

SISTEMA DE BAJO COSTO PARA CALIBRACIÓN AUTOMATIZADA DE CRONÓMETROS DIGITALES

*Luis M. Mojica O.*¹, *Raúl F. Solís B.*²

¹ CENAMEP AIP, Panamá, Panamá, lmojica@cenamep.org.pa

² CENAMEP AIP, Panamá, Panamá, rsolis@cenamep.org.pa

Abstract: Validación de un sistema para la calibración automatizada de cronómetros digitales. El diseño está basado en el circuito integrado AD704, utilizándolo como comparador de señal. Este circuito permite capturar la frecuencia de actualización de la pantalla de cristal líquido (LCD), del cronómetro, para realizar la calibración. Incertidumbre del sistema menor a $2E-6$ Hz/Hz.

Key words: Hertz, frecuencia, segundo, tiempo, cuarzo, oscilador.

1. INTRODUCCIÓN

Las calibraciones de tiempo y frecuencia buscan medir la base de tiempo para conocer, entre otras características, la estabilidad y exactitud. Un medidor de intervalo de tiempo (un cronómetro) posee una base de tiempo formada de un cristal de cuarzo que la utiliza, junto con un contador, para registrar el tiempo transcurrido. En la mayoría de los cronómetros digitales, una frecuencia proporcional a la frecuencia de la base tiempo se utiliza para actualizar la pantalla LCD [2], de modo que si se captura esta señal se puede conocer el error de medición del cronómetro bajo estudio.

Lo que motivó a realizar este sistema de medición es primordialmente la necesidad de reducir la duración del proceso de calibración de cronómetros. El objetivo es reducir la incertidumbre, tiempo de calibración; a través de un circuito de poca complejidad electrónica y de bajo costo, de modo que pueda ser reproducido con facilidad.

Este trabajo muestra los resultados del desarrollo de un sistema para la calibración automatizada de cronómetros digitales, basado en las publicaciones [1], [2] y [3]. Este sistema de medición permite obtener el error de tiempo de un cronómetro digital midiendo el error de frecuencia de su base de tiempo interna, el error de la base de tiempo se obtiene capturando la frecuencia de actualización de su pantalla LCD.

2. RESULTADOS

El método de calibración consiste en capturar la señal de actualización de la pantalla LCD de los medidores de intervalos de tiempos digitales. Y para lograr esto, se hace inducir la señal de actualización de la pantalla LCD en una

placa conductora, para luego ingresarla a un circuito comparador de señal a fin de que sea acondicionada y pueda ser capturada por el contador de frecuencias, (ver figura 1). Cabe señalar que el circuito comparador y el medidor de intervalo de tiempo se colocan dentro de una caja con blindaje metálico para minimizar las interferencias electromagnéticas externas.

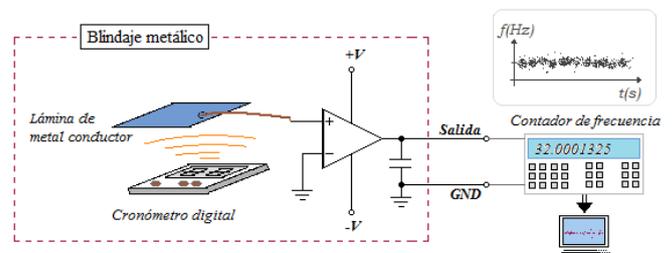


Fig. 1. Mediciones de frecuencia.

La figura 1 muestra el diagrama del circuito, se observa que la configuración del amplificador operacional es un comparador de señal. El amplificador operacional (OpAmp) utilizado es el AD704, este OpAmp requiere de una baja corriente de entrada (típica 270pA) para funcionar [4]. Por lo anterior y otras características más, el AD704 puede tomar los bajos niveles (50 mV) de la señal que se inducen en la placa conductora y compararla para obtener niveles cercanos a 5V, esta señal ingresa a un contador de frecuencia para así capturar la frecuencia.

La figura 2 muestra una imagen de la caja metálica que contiene el circuito para capturar de la frecuencia de refresco de la pantalla LCD del cronómetro bajo calibración.

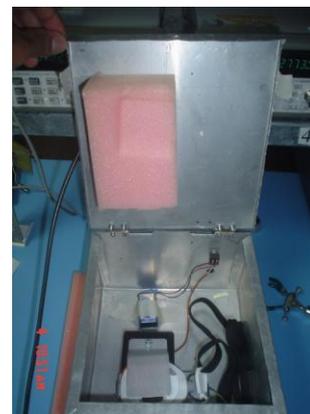


Fig. 2. Sistema de medición.

Para validar el funcionamiento del sistema se induce una señal patrón de 32 Hz (referenciada a un reloj atómico de cesio) para simular una frecuencia de alta estabilidad en el refrescado de la pantalla LCD, figura 3. La señal patrón se induce aplicando una tensión pulsante de 5 V_{pp} a un resistor de 50 Ohm.

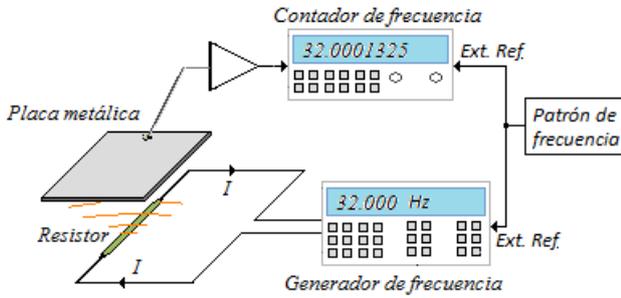


Fig. 3. Esquema utilizado en la validación

La señal es capturada cada segundo durante tres horas por el contador de frecuencia para registrar los valores de frecuencias inducidos. La figura 4 muestra una gráfica de los valores de frecuencias capturadas para evaluar el ruido del sistema de medición, se puede observar que los valores están en torno a la frecuencia patrón de 32 Hz.

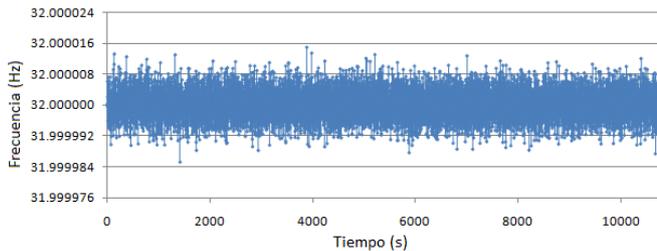


Fig. 4. Frecuencia patrón capturada.

La figura 5 muestra una distribución normal para los 7200 datos de frecuencia de la figura 4.

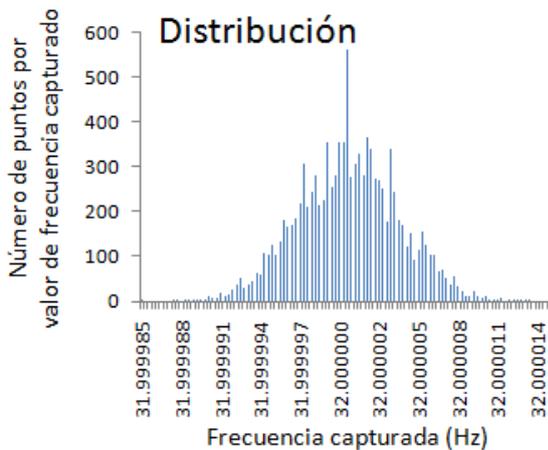


Fig. 5. Distribución de la frecuencia patrón capturada

El error de frecuencia del sistema de medición se obtiene al promediar los desvíos fraccionales de frecuencia individuales, ecuación 1.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{f_i - f_n}{f_n} \quad (1)$$

donde,

f_i : valor de frecuencia capturado en el tiempo $i=1,2,.. M$.

f_n : valor nominal de la frecuencia medida.

M : Cantidad de valores capturados

$$\frac{\Delta f}{f} = -4,52E-11 \text{ Hz/Hz}$$

La tabla 1 muestra los valores de estabilidad obtenidos (hasta tau igual 100 segundos), los cuales representan el ruido del sistema para diferentes ventanas de observación τ .

Tabla 1. Ruido del sistema para diferentes τ

τ (s)	$\sigma_y(\tau)$ (Hz/Hz)
1	1,16E-07
2	8,06E-08
4	5,78E-08
10	3,64E-08
20	2,61E-08
40	1,70E-08
60	1,26E-08
100	9,70E-09

Para evaluar la estabilidad se utiliza la desviación de Allan, ecuación 2.

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [y_{i+1} - y_i]^2} \quad (2)$$

Donde,

$y_i = \frac{f_i - f_n}{f_n}$: i-ésimo desvío fraccional de frecuencia.

M : Cantidad de valores capturados.

τ : Periodo de observación.

Observando la tabla 1 el mayor ruido del sistema (o dispersión de los datos) se presenta para tau igual a un segundo. Es importante señalar que al periodo de muestreo utilizado en la calibración le corresponde una dispersión, según la tabla 2. Por ejemplo, si se utiliza en la calibración un tau igual 10 s entonces la incertidumbre por el ruido del sistema es 3,64E-8 Hz/Hz.

Otra forma de corroborar que los resultados obtenidos con el sistema de medición son confiables, es realizar una comparación entre este nuevo método de medición (método automático) y el método por comparación visual del indicador del cronómetro (método manual). Para esto se calibraron, con ambos métodos, dos cronómetros de 0.001 s de resolución y 32Hz de frecuencia de actualización de la pantalla LCD.

Para el método de calibración manual se utiliza una tarjeta procesadora de tiempo y frecuencia referenciada a un reloj atómico, el modelo es BC635PCI. Esta tarjeta mediante un programa de computadora se configura para que lleve el tiempo de referencia (análogo a un cronómetro de alta exactitud y estabilidad), y además permite que el operador registre el tiempo que lleva con tan solo oprimir una tecla. Dado que el operador no es lo suficientemente rápido para registrar los datos cada segundo, entonces se utiliza un periodo de muestreo de 10 segundos. Cada vez que el cronómetro marca en su pantalla un múltiplo de 10 s, se registra automáticamente el tiempo del patrón al presionar la tecla "Enter" en el teclado (el operador registra manualmente el tiempo del cronómetro). Los datos registrados son procesados para obtener el error del cronómetro en un intervalo de 86400 s.

La figura 6 muestra una gráfica de los 7200 valores de frecuencia capturados del cronómetro #1, utilizando el método automático.

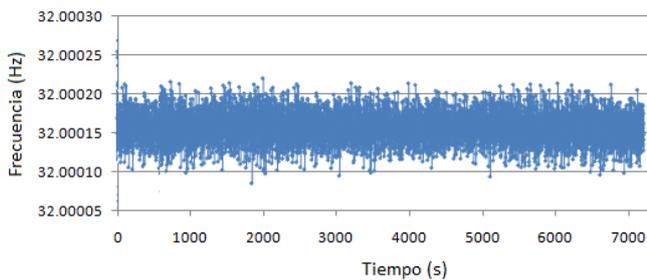


Fig. 6. Frecuencia capturada para el cronómetro #1.

La figura 7 muestra una gráfica con una distribución normal para los valores de frecuencia capturado del cronómetro #1.

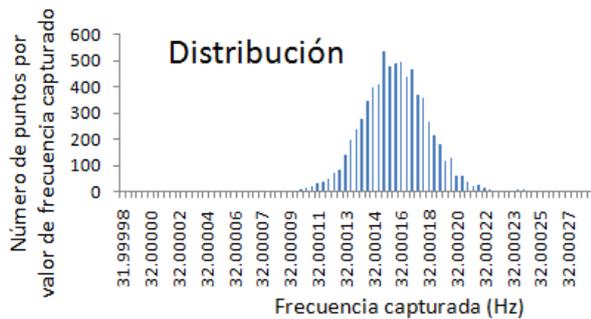


Fig. 7. Distribución de la frecuencia capturada para el cronómetro #1.

Utilizando la ecuación 1, el desvío fraccional de frecuencia es:

$$\frac{\Delta f}{f} = 4,90E-6 \text{ Hz/Hz}$$

La figura 8 muestra una gráfica de los 7200 valores de frecuencia capturados del cronómetro #2, utilizando el método automático.

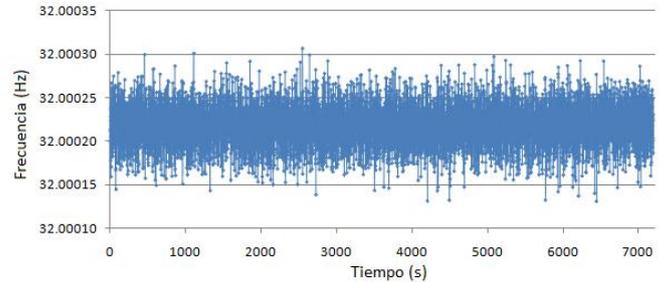


Fig. 8. Frecuencia capturada para el cronómetro #2.

La figura 9 muestra una gráfica con una distribución normal para los valores de frecuencia capturado del cronómetro #2.

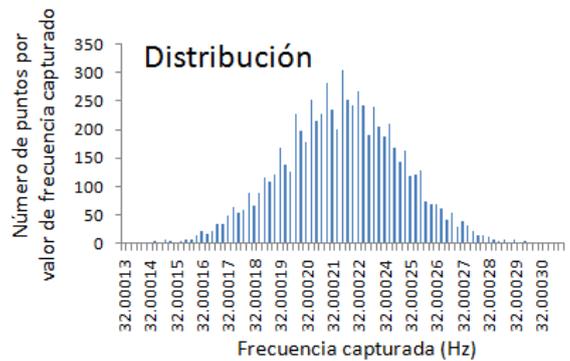


Fig. 9. Distribución de la frecuencia capturada para el cronómetro #2.

Para este cronómetro el desvío fraccional de frecuencia es:

$$\frac{\Delta f}{f} = 6,78E-6 \text{ Hz/Hz}$$

El desvío fraccional de tiempo se relaciona con el desvío de frecuencia de la base de tiempo como sigue:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta f}{f} \tag{3}$$

Donde,

Δt : Error de tiempo del cronómetro.

T : Intervalo de tiempo utilizado para obtener Δt .

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos para el método manual y automático, siendo los mismos compatibles entre sí debido a que el error normalizado en ambos caso es inferior a 1. En la figura 10 se aprecia la estabilidad obtenida para los cronómetros calibrados con el método automático, se observa que los valores son mayores que el ruido del sistema, esto es de esperarse debido a que representa la estabilidad combinada del sistema de medición y el cronómetro calibrado.

Tabla 2. Comparación entre el método manual y automático

Cronómetro #1			
Método	Duración de la toma de datos	$\Delta T/T$ (s/s)	$U_{rel}(k=2)$ (s/s)
Manual	48 horas	$4,89 \times 10^{-6}$	$5,97 \times 10^{-7}$
Automático	2 horas	$4,90 \times 10^{-6}$	$1,38 \times 10^{-6}$
Error Normalizado			0,007
Cronómetro #2			
Método	Duración de la toma de datos	$\Delta T/T$ (s/s)	$U_{rel}(k=2)$ (s/s)
Manual	48 horas	$6,90 \times 10^{-6}$	$5,86 \times 10^{-7}$
Automático	2 horas	$6,78 \times 10^{-6}$	$1,52 \times 10^{-6}$
Error Normalizado			0,07

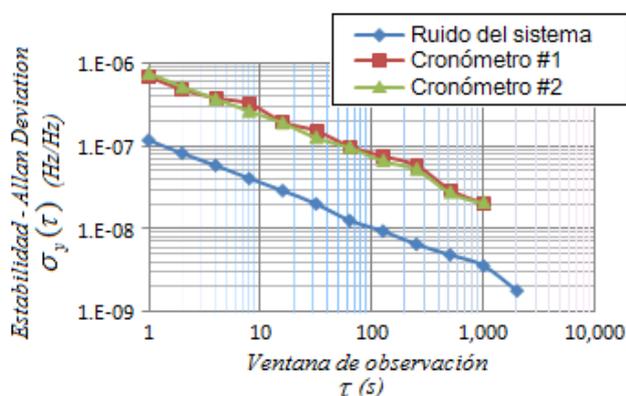


Fig. 10. Estabilidad de los cronómetros calibrados.

En tabla 2 observamos que las incertidumbres relativas son menores para el método manual en comparación con el automático. Esto se debe a que en el método manual la incertidumbre es relativa a un largo periodo de tiempo (86400s), mientras que en el método automático el valor es relativo a 1s (periodo de muestreo). La tabla 3 muestra las fuentes de incertidumbres con valores absolutos, tanto para el método automático como para el manual.

Tabla 3. Fuentes de incertidumbres del método manual y automático

Fuente de incertidumbres	Manual (s)	Automático (s)
Base de tiempo	1E-11	1E-11
Resolución del cronómetro patrón	0,0001	0
Ruido del sistema	0	1,16E-7
Resolución del contador	0	1E-12
Resolución del cronómetro	0,001	0
Dispersión de la medición	0,03	6,80E-7
Tiempo de reacción	0,1	0
Incertidumbre expandida ($k=2$)	2,1E-1	1,4E-6

3. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos, a pesar de ser un sistema básico en su diseño, son muy satisfactorios.

Se logró reducir la duración del proceso de calibración de dos intervalos de 24 horas a tan solo 2 horas. Esta reducción es posible debido a que el tiempo de reacción humano no es parte del proceso de calibración, por lo cual no es necesario tomar largos periodos de tiempo en el proceso de medición.

En el método manual la toma de datos se efectúa cada 10 segundos, para este nuevo sistema los datos pueden ser tomados cada segundo y con menor incertidumbre (si se aumenta el periodo de muestreo disminuye el ruido del sistema permitiendo reducir aún más la incertidumbre de medición, ver Tabla 1).

La complejidad electrónica del circuito comparador de señal es mínima y con conocimientos básicos de electrónica se puede reproducir el circuito con facilidad y de forma artesanal.

REFERENCIAS

- [1] Jeff C. Gust, Robert M. Graham, Michael A. Lombardi, "Stopwatch and Timer Calibrations", May 2004.
- [2] Leonardo Trigo, Daniel Slomovitz, "Calibración de cronómetros digitales por método de inducción", IEEE, 7° encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas. 16 y 17 de Octubre del 2008, Montevideo-URUGUAY.
- [3] Johnny Jiménez, Harold Sánchez, "Calibración de cronómetros mediante la medición de la frecuencia del oscilador de cuarzo", IEEE, VIII SEMETRO.
- [4] Analog Devices, "Picoampere Input Current Quad Bipolar Op Amp", Datasheets_AD704, <http://www.analog.com>.