Típicamente la incertidumbre de medición del comparador se encuentra en el intervalo que va de una parte en 10^7 a una parte en 10^9

Estabilidad en frecuencia: Por lo menos mejor en un factor de diez que la estabilidad del instrumento bajo calibración. Típicamente mejor que 10^{-7} para tiempos de promediación de un segundo.

b. Mediciones por mezcla de frecuencias

Sistema de medición de tiempo cuya frecuencia del oscilador es trazable al Patrón Nacional de Tiempo.

Patrón de referencia:

Comparador (contador de intervalos de tiempo, frecuencímetro, etc)

Nivel de exactitud: El nivel de incertidumbre del comparador debe ser por lo menos mejor en un factor de diez que el nivel de incertidumbre del instrumento bajo calibración. Típicamente la incertidumbre de medición del comparador se encuentra en el intervalo que va de una parte en 10^9 a una parte en 10^{11}

Estabilidad en frecuencia: Por lo menos mejor en un factor de diez que la estabilidad del instrumento bajo calibración. Típicamente mejor que 10^{-9} para tiempos de promediación de un segundo.

c. Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

Patrón de referencia:

- i.* Sistema de medición de tiempo cuya frecuencia del oscilador es trazable al Patrón Nacional de Tiempo.

Nivel de incertidumbre: El nivel de incertidumbre del sistema de medición debe ser por lo menos mejor en un factor de diez que el nivel de incertidumbre del instrumento bajo calibración. Típicamente la incertidumbre de medición del sistema de medición se encuentra en el intervalo que va de una parte en 10^7 a una parte en 10^9

Estabilidad en frecuencia: Por lo menos mejor en un factor de diez que la estabilidad del instrumento bajo calibración. Típicamente mejor que 10^{-7} para tiempos de promediación de un segundo.

- ii.* Sistemas de referencia que utilizan diversos métodos de acceso al UTC(CNM), entre ellos: teléfono e INTERNET (servidor cronos).

Nivel de incertidumbre: En la utilización de estos sistemas de referencia es necesario considerar que el nivel de incertidumbre al acceso del UTC(CNM) por vía telefónica es del orden de 0,05 segundos. Esta incertidumbre de medición se debe al tiempo de propagación de la señal por la red telefónica y a la duración del tono (“bip”) que anuncia la hora. Sin embargo, es necesario considerar adicionalmente la incertidumbre de medición que tiene su origen en el operador del cronómetro, la cual tiene valores típicos que van de 0,1 segundos a 0,2 segundos. Es necesario observar que este nivel de incertidumbre tiende a ser menos importante en la medida que aumenta el intervalo de tiempo de medición, por ejemplo, para el caso de que el cronómetro opere durante 24 horas, la contribución relativa de esta incertidumbre de medición es del orden de $2,3 \times 10^{-6}$.

El nivel de incertidumbre al acceso del UTC(CNM) vía el servidor cronos es del orden de 0,1 segundos. También debe considerarse la incertidumbre introducida por el operario del cronómetro.

Estabilidad de la base de tiempo del oscilador de referencia: En este caso la estabilidad de la base de tiempo (que es del orden de 10^{-12} para tiempos de promediación de un segundo), es severamente degradada por el medio de propagación. La estabilidad efectiva que tiene el usuario puede aproximarse por la siguiente relación:

$$\sigma(t) \approx \frac{\Delta t}{t} \approx \frac{0.1}{t}$$

dónde t es la duración del intervalo de tiempo (en segundos) durante el cual se opera el cronómetro. Cuando el laboratorio utilice el método de acceso al UTC(CNM) vía telefónica o vía internet para la calibración de cronómetros, la calibración debe realizarse para tiempos mayores a 24 horas.

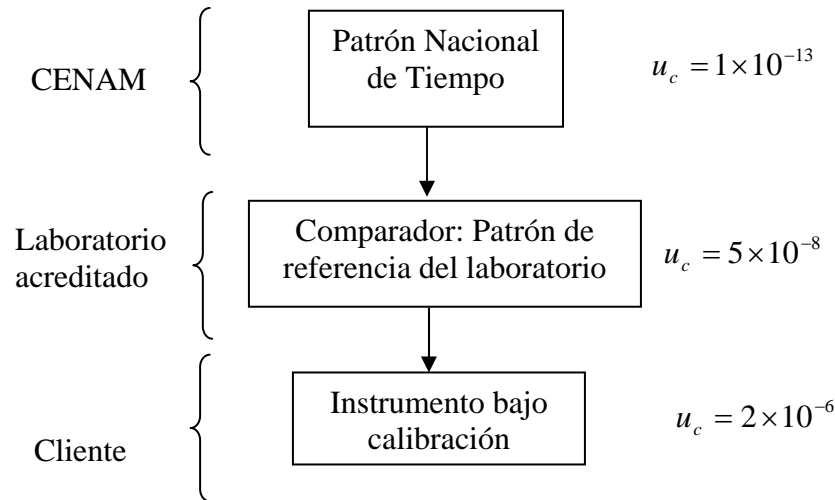
6. TRAZABILIDAD DE LAS MEDICIONES

Con el objeto de asegurar correctamente la trazabilidad de las mediciones realizadas por los laboratorios acreditados, o en proceso de acreditación, bajo el esquema de la emca, la incertidumbre de medición combinada debe incorporar invariablemente los efectos de inestabilidad de frecuencia de los osciladores bajo calibración, expresada ésta última en términos de la desviación de Allan. Los informes de calibración que expidan los laboratorios acreditados deberán, en todos los casos, expresar explícitamente la incertidumbre de medición con referencia a sus patrones de referencia y presentar información de la trazabilidad de los patrones del laboratorio respecto al Patrón Nacional de Tiempo. Es importante indicar que en cualquier caso los patrones de referencia de los laboratorios deberán contar con su correspondiente certificado de calibración expedido por el CENAM o por un laboratorio acreditado con patrones de referencia que sean trazables a los patrones nacionales mantenidos en CENAM.

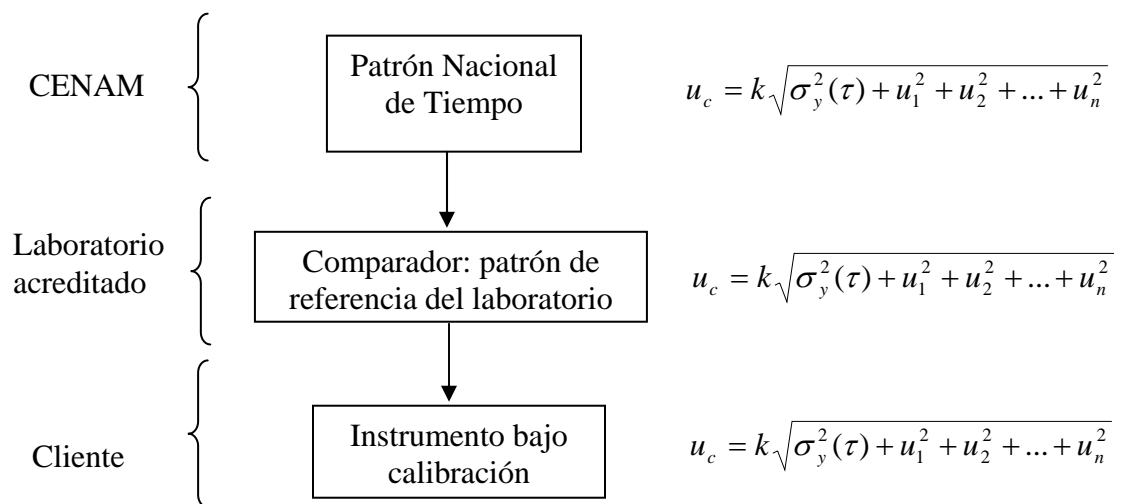
Se muestra a continuación ejemplos de cartas de trazabilidad para cada uno de los métodos de medición presentados en esta guía técnica. Es necesario observar en los siguientes ejemplos de trazabilidad de las mediciones, que la estabilidad de la base de tiempo del comparador del laboratorio ha sido medida con la varianza de Allan. De acuerdo al nivel de incertidumbre requerido por el servicio de calibración, la trazabilidad de las mediciones requiere que para el sistema de referencia del laboratorio las mediciones de estabilidad se realicen en la base de tiempo del comparador o en una base de tiempo externa al comparador.

Mediciones directas de frecuencia

Carta de trazabilidad donde las incertidumbres de medición son expresadas para tiempos de promediación específicos, por ejemplo, de 1 segundo, como en los siguientes casos:



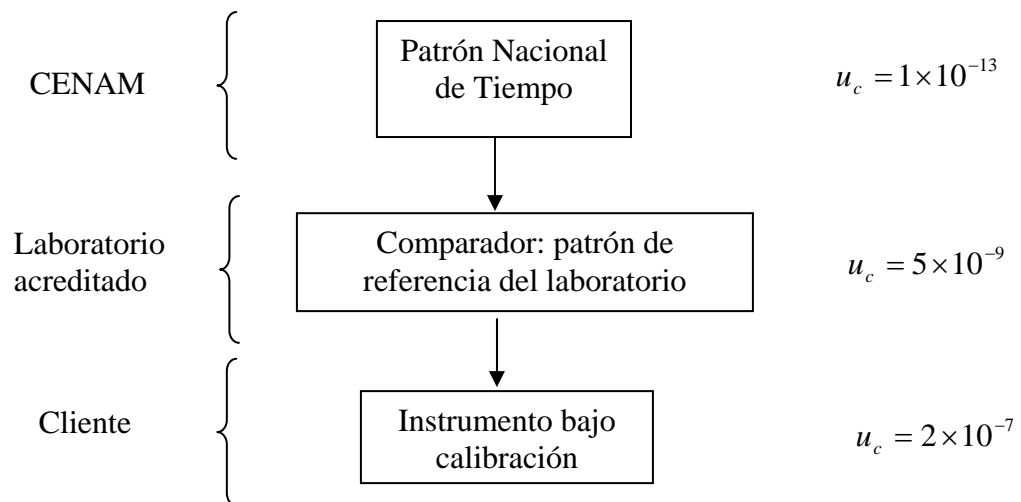
En seguida se muestra un ejemplo de carta de trazabilidad donde las incertidumbres de medición son expresadas para tiempos de promediación arbitrarios, pero dentro de cierto intervalo específico que es determinado por el tiempo mínimo de toma de mediciones y el tiempo de duración del proceso de medición. El valor mínimo de τ está dado por el tiempo entre mediciones, mientras que el valor máximo es cercano a la tercera parte del tiempo de duración del proceso de medición.



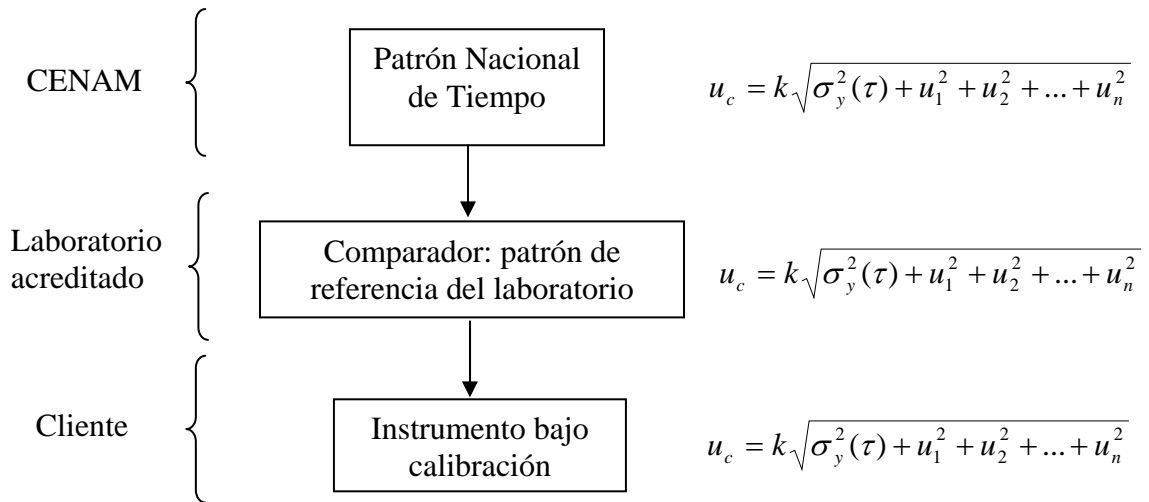
Donde $k, u_c, \sigma_y^2(\tau), u_1^2, u_2^2, \dots, u_n^2$ son específicos para cada uno de los niveles de la carta de trazabilidad.

Mediciones por mezcla de frecuencias

Carta de trazabilidad donde las incertidumbres de medición son expresadas para tiempos de promediación específicos, por ejemplo, de 1 segundo.

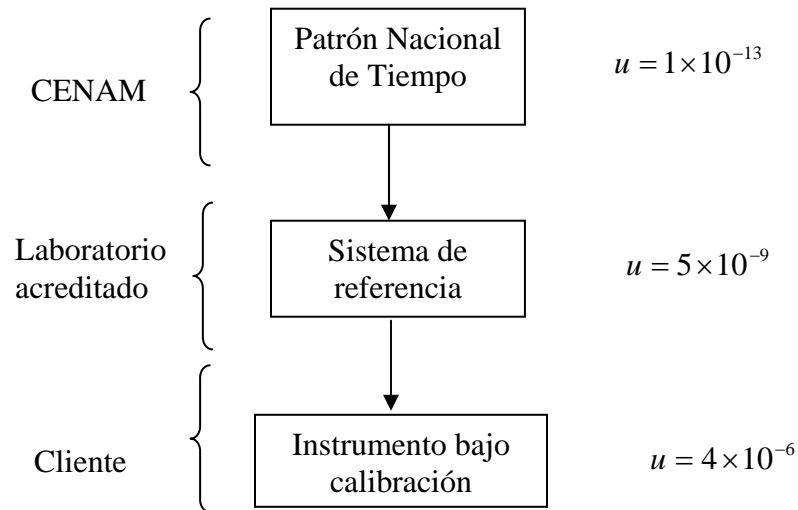


A continuación se da un ejemplo de carta de trazabilidad donde las incertidumbres de medición son expresadas para tiempos de promediación arbitrarios, pero acotados dentro de cierto intervalo específico, que es determinado por el tiempo mínimo de toma de mediciones y el tiempo de duración del proceso de medición. El valor mínimo de τ está dado por el tiempo entre mediciones, mientras que el valor máximo es cercano a la tercera parte del tiempo de duración del proceso de medición.



Donde $k, u_c, \sigma_y^2(\tau), u_1^2, u_2^2, \dots, u_n^2$ son específicos para cada uno de los niveles de la carta de trazabilidad.

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros



Para el caso en el que el sistema de referencia es un oscilador local, éste deberá ser trazable al Patrón Nacional de Tiempo. Para el caso en el que se use un sistema de referencia que se apoye en el acceso al Tiempo Universal Coordinado del CENAM (o tiempo de las zonas horarias nacionales) vía telefónica o vía INTERNET, la expresión de la incertidumbre deberá contemplar las diversas fuentes de incertidumbre que intervienen en el sistema.

7. INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

La incertidumbre de medición será expresada en términos de la incertidumbre combinada definida en la Guía BIPM/ISO para la expresión de incertidumbre de medición. La incertidumbre combinada debe incorporar invariablemente los efectos de inestabilidad³ de la frecuencia de los osciladores bajo calibración, expresada en términos de la desviación⁴ de Allan.

Es necesario también tomar en consideración las diversas fuentes de incertidumbre que intervienen en el proceso de calibración, entre ellas las incertidumbres en las mediciones individuales que realiza el sistema de medición (frecuencímetro por ejemplo), las cuales pueden depender de otros parámetros como los tiempos de compuerta y los niveles de disparo.

Por otro lado, las diferentes componentes de la incertidumbre combinada deberán ser integradas siguiendo la recomendación de la Guía ISO/BIPM para la expresión de incertidumbres, esto es, utilizando el criterio de la suma cuadrática. Es importante hacer la siguiente observación, es posible que la consideración de algunas fuentes de incertidumbre contribuyan de manera despreciable al valor de la incertidumbre combinada, en este caso se podrá omitir simplemente dicha componente en la suma cuadrática de las incertidumbres.

Es importante resaltar las bondades del uso de la varianza de Allan como estimador de la estabilidad de en frecuencia de un oscilador. Una correcta estimación de la varianza de Allan requiere de un gran número de mediciones. Típicamente para la calibración de un oscilador se recomienda realizar una medición cada segundo por un intervalo de por lo menos 24 horas. Bajo estas condiciones, el número total de mediciones realizadas es de 86400. Cada una de las mediciones tiene asociada una incertidumbre de acuerdo a las características del sistema de medición. Dicha incertidumbre puede ser, en principio, estimada siguiendo las recomendaciones del fabricante del equipo de medición (dicho equipo puede ser un frecuencímetro, por ejemplo). Sin embargo, cuando se utiliza la varianza de Allan para estimar la estabilidad en frecuencia con ese número de mediciones, el valor resultante de la varianza de Allan ya toma en consideración la incertidumbre asociada a cada medición. En este caso, en la estimación de la incertidumbre combinada para tiempos de promediación que corresponden al tiempo entre tomas de mediciones, no se requiere sumar en cuadratura la varianza de Allan con

³ Es común encontrar en la literatura de la Metrología de Tiempo y Frecuencia que los términos “estabilidad en frecuencia” e “inestabilidad en frecuencia” se usan de manera intercambiable. Sin embargo vale decir que, estrictamente hablando, la varianza de Allan es una medida para la inestabilidad de frecuencia.

⁴ Los términos “varianza de Allan” y “desviación de Allan” se refieren, respectivamente, a $\sigma_y^2(\tau)$ y $\sigma_y(\tau)$.

Es muy importante tener en claro que la estabilidad en frecuencia es medida por $\sigma_y(\tau)$ y no por $\sigma_y^2(\tau)$.

la incertidumbre de cada medición, ya que la varianza de Allan ya la considera. Esto también, es válido para tiempos de promediación mayores que el tiempo entre mediciones. Finalmente es necesario hacer la siguiente consideración, el valor numérico de la varianza de Allan mide la estabilidad relativa entre el oscilador bajo calibración y el oscilador de referencia y ya incluye la incertidumbre asociada a cada medición individual introducida por el propio sistema de medición debida a diversos parámetros como: tiempo de compuerta, nivel de actuación (disparo) del disparador (trigger) y estabilidad de la base de tiempo del sistema de medición. De aquí se desprende la importancia de asegurar que la estabilidad del sistema de medición sea por lo menos diez veces mejor que la estabilidad del instrumento bajo calibración. Bajo esta condición, el valor de estabilidad estimado por medio de la varianza de Allan puede ser asociado directamente a la estabilidad del instrumento bajo calibración.

Dada la importancia de la varianza de Allan en la evaluación de incertidumbres dentro de los procesos de calibración de osciladores y bases de tiempo, en el apéndice de esta guía técnica se incluye la definición de la varianza y desviación de Allan así como algunos aspectos relevantes en cuanto a la relación de este estimador de estabilidad respecto a los tiempos de promediación τ .

EJEMPLOS DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES.

Mediciones directas de frecuencia

Con el propósito de ilustrar la estimación de incertidumbre de medición, a continuación se presenta un ejemplo para el caso de mediciones directas de frecuencia. Este caso se refiere a la calibración de un oscilador cuya base de tiempo tiene una frecuencia con valor nominal de 10 MHz. Las mediciones de frecuencia realizadas se muestran en la figura 4. En el proceso de medición se utilizó un contador de intervalos de tiempo marca Stanford Research Systems, modelo SR620, cuya base de tiempo fue estabilizada a una referencia externa con una desviación fraccional de frecuencia $\frac{\Delta f}{f}$ respecto al

Patrón Nacional de Tiempo dada por:

$$\frac{\Delta f}{f} = -2 \times 10^{-11} \pm \sigma_y(\tau)$$

en donde $\sigma_y(\tau)$ es la desviación de Allan, la cual tiene los siguientes valores:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{8 \times 10^{-10}}{\tau} \quad \text{para } 1 \text{ s} \leq \tau \leq 10^3 \text{ s}$$
$$\sigma_y(\tau) = 4 \times 10^{-12} \quad \text{para } 10^3 \text{ s} \leq \tau \leq 10^5 \text{ s}$$

Se realizaron mediciones de frecuencia con tiempos de compuerta de 1 segundo, durante un intervalo de tiempo de 2 horas. En los procesos de calibración de osciladores es necesario tomar un número grande de mediciones, que de ser posible se realicen por intervalos de tiempo de 24 horas. Sin embargo, en algunas ocasiones solamente es posible realizar mediciones por un intervalo de tiempo menor, como en este ejemplo. La duración del intervalo de tiempo durante el cual se realizan las mediciones aportará información sobre las características metrológicas del instrumento bajo calibración, la cual es acotada por el intervalo de medición. En este ejemplo, las mediciones contienen información sobre la estabilidad del oscilador para tiempos que van desde un segundo hasta tiempos máximos de 40 minutos, careciendo en este caso de información sobre la estabilidad del oscilador para tiempos menores a 1 segundo y para tiempos mayores que 40 minutos. En el caso en el que se requiera conocer información sobre la estabilidad para tiempos mayores a 40 minutos, por ejemplo, para 10 horas, entonces será necesario realizar las mediciones por un tiempo mayor a 30 horas.

La figura 5 muestra la estabilidad de las mediciones estimada por medio de la desviación de Allan. Es conveniente hacer notar que la desviación de Allan calculada a partir de las mediciones mostradas en la figura 4, estrictamente hablando, mide la inestabilidad en frecuencia relativa entre el instrumento bajo calibración y el patrón de referencia del laboratorio. Sin embargo, debido a que la estabilidad en frecuencia del patrón de referencia del laboratorio es por lo menos un orden de magnitud mejor (para cada τ) que la estabilidad en frecuencia del instrumento bajo calibración, en una buena aproximación se puede afirmar que la figura 5 se refiere a la estabilidad en frecuencia del instrumento bajo calibración. En un análisis más estricto, la estabilidad del oscilador bajo calibración $\sigma_{y_c}^2(\tau)$ puede escribirse como⁵:

$$\sigma_{y_c}^2(\tau) = \sigma_y^2(\tau) - \sigma_{y_r}^2(\tau)$$

donde: $\sigma_y^2(\tau)$ es la varianza de Allan calculada a partir de las mediciones de frecuencia, y $\sigma_{y_r}^2(\tau)$ es la varianza de Allan del patrón de referencia del laboratorio.

⁵ En esta relación se asume que no existe correlación entre la estabilidad de frecuencia del oscilador bajo calibración y la estabilidad en frecuencia del patrón de referencia del laboratorio.

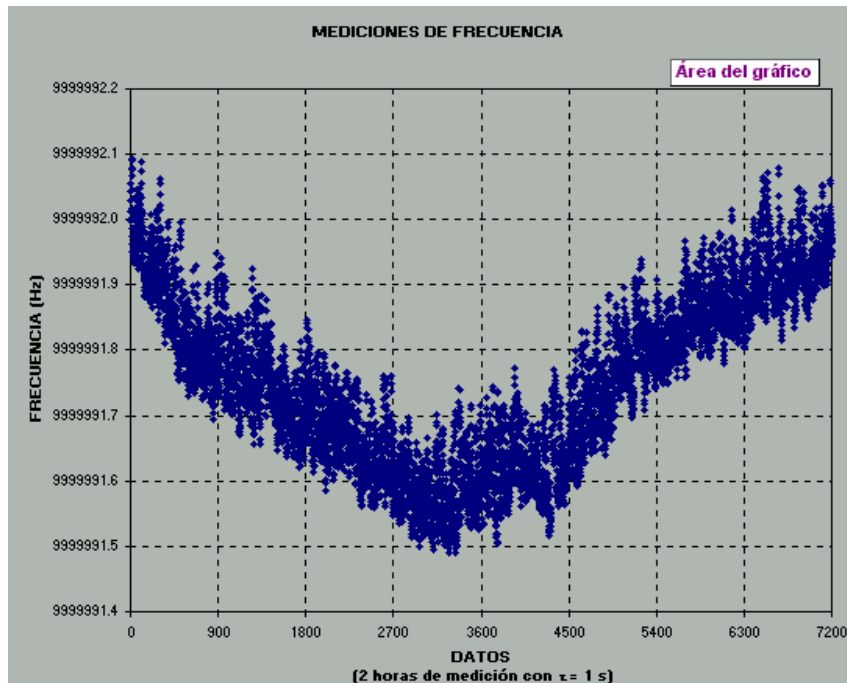


Figura 4. Mediciones de frecuencia realizadas por el método de medición directa de frecuencia. El tiempo de compuerta del instrumento de medición fue de 1 segundo cuya base de tiempo fue estabilizada a una referencia externa.

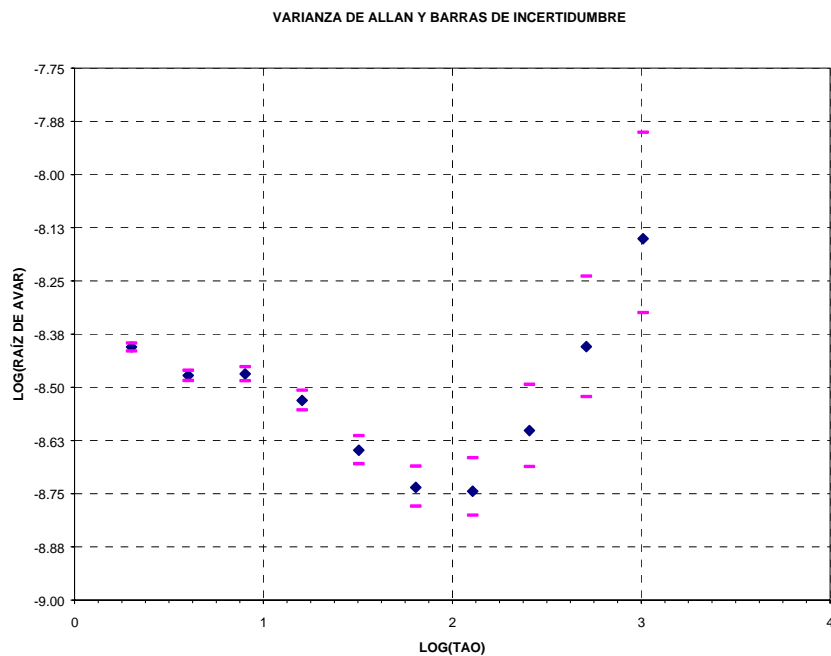


Figura 5. Estabilidad en frecuencia de las mediciones mostradas en la figura 4.

Obsérvese en la figura 4 que el oscilador bajo calibración presenta una desviación de frecuencia sistemática hacia bajas frecuencias. La frecuencia promedio \bar{f} del oscilador es:

$$\bar{f} = 9999991,75 \text{ Hz}$$

Sin embargo, es necesario cuantificar la dispersión de las mediciones alrededor de esta frecuencia promedio. En la metrología de tiempo y frecuencia, esta dispersión es estimada por medio de la desviación de Allan, de manera que la frecuencia f de salida del oscilador bajo calibración puede escribirse como:

$$f = 9\,999\,991,75 (1 \pm \sigma_y(\tau)) \text{ Hz,}$$

NOTA para el evaluador: El evaluador debe confirmar que el informe de calibración que expide el laboratorio expresa la desviación de frecuencia en términos de la frecuencia nominal del oscilador

Es conveniente expresar la desviación de frecuencia en términos de la frecuencia nominal, esto es, la desviación fraccional de frecuencia $\frac{\Delta f}{f}$ la cual está dada por:

$$\frac{\Delta f}{f_o} = -8,25 \times 10^{-7} \pm \sigma_y(\tau)$$

Es interesante analizar las bondades que presenta la expresión de la desviación de frecuencia en términos de la frecuencia nominal. Para el caso de sintetizadores de frecuencia o de contadores de frecuencia, el valor de la desviación fraccional de frecuencia de la base de tiempo es constante en todo el ancho de banda del instrumento.

Es interesante observar en este caso que el valor de la desviación fraccional de frecuencia que presentan las mediciones de la figura 4 es mucho menor a las desviaciones fraccionales de frecuencia del sistema de medición, la cual es del orden de partes en 10^{11} . De esta manera, el error sistemático del instrumento bajo calibración es mucho mayor que el error sistemático del sistema de medición de referencia, por lo que podemos despreciar los efectos de éste último. Una situación similar ocurre con los efectos de la estabilidad en frecuencia, en donde el sistema de medición presenta una estabilidad en frecuencia que es un orden de magnitud menor que la estabilidad del instrumento bajo calibración.

Otra bondad de la varianza de Allan estimada con un número suficientemente grande de mediciones, es que el valor de la estabilidad de la frecuencia del oscilador bajo calibración, como se muestra en la figura 5, incluye todos los parámetros que perturban la operación del instrumento bajo calibración (temperatura, vibraciones, humedad, etc.).

Por esta razón es importante que en el informe de calibración se anoten con claridad las condiciones ambientales bajo las cuales se llevó a cabo el proceso de calibración. La incorporación de la varianza de Allan como estimador de la estabilidad de frecuencia en los informes de calibración, y como parte fundamental en la estimación de incertidumbres, es de suma importancia ya que engloba la estimación de los errores aleatorios en el desempeño de los osciladores.

8. VALIDACIÓN DE MÉTODOS

El laboratorio bajo evaluación debe demostrar la validación de los métodos de medición que emplea en sus servicios de calibración. Para ello, puede optar por alguna de las alternativas de validación de métodos de medición que propone la norma NMX 17025 IMNC 2006, por ejemplo, participando en una comparación con otros laboratorios de calibración.

9. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN

Mediciones directas de frecuencia

- a. Asegurar el buen estado del instrumento bajo calibración.
- b. Asegurar que las condiciones ambientales del laboratorio se encuentran dentro de los valores esperados durante todo el proceso de calibración, incluyendo el periodo de estabilización. Se debe asegurar que las condiciones ambientales del laboratorio son las mismas bajo las cuales fueron calibrados sus patrones de referencia.
- c. Asegurar que la tensión eléctrica de la señal del instrumento bajo calibración se encuentra dentro de los valores adecuados al nivel de disparo del comparador de referencia del laboratorio.
- d. Asegurar que los acoplamientos de impedancia entre el comparador de referencia y el instrumento bajo calibración son correctos. Se debe referir a las especificaciones técnicas del comparador de referencia y del instrumento bajo calibración.
- e. Asegurar que el tiempo de compuerta del comparador es el adecuado. Un criterio para la selección del tiempo de compuerta está dado por el tiempo mínimo de promediación (τ mínimo) en la varianza de Allan.
- f. Asegurar el buen estado de los cables y conexiones.
- g. Asegurar que el periodo de estabilización del instrumento bajo calibración es el adecuado. En este punto se recomienda consultar su manual operación. En el caso de que no se tenga el manual del instrumento bajo calibración, se recomienda dar un periodo de estabilización de por lo menos 6 horas antes de iniciar el proceso de calibración.
- h. Asegurar que el sistema de adquisición de datos funcione correctamente.

Mediciones por mezcla de frecuencias

- a. Las mismas que en el caso de mediciones directas de frecuencia.
- b. Asegurar que los anchos de banda (de las entradas y de la salida) del mezclador de frecuencias son adecuadas para las frecuencias involucradas en el proceso de calibración (para la entrada: frecuencia del patrón de referencia y frecuencia del instrumento bajo calibración, para la salida: diferencia de frecuencias entre el instrumento bajo calibración y el patrón de referencia)
- c. Asegurar que el amplificador es el adecuado tanto para los niveles de tensión de la salida del mezclador como para los niveles de tensión a la entrada del comprador. ñ

Mediciones de intervalos de tiempo con cronómetros

Para el caso en que se utilice un oscilador local como referencia

- a. Asegurar el buen estado del instrumento bajo calibración.
- b. Asegurar que las condiciones ambientales del laboratorio se encuentran dentro de los valores esperados durante todo el proceso de calibración, incluyendo el periodo de estabilización.
- c. Asegurar el buen estado de los cables y conexiones.
- d. Asegurar que el periodo de estabilización es el adecuado. En este punto se recomienda consultar el manual de los instrumentos.
- e. Para el caso en el que se tenga implementado un mecanismo de inicio/paro automático, asegurar el buen funcionamiento del mecanismo.

Para el caso en el que se use un sistema de referencia que se apoye en el acceso al Tiempo Universal Coordinado del CENAM (o tiempo de las zonas horarias nacionales) vía telefónica o vía internet.

- a. Asegurar el buen estado del instrumento bajo calibración
- b. Asegurar el correcto funcionamiento de los medios de comunicación para acceder al Tiempo Universal Coordinado del CENAM

10. BIBLIOGRAFÍA

Characterization of Clocks and Oscillators, Nota Técnica no. 1337 del NIST, editada por D.B. Sullivan, D.W. Allan, D.A. Howe, F.L. Walls, 1990.

NMX CH 140 2002, Estimación de la Incertidumbre de Medición; NMX 17025 IMNC 2006

Políticas referentes a la trazabilidad e incertidumbre de mediciones, Serie documentos, ema, <http://www.ema.org.mx/ema/pdf/PROCEDIMIENTOS/TRAZABILIDAD%20E%20INCERTIDUMBRE%20SC-2002-12-12.pdf>, 2002.

11. ANEXO

LA VARIANZA DE ALLAN

En este apéndice se denota por $x(t)$ a la diferencia de fase entre dos señales de frecuencia $V_1(t)$ y $V_2(t)$ de la misma frecuencia nominal ν_0 , expresada en unidades de tiempo y evaluada al tiempo t . La variable x puede interpretarse como una función que en cada tiempo t toma el valor $x(t)$. Para la determinación experimental de la función $x(t)$, generalmente se recurre a mediciones de diferencia de fase $x_i = x(t_i)$, igualmente espaciadas en el tiempo, obteniendo muestras M_x con un número finito de mediciones,

$$M_x = \{x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots, x(t_N)\} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \quad (1)$$

dónde generalmente $N \gg 1$ y además se cumple con la condición $t_{i+1} - t_i = \tau_0$, ésto es, las mediciones x_i están igualmente espaciadas en el tiempo.

Se denota por $\nu(t)$ a la frecuencia del oscilador bajo calibración y por ν_0 a la frecuencia del oscilador de referencia. La diferencia fraccional de frecuencias entre dos osciladores, denotada por $y(t)$ y determinada al tiempo t , está definida por la relación:

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0} = \frac{d}{dt} x(t) \quad (2)$$

Cuándo la única información disponible de x son muestras M_x entonces $y(t)$ puede aproximarse a:

$$y_i = y(t_i) = \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{\tau_0} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau_0} \quad (3)$$

en el intervalo $[t_i, t_{i+1}]$. En la expresión anterior $y(t)$ es una cantidad sin unidades, que es útil para la descripción del desempeño metrológico de osciladores. De la muestra M_x se obtiene una submuestra M_y de diferencias fraccionales de frecuencia:

$$M_y = \{y(t_1), y(t_2), y(t_3), \dots, y(t_{N-1})\} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_{N-1}\} \quad (4)$$

con $N-1$ elementos. La diferencia de fase $x(t)$ entre los dos osciladores, puede ser escrita en términos de $y(t)$ de acuerdo a la relación:

$$x(t) = \int_0^t y(t') dt' \quad (5)$$

Considérense las $N-2$ submuestras definidas de la siguiente manera:

$$\{y_1, y_2\}, \{y_2, y_3\}, \{y_3, y_4\}, \dots, \{y_{N-2}, y_{N-1}\} \quad (6)$$

de la muestra M_y dada en la ecuación definida por las relaciones (3) y (4). Se denota por σ_i^2 a la varianza estándar de la submuestra $\{y_i, y_{i+1}\}$. La varianza de Allan, σ_y^2 , de la muestra M_y está definida por la relación:

$$\sigma_y^2 = \langle \sigma_i^2 \rangle \quad (7)$$

donde $\langle \cdot \rangle$ significa promedio⁶. En términos de las varianzas fraccionales de frecuencia, y_i , la varianza de Allan puede ser escrita en la forma

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} \langle (\Delta y_i)^2 \rangle \quad (8)$$

donde $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$, o en términos de las diferencias de fase x_i

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2\tau_0^2} \langle (\Delta^2 x_i)^2 \rangle \quad (9)$$

con $\Delta^2 x_i = y_{i+1} - y_i = x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i$, es decir:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2\tau_0^2 (N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2 \quad (10)$$

σ_y^2 es una medida de la estabilidad en frecuencia del oscilador bajo prueba para tiempos de observación (o promediación) de τ_0 . De la muestra M_x se puede obtener la estabilidad en frecuencia del oscilador bajo prueba para tiempos de promediación τ que son múltiplos enteros de τ_0 , $\tau = m\tau_0$ con $m=1, 2, 3, \dots, \lfloor N/3 \rfloor$. Se puede proceder de la siguiente manera: en la muestra

$$M_x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \quad (11)$$

se toma una de las m submuestras de la forma

$$M_x' = \{x_k, x_{k+m}, x_{k+2m}, \dots, x_{k+lm}\} \quad (12)$$

⁶ En la definición estrictamente formal de la varianza de Allan, el promedio $\langle \cdot \rangle$ se considera que se estima sobre infinitas varianzas σ_i^2 . Por supuesto, esto tiene restricciones experimentales.

con $1 \leq k \leq m-1$ y $(N-m-k)/m \leq 1 \leq (N-m)/m$. Por facilidad se puede tomar $k=1$; en consecuencia, l es la parte entera del cociente $(N-1)/M$. La varianza de Allan calculada a partir de esta muestra es una estimación de la varianza de Allan para tiempos de promediación de $\tau = m\tau_0^7$ de la muestra M_x .

La dependencia funcional de σ_y^2 respecto al parámetro τ es de la forma $\sigma_y^2 \sim \tau^\mu$, de manera que σ_y^2 es función de τ y por lo tanto, la notación $\sigma_y^2(\tau)$ está justificada.

Los cinco tipos de ruido presentes en los osciladores corresponden a diferentes valores del parámetro μ en la varianza de Allan de acuerdo a la siguiente relación:

- | | |
|---------------|----------------------------------|
| 1) $\mu = 1$ | Random walk frequency modulation |
| 2) $\mu = 0$ | Flicker frequency modulation |
| 3) $\mu = -1$ | White frequency modulation |
| 4) $\mu = -2$ | Flicker phase modulation |
| 5) $\mu = -2$ | White phase modulation |

A la raíz cuadrada positiva de la Varianza de Allan se le llama desviación de Allan. En la figura siguiente se muestra una gráfica típica de estabilidad de frecuencia medida en términos de desviación de Allan. Obsérvese la dependencia lineal por intervalos de $\log \sigma_y^2$ respecto de la variable $\log \tau$.

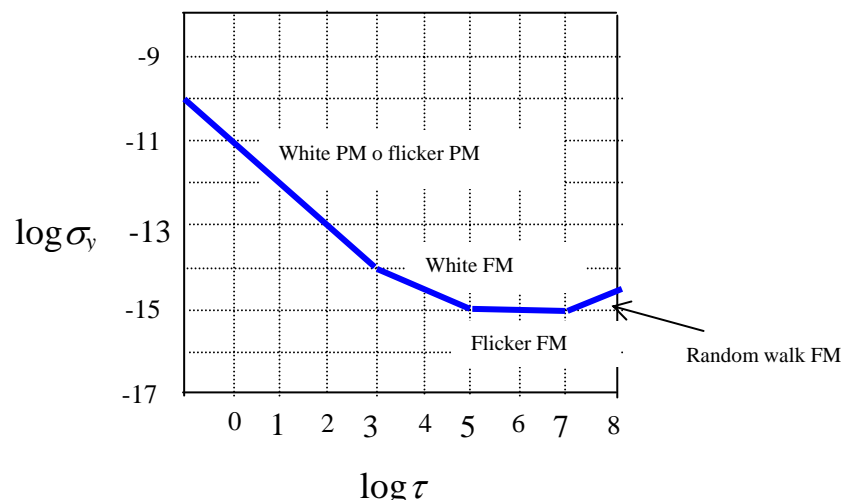


Figura 2.1. Dependencia típica de la estabilidad en frecuencia de osciladores de alta exactitud, medida en términos de la desviación de Allan.

⁷ Nótese que de la muestra M_x sólo se puede obtener la estabilidad en frecuencia del oscilador bajo prueba para tiempos no menores que τ_0 . En el caso que sea necesario calcular la estabilidad para tiempos de promediación $\tau' < \tau_0$ será necesario realizar un experimento para obtener una muestra de mediciones $x_i = x(t_i)$ con la condición $t_{i+1} - t_i < \tau'/k$, donde k es un entero positivo.

IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS

INCISO	PÁGINA	CAMBIO(S)
PRESENTACIÓN	3	Se actualizó la fecha de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 por NMX-EC-17025-IMNC-2006
8	25	Se actualizó la fecha de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 por NMX-EC-17025-IMNC-2006
10	26	Se actualizó la fecha de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 por NMX-EC-17025-IMNC-2006 y la de NMX-CH-140-IMNC-2000 por NMX-CH-140-IMNC-2002
Observaciones:		