



# Calibración de cronómetros digitales por el método de inducción con una incertidumbre de medición $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$

Henry Diaz\*, Henry Postigo†

\*Responsable del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del Servicio Nacional de Metrología (SNM-INDECOPI), Lima - Perú [hdiaz@indecopi.gob.pe](mailto:hdiaz@indecopi.gob.pe)

†Sub jefe del Servicio Nacional de Metrología (SNM-INDECOPI), Lima - Perú [hpostigo@indecopi.gob.pe](mailto:hpostigo@indecopi.gob.pe)

**Resumen** — En este trabajo se describe un sistema detector de frecuencias, el cual es utilizado para calibrar cronómetros digitales por el método de inducción, midiendo la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro la cual es proporcional a su base de tiempo obteniendo así el error del cronómetro con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$ .

**Palabras claves** — Sistema detector de frecuencias, calibración de cronómetros digitales, método de inducción.

## I. INTRODUCCIÓN

Por un buen tiempo el SNM-INDECOPI se encargaba de realizar la calibración de cronómetros por el método por comparación directa del cronómetro a calibrar con un cronómetro calibrado, los que eran filmados por un determinado tiempo y luego visualizados para determinar el error. Este método se implementaba con poco equipamiento pero su desarrollo demandaba bastante tiempo tanto en la toma de datos como en su procesamiento, reportando además una incertidumbre alta. Con la creación del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia en el SNM-INDECOPI se planteó la necesidad de implementar un nuevo método de calibración que emplee menos tiempo en su realización y permita obtener una menor incertidumbre, esto último debido a que los cronómetros actuales presentan cada vez mejores exactitudes.

Por este motivo fue necesario realizar una revisión de los métodos de calibración existentes, encontrándose que algunos Institutos Nacionales de Metrología (INM) están aplicando un método de calibración, [1], [2], [3], que permite calibrar cronómetros en corto tiempo y sin necesidad de activarlo,

eliminando así varios aportes de gran influencia en el presupuesto de incertidumbre que se consideran cuando se utiliza el método por comparación directa. Por lo tanto se consideró conveniente implementar el método de inducción [2], basado en desarrollar un sistema detector de frecuencias para medir la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro, la cual es proporcional a la frecuencia de su base de tiempo, obteniéndose así el error del cronómetro en el tiempo con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$ .

El método de inducción se basa en el método de base de tiempo recomendado en la referencia [1], el cual se realiza con algunas variantes, no midiendo directamente la frecuencia fundamental del cronómetro sino un submúltiplo de esta. Para desarrollarlo es necesario medir la frecuencia de la señal que llega al contador interno del cronómetro antes de que sea mostrado en su pantalla LCD, obteniéndose valores de 32 Hz, 28,444 Hz y 42,666 Hz, u otra frecuencia que resulte de la división del valor fundamental del cuarzo de 32 768 Hz.

## II. DETECCIÓN DE LA SEÑAL

Para capturar la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro por el método de inducción es necesario desarrollar un sistema que detecte esta señal inducida por el cronómetro. Tener en cuenta que la señal que se induce es muy pequeña y propensa de ser afectada por señales externas por lo cual es necesario utilizar una caja metálica que sirva como blindaje contra estas señales, en ella se coloca tanto el cronómetro como el sistema detector de frecuencias.

La señal es capturada por medio de una placa conductora obteniendo señales con una amplitud alrededor de 20 mV, esta señal debe ser amplificada hasta obtener valores de 4 V. La amplitud de la señal depende del tipo de cronómetro por lo que la amplificación es controlada con ayuda de un potenciómetro, el cual es regulado hasta obtener el valor de la señal deseada. Se observó que en están presentes otras señales a diferentes frecuencias pero de menor amplitud del orden de 100 mV a 600 mV, por lo que fue necesario utilizar un filtro y un comparador para eliminar las señales no deseadas cuyo nivel de referencia no fuese mayor a 4 V.

Finalmente se utiliza un circuito acondicionador de señal debido a que los pulsos capturados son de muy corta duración, alrededor de 10  $\mu$ s, y el contador de frecuencia no puede captarlos en forma adecuada. El circuito acondicionador a partir de dichos pulsos genera pulsos con una duración del orden de 100  $\mu$ s para poder realizar las mediciones. Para evitar la interferencia de la fuente de alimentación de  $\pm$  8 V, esta se colocó fuera de la caja metálica. En la figura 1 se muestra el diagrama del sistema detector de frecuencias, el cual se conecta a nuestro contador de frecuencias para realizar la medición.

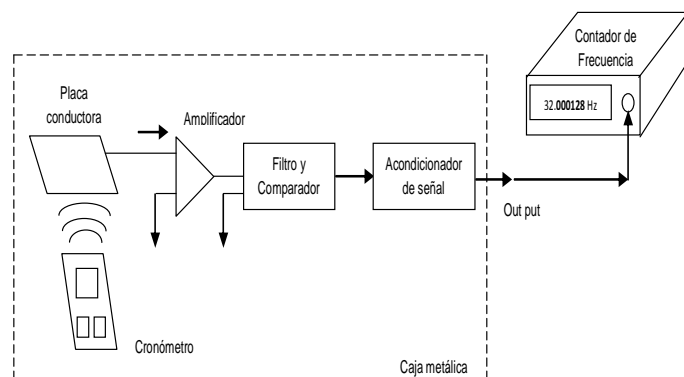


Figura 1. Diagrama del sistema detector de frecuencias.

### III. SISTEMA DE MEDICIÓN

En el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM se distribuye una señal de 5 MHz proporcionada por nuestro oscilador de Cesio, el cual pertenece a la red virtual "SIM TIME NETWORK" [7], la cual es una red de comparaciones continuas de los osciladores patrones de diversos países del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) [8]. Gracias a esta herramienta no es necesario enviar nuestro patrón a calibrar fuera del país tal como ocurre en otras magnitudes. Conseguida la trazabilidad adecuada es posible utilizar esta señal como referencia para mejorar la base de tiempo de nuestros equipos. El sistema de medición está compuesto por un sistema detector de frecuencias, un contador de frecuencias y una computadora para realizar las mediciones en forma automática.

El contador de frecuencias Fluke PM6690 se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio para mejorar sus características. La computadora debe ser tal que permita realizar mediciones con un gran número de muestras y sea compatible con el software a instalar. Para realizar las mediciones utilizamos el software "TimeView" proporcionado por el fabricante Fluke del contador de frecuencias. Para el tratamiento de los datos utilizamos el software para el análisis de mediciones de frecuencia "AMTyF" [4], software de libre disposición, desarrollado por el INM de México (CENAM) [5].

El software AMTyF, reconoce "el punto" como separador decimal y archivos con la extensión ".txt", por lo que es necesario realizar algunos cambios solo en la forma de presentación de la data obtenida para poder ser tratada, esto se puede realizar con ayuda del Word y Excel. Obteniendo la exactitud del oscilador en términos de la desviación fraccional de frecuencia ( $\Delta f/f_0$ ), y su estabilidad en términos de la desviación de Allan ( $\sigma_y(t)$ ). También es posible utilizar un osciloscopio a la salida del sistema detector de frecuencias para observar la amplitud de la señal y en caso de ser necesario ajustarla con ayuda del potenciómetro al valor de referencia de 4 V. En la figura 2 se muestra una foto del sistema de medición.

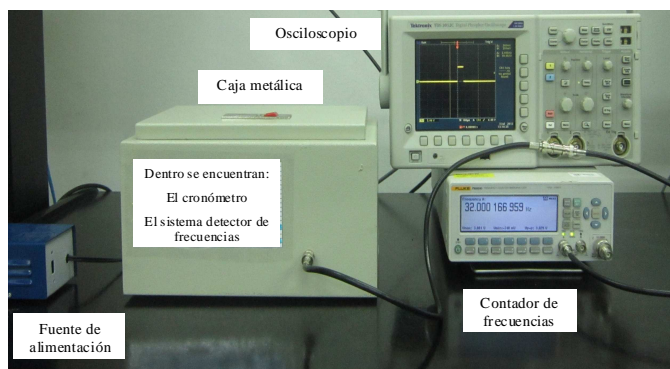


Figura 2. Foto del sistema de medición.

### IV. ANALISIS DE DATOS

En mediciones de tiempo y frecuencia es posible utilizar la siguiente ecuación para el estudio de osciladores dado por:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \left( \frac{\Delta f}{f_0} \right) \pm 2 \times \sigma_y(t) \quad (1)$$

Donde:

- f: es la frecuencia medida.
- $f_0$ : es la frecuencia nominal.
- $\Delta f/f_0$ : es la desviación fraccional de frecuencia.
- $\sigma_y(t)$ : es la desviación de Allan.

Reordenando (1) tenemos:

$$f = \left( 1 + \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) f_0 \quad (2)$$

También es posible colocar una ecuación similar a (2) en función del tiempo dado por:

$$t = \left( 1 + \frac{\overline{\Delta t}}{t_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) t_0 \quad (3)$$

De (2) es posible observar que si  $\overline{\Delta f}/f_0$  es positivo, se tiene que la frecuencia medida es mayor a la frecuencia nominal, por lo cual el cronómetro va a contar de más, entonces el cronómetro se adelanta ( $\overline{\Delta t}/t_0 > 0$ ). Si  $\overline{\Delta f}/f_0$  es negativo el cronómetro se atrasa ( $\overline{\Delta t}/t_0 < 0$ ). Entonces se tiene que:

$$\frac{\overline{\Delta f}}{f_0} = \frac{\overline{\Delta t}}{t_0} \quad (4)$$

Reemplazando (4) en (3) se tiene que:

$$t = \left( 1 + \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) t_0 \quad (5)$$

De (5) se desprende la siguiente ecuación para obtener el error del cronómetro en tiempo:

$$Error(s) = t_0 \times \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \quad (6)$$

Donde:

- t: es el tiempo que realmente mide el cronómetro.
- t<sub>0</sub>: es el tiempo que se desea medir con el cronómetro.

Por otro lado hay que tener en cuenta que el valor numérico de la desviación de Allan mide la estabilidad relativa entre el oscilador bajo calibración y el oscilador de referencia, y esta incluye la incertidumbre asociada a cada medición individual introducida por el propio sistema de medición debida a diversos parámetros. Por lo cual la incertidumbre de medición estará dada en función de la desviación de Allan ( $\sigma_y(t)$ ).

## V. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DETECTOR DE FRECUENCIAS

Se debe tener en cuenta que el sistema detector de frecuencias debe ser verificado para poder evaluar su desempeño continuo, por tal motivo es necesario contar con un circuito que realice dicha verificación simulando ser el cronómetro a calibrar. Dicho circuito es simple y está

conformado por una antena y un generador de señal. Como antena se usa resistencia de 10 kΩ la cual se conecta a un generador de señal como carga, simulando así la frecuencia que induce el cronómetro. Como generador de señal usamos un equipo Tektronix AFG3102, que se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio, con el se aplica una señal de frecuencia en modo pulso de 32 Hz con una amplitud de 4 V a través de la resistencia, la señal inducida es capturada y medida por el sistema detector de frecuencias, verificando así su funcionamiento y su inmunidad contra influencias externas.

Se cuenta con un historial de más de 2 años de datos realizando continuamente la verificación del sistema detector de frecuencias, por lo cual hemos podido comprobar que el aporte de incertidumbre es  $\leq 3$  ns/s, el cual es un valor que no afectan en la medición, considerando como la mejor exactitud de un cronómetro un valor de 3 us/s. Entonces es posible indicar que nuestro sistema detector de frecuencias es el adecuado para realizar la calibración de cronómetros digitales por el método de inducción.

El laboratorio viene realizando por más de 2 años la calibración de cronómetros de diferentes marcas y modelos utilizando el método de inducción, por lo cual hemos podido comprobar que con este método es posible obtener incertidumbres desde 5 ns/s por la buena estabilidad del cronómetro pero en general es frecuente obtener incertidumbres  $\leq 0,1$  us/s.

En la figura 3 se muestra la estabilidad obtenida en la verificación del sistema detector de frecuencias en términos de la raíz de la varianza de Allan usando el software AMTyF, mostrando un valor máximo un poco mayor a 1 ns/s. Tener en cuenta que la raíz de la varianza de Allan es la desviación de Allan.

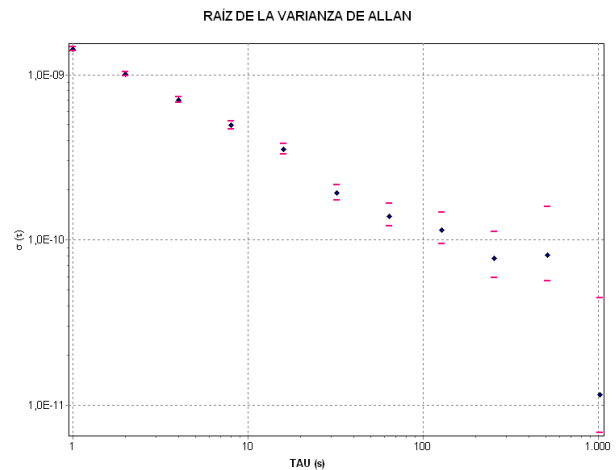


Figura 3. Verificación del sistema detector de frecuencias en términos de la raíz de la varianza de Allan.

## VI. PARTICIPACIÓN EN UNA COMPARACIÓN DE CRONÓMETROS

Para demostrar nuestra capacidad de medición y que realmente el método está funcionando adecuadamente el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI, utilizando el método de inducción para la calibración de cronómetros, participó en una comparación interlaboratorios de cronómetros en la región SIM “An Interlaboratory Stopwatch Comparison in the SIM Region” [9], obteniendo buenos resultados como se puede apreciar en la tabla 1 (Dato tomado de la pág. 60 de la referencia [9] para el Grupo 2).

La comparación se realizó en dos grupos, en el Grupo 1 se encuentran los países participantes de la parte Norte de América y en el Grupo 2 los países participantes de la parte Sur de América. El Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI participó en el grupo 2 de la comparación identificándose como INDECOPI. En la tabla 1 se muestran los resultados de los países participantes del Grupo 2 de la comparación de cronómetros. Los nombres o siglas de los INM que participaron, según el orden, corresponden a CENAMEP (Panamá), ONRJ (Brasil), INTN (Paraguay), UTE (Uruguay), INDECOPI (Perú), SIC (Colombia), INTI (Argentina).

Laboratory	Temperature Range (°C)	Humidity Range (%)	Method	Results		U (k = 2) (parts in 10 <sup>6</sup> )
				Hz/Hz (parts in 10 <sup>6</sup> )	s / day	
CENAMEP	22.0 to 23.0	55 to 65	Direct	6.9	0.60	0.6
ONRJ	23.0 to 27.0	-----	Time base	-2.8	-0.24	1.6
INTN	20.0 to 22.0	52 to 58	Direct	6.6	0.57	2.0
UTE	22.0 to 24.0	40 to 60	Time base	7.3	0.63	0.02
INDECOPI	22.9 to 23.3	41 to 43	Time base	7.3	0.63	0.007
SIC	21.0 to 22.0	50 to 52	Time base	7.0	0.60	0.03
INTI	22.0 to 24.0	40 to 50	Time base	7.2	0.62	0.009
CENAMEP	22.0 to 23.0	52 to 60	Direct	7.2	0.62	0.6

Tabla 1. Resultados para el Grupo 2 de la comparación de cronómetros.

En la comparación el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI obtuvo una incertidumbre de medición de 0,007  $\mu$ s/s, la cual incluye la incertidumbre asociada al sistema de medición por diversos parámetros. Esta incertidumbre es coherente con los resultados obtenidos en las calibraciones de cronómetros que realizamos.

En la comparación la gran parte de los INM de la región SIM utilizan el método de base de tiempo para la calibración de cronómetros. En nuestro caso utilizamos el método de base de tiempo con la variante de que la medición de la frecuencia fundamental del cronómetro es a través del método de inducción, lo cual nos ha permitido obtener resultados confiables y comparables con los resultados de otros INM.

## VII. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que es posible calibrar cronómetros digitales por el método de inducción con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu$ s/s en forma semiautomática, en un corto tiempo, sin necesidad de activar el cronómetro a calibrar, sin la intervención del factor humano y con ayuda de un software para el tratamiento de datos.

## VIII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo de Trabajo de Tiempo y Frecuencia de la Región SIM “SIM Time and Frequency Metrology Working Group” por sus diversos aportes y constante apoyo en la realización de este trabajo, en especial a los INM de Uruguay, Colombia, México, Panamá, Costa Rica, USA.

## REFERENCIAS

- [1] Gust, Jeff C; Graham, Robert M.; Lombardi, Michael A. Practice guide “Stopwatch and Timer Calibrations” (2009 Edition). NIST. Special Publication 960-12.
- [2] Leonardo Trigo, Daniel Slomovitz. Calibración de cronómetros digitales por método de inducción. UTE. Uruguay. Octubre 2008.
- [3] Johnny Jiménez, Harold Sánchez. Calibración de cronómetros mediante la medición de la frecuencia del oscilador de cuarzo. ICE. Costa Rica. VIII Semetro.
- [4] Francisco Jiménez. CENAM - Tiempo y Frecuencia. AMTyF Análisis de Mediciones de Tiempo y Frecuencia. Desarrollo de un software para el cálculo de la varianza de Allan y análisis gráfico de mediciones de tiempo y frecuencia. Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2005.
- [5] Francisco J. Jiménez Tapia. CENAM. AMTyF Software (Análisis de Mediciones de Tiempo y Frecuencia). Descarga del software en la página web SIM Time and Frequency Metrology Working Group. <http://tf.nist.gov/sim/papers.htm>.
- [6] CENAM – ema. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la metrología de tiempo y frecuencia. México. Abril 2008. Revisión 01.
- [7] The SIM Time Network. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology (NIST). Volume 116, Number 2, March-April 2011.
- [8] SIM Time Network. This page allows you to view the results of time and frequency comparisons between members of the Interamerican Metrology System (SIM) [http://gps.nist.gov/scripts/sim\\_rx\\_grid.exe](http://gps.nist.gov/scripts/sim_rx_grid.exe).
- [9] An Interlaboratory Stopwatch Comparison in the SIM Region. NCSLI Measure: The Journal of Measurement Science, vol. 6, no. 3, pp. 56-62, September 2011.