

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



Calibración de Cronómetros Digitales por el Método de Inducción con un Mínimo de Incertidumbre

Tesis para optar el Título
PROFESIONAL LICENCIADO EN FÍSICA

Bach. HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

CALLAO – PERÚ

Diciembre – 2013

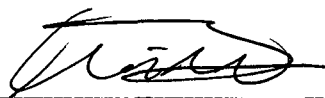
HOJA DE PRESENTACIÓN

Calibración de Cronómetros Digitales por el Método de Inducción con un Mínimo de Incertidumbre

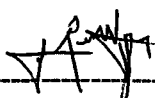
Bach. HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

Tesis presentada a consideración del Cuerpo Docente de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Universidad del Callao, como parte de los requisitos para obtener el Título Profesional de Licenciado en Física.

Aprobada por:



Mg. ROEL MARIO VIDAL GUZMAN
Presidente



Lic. ROLANDO MANUEL VEGA DE LA PEÑA
Secretario



Lic. ELADIO GILBERTO CASAPIA ALMONTE
Vocal



Lic. ABSALON CASTILLO VALDIVIESO
Suplente

Callao – Perú
Diciembre – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

**Calibración de Cronómetros Digitales por el Método de Inducción
con un Mínimo de Incertidumbre,**

Callao (2013).

XII, 86 p., 29.7 cm. (UNAC, Licenciado en Física, 2013).

Tesis, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ciencias Naturales
y Matemática 1. Física.

DEDICATORIA

Este esfuerzo lo dedico con mucho cariño a mis padres Manuel Díaz y María Chonate. Gracias por todo el apoyo incondicional, desde mi educación inicial hasta mi formación profesional, para la culminación de esta tesis.

A mis hermanos, gracias por su apoyo constante a lo largo de estos años, que este trabajo sea un ejemplo de inspiración y estímulo en la titulación de sus carreras profesionales así como en la de sus hijos.

Al ingeniero Henry Postigo, Sub Jefe del Servicio Nacional de Metrología de INDECOPI (SNM-INDECOPI), quien me guió en el transcurso de mi formación profesional en el SNM-INDECOPI, y quien me apoyo constantemente en el desarrollo del presente trabajo desde su implementación hasta la culminación de esta tesis.

HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del Servicio Nacional de Metrología de INDECOPI (SNM-INDECOPI).

Expreso mi agradecimiento a los siguientes profesores:

- A mi asesor Dr: Walter Flores Vega, por su paciencia y su exigencia del tema central y en la revisión de mi trabajo.
- Hago un reconocimiento al Dr. Jorge Espichan, por la predisposición ofrecida apoyándome en el desarrollo del presente trabajo.

Así mismo agradezco

- Al SNM-INDECOPI, donde laboro, por permitirme desarrollar e implementar los laboratorios de Electricidad, Acústica, Tiempo y Frecuencia. Gracias por permitirme participar en diversas capacitaciones en el exterior y poder representar al SNM-INDECOPI en diversos eventos internacionales, lo cual me permitió obtener el conocimiento necesario para el desarrollo y culminación de esta tesis.
- Al Grupo de Trabajo de Tiempo y Frecuencia del Sistema Interamericano de Metrología (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 Institutos Nacionales de Metrología (INM) de Uruguay, Colombia, México, Panamá, Costa Rica, USA.

HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

RESUMEN
CALIBRACIÓN DE CRONÓMETROS DIGITALES POR EL MÉTODO DE
INDUCCIÓN CON UN MÍNIMO DE INCERTIDUMBRE

HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

OCTUBRE - 2013

Asesor: Dr. Walter Flores Vega.

Título obtenido: Licenciado en Física

INDECOPI por medio del Servicio Nacional de Metrología (SNM-INDECOPI) viene atendiendo la demanda de calibración en el país de cronómetros digitales, para lo cual inicialmente utilizó el método por comparación directa por medio de un sistema de filmación. Este método presenta el problema de invertir una gran cantidad de tiempo tanto en la medida como en la reproducción de los datos, además reporta una incertidumbre de medición mayor a la exactitud del cronómetro a calibrar. En este sentido se tiene la necesidad de implementar un nuevo método de calibración que se realice en el menor tiempo posible y con la menor incertidumbre de medición, por lo cual se realizó un sistema detector de frecuencias para la calibración de cronómetros digitales. Con este sistema es posible capturar la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro utilizando el método de inducción. Esta frecuencia es proporcional a su base de tiempo, por lo cual es posible obtener el error del cronómetro en corto tiempo y con una incertidumbre de medición $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$.

Palabras clave:

CRONÓMETROS

CALIBRACIÓN

INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

MÉTODO DE INDUCCIÓN

ABSTRACT

CALIBRATION OF DIGITAL STOPWATCHES BY THE INDUCTION METHOD WITH A MINIMUM OF UNCERTAINTY

HENRY JONATHAN DIAZ CHONATE

OCTOBER - 2013

Adviser: Dr. Walter Flores Vega.

Title obtained: Licentiate in Physics

INDECOPI by The National Metrology Service (SNM-INDECOPI) is attending the demand of calibration in the country of digital stopwatches, for which initially used the direct comparison method using a film system. This method has the problem invest a lot of time in the measurement as in the reproduction of the data, also reports an uncertainty of measurement greater to the accuracy of the stopwatch to calibrate. In this sense there is a need to implement a new method of calibration that to be performed in the shortest time possible and with the least uncertainty of measurement, whereby was performed a frequency detector system for calibration of digital stopwatches. With this system it is possible to capture the refresh frequency of LCD of the stopwatch using the induction method. This frequency is proportional to its time base, making it possible to obtain the stopwatch error in short time and with a uncertainty of measurement $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$.

Key words:

STOPWATCHES

CALIBRATION

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT

INDUCTION METHOD

ÍNDICE

	Pág.
HOJA DE PRESENTACIÓN.....	ii
FICHA CATALOGRÁFICA.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTAS DE FIGURAS	x
LISTAS DE TABLAS	xii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Cronómetros Digitales	5
2.2 Funcionamiento de un Cronómetro Digital	7
2.3 Métodos de Calibración de Cronómetros	8
2.3.1 Método de Base de Tiempo	10
2.3.2 Calibración de Cronómetros Utilizando un Contador de Frecuencias con Lector Acústico	13
2.4 Trazabilidad del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia	14
2.5 Medición Directa de la Frecuencia	17
2.6 Varianza de Allan	19
2.6.1 Definición de la Varianza de Allan	20
2.7 Software de Medición y Tratamiento de Datos	25
2.7.1 Software Teamview	25
2.7.2 Software AMTyF	27

CAPÍTULO III	30
MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1 Método de Inducción	30
3.1.1 Detección de la Señal	37
3.1.2 Sistema de Medición	46
3.1.3 Verificación del Sistema Detector de Frecuencias	47
3.2 Equipos y Materiales	50
3.3 Preparación	51
3.4 Proceso de Calibración	52
CAPÍTULO IV	58
RESULTADOS	58
4.1 Determinación del Error del Cronómetro	58
4.2 Cálculo de Incertidumbre de Medición del Cronómetro	62
4.3 Interpretación de Resultados	64
4.4 Validación del Método	67
4.4.1 Evaluación de Resultados Obtenidos de la Verificación del Sistema de Medida	68
4.4.2 Participación en una Comparación Internacional	75
CAPÍTULO V	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1 Conclusiones	78
5.2 Recomendaciones	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXO	85
DEFINICIONES	85

LISTAS DE FIGURAS

- Figura 2.1** Interior de un cronómetro digital, Graham (NIST) [1].
- Figura 2.2** Esquema simplificado de un cronómetro digital con pantalla LCD, Trigo (UTE) [2].
- Figura 2.3** Sistema de medida de base de tiempo de cronómetros disponible en el mercado, Graham (NIST) [1].
- Figura 2.4** Red virtual SIM Time Network [8].
- Figura 2.5** Ilustración esquemática del método de medición directa de frecuencia utilizando un contador de frecuencia, CENAM [4].
- Figura 2.6** Definición de Varianza de Allan, CENAM [4].
- Figura 3.1** Diagrama de un condensador.
- Figura 3.2** Señal capturada de un cronómetro por medio de las placas paralelas.
- Figura 3.3** Diagrama del sistema receptor de campo eléctrico propuesto para analizar las señales capturadas del cronómetro.
- Figura 3.4** Formas de ondas de las frecuencias capturadas de un cronómetro.
- Figura 3.5** Diagrama del sistema detector de frecuencias.
- Figura 3.6** Diagrama electrónico del sistema detector de frecuencias.
- Figura 3.7** Sistema detector de frecuencias desarrollado en el SNM-INDECOPI.
- Figura 3.8** Sistema de medición.
- Figura 3.9** Diagrama del arreglo utilizado para realizar la verificación del sistema detector de frecuencias.

Figura 3.10 Verificación del sistema detector de frecuencias.

Figura 4.1 Verificación del sistema detector de frecuencia en términos de la raíz de la varianza de Allan.

LISTAS DE TABLAS

- Tabla 2.1** Valores típicos de frecuencia en cronómetros, Trigo (UTE) [2].
- Tabla 2.2** Comparación entre métodos de calibración de cronómetros, Graham (NIST) [1].
- Tabla 2.3** Número de mediciones según el tiempo a medir.
- Tabla 3.1** Lista de componentes del sistema detector de frecuencias.
- Tabla 3.1** Expresión de la incertidumbre de medición en función del tiempo.
- Tabla 4.2** Resultados de la medición de frecuencia del cronómetro calibrado.
- Tabla 4.3** Resultados obtenidos en tiempo del cronómetro calibrado.
- Tabla 4.4** Valores obtenidos de Enero a Junio del 2011.
- Tabla 4.5** Valores obtenidos de Julio a Diciembre del 2011.
- Tabla 4.6** Valores obtenidos de Enero a Junio del 2012.
- Tabla 4.7** Valores obtenidos de Julio a Diciembre del 2012.
- Tabla 4.8** Valores obtenidos de Enero a Junio del 2013.
- Tabla 4.9** Resultados de la comparación de cronómetros en la región SIM para el grupo 2 [9].

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Cada país cuenta con un Instituto Nacional de Metrología (INM), el cual es la referencia nacional en lo que respecta a mediciones de diversas cantidades físicas. En nuestro país, INDECOPI por medio del Servicio Nacional de Metrología (SNM-INDECOPI), es la encargada de mantener los patrones nacionales de medida y promover el desarrollo de la metrología, de esta manera el SNM-INDECOPI es la referencia nacional en diversas cantidades físicas, proporcionando la adecuada trazabilidad, cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, en las mediciones que se realizan en el Perú. El SNM-INDECOPI atiende la demanda de calibraciones en el país de diferentes instrumentos de medición de cantidades físicas tales como masa, longitud, presión, volumen, temperatura, tiempo y frecuencia, etc.

Dentro de los servicios que brinda el SNM-INDECOPI está el realizar la calibración de cronómetros digitales. Inicialmente el SNM-INDECOPI utilizó el método por comparación directa de un cronómetro calibrado por un INM del extranjero con el cronómetro a calibrar, los que eran filmados por un determinado tiempo y luego visualizados para determinar el error del cronómetro a calibrar comparándolo con el cronómetro calibrado. Este método se implementó con poco equipamiento pero su realización demandó bastante tiempo tanto en la toma de datos como en su procesamiento, reportando, en la mayoría de los casos, una incertidumbre de medición mayor a la exactitud del cronómetro a calibrar.

Con la creación del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia en el SNM-INDECOPI se planteó la necesidad de implementar un nuevo método de

calibración de cronómetros digitales debido a los inconvenientes que presenta el método por comparación directa, relacionados con el tiempo de calibración y la incertidumbre de medición. El nuevo método debería solucionar los inconvenientes mencionados, es decir, realizarse en el menor tiempo posible y con la menor incertidumbre de medición, este último requisito es debido a que los cronómetros actuales presentan cada vez mejores exactitudes, en el mejor de los casos un valor en el orden de 0,0003%.

Por este motivo fue necesario realizar una revisión de los métodos de calibración existentes encontrándose que algunos INM de la región América están aplicando un método de calibración que permite calibrar cronómetros en corto tiempo, sin necesidad de activarlo para observar su lectura, eliminando así varios aportes de gran influencia en la incertidumbre de medición que se consideran cuando se utiliza el método por comparación directa.

El INM de Estados Unidos (NIST), el cual es un organismo reconocido a nivel internacional y con bastante tiempo desarrollando la metrología en la región América, publicó una guía práctica de calibración de cronómetros y relojes (Practice guide "Stopwatch and Timer Calibrations"), Graham (NIST) [1]. En esta guía se presentan tres métodos para realizar la calibración de cronómetros, de los cuales se recomienda utilizar el método de base de tiempo, debido a que éste se puede realizar en corto tiempo y con una incertidumbre de medición pequeña. El método consiste en medir directamente la frecuencia fundamental del cuarzo de 32 768 Hz, la cual es la base de tiempo con la que funciona el cronómetro.

Otros INM de la región América realizan la calibración de cronómetros basándose en el método de base de tiempo, Graham (NIST) [1], en algunos casos desarrollando e implementando diferentes

dispositivos o circuitos electrónicos para poder capturar la frecuencia de la base de tiempo del cronómetro o múltiplos de esta frecuencia. Por ejemplo El INM de Uruguay (UTE) realiza la calibración de cronómetros midiendo sub múltiplos de la frecuencia fundamental del cronómetro desarrollando un circuito para la captura de estas frecuencias de mayor amplitud que induce el cronómetro por el método de inducción, Trigo (UTE) [2]. Por otra parte, El INM de Costa Rica (ICE) realiza la calibración de cronómetros midiendo directamente la frecuencia fundamental del cronómetro desarrollando un circuito para la captura de esta frecuencia de menor amplitud que induce el cronómetro por el método de inducción, Jiménez (ICE) [3].

Luego de realizar esta revisión, el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI consideró conveniente implementar el método de inducción para la calibración de cronómetros digitales, basado en desarrollar un receptor inductivo para capturar los impulsos de mayor amplitud que se inducen en el cronómetro. El receptor inductivo consiste en un sistema detector de frecuencias desarrollado para realizar la medición de la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro, la cual es proporcional a la frecuencia de su base de tiempo, por lo cual es posible obtener el error en la medida del tiempo del cronómetro, en corto tiempo y con una incertidumbre de medición pequeña.

El método de inducción se basa en el método de base de tiempo, Graham (NIST) [1], el cual se realiza con algunas variantes, midiendo submúltiplos de la frecuencia fundamental del cronómetro, las cuales son proporcionales a su base de tiempo. Para desarrollar el método de inducción es necesario medir la frecuencia de la señal que llega al contador interno del cronómetro antes de que realice el refresco de su indicación en su pantalla LCD (frecuencia de refresco del LCD del cronómetro), obteniéndose normalmente un valor de 32 Hz, o valores de 28,444 Hz y

42,666 Hz, u otra frecuencia que resulte de la división del valor fundamental del cuarzo del cronómetro de 32 768 Hz.

El presente trabajo se diferencia de los trabajos mencionados anteriormente, debido a que el sistema detector de frecuencias, el cual captura la frecuencia de señal inducida, se realiza utilizando un potenciómetro para regular y controlar la amplitud de la frecuencia de la señal que se captura con ayuda de un osciloscopio, asegurando realmente que la amplitud de la frecuencia de la señal capturada tenga un valor adecuado de amplitud, esto es debido a que la amplitud de la frecuencia de la señal inducida depende de la construcción del fabricante del cronómetro. Con esto, es posible conseguir valores de frecuencia estables, reduciendo considerablemente la incertidumbre de medición. Con ayuda del software TimeView del contador de frecuencias es posible realizar estas mediciones en forma automática, para luego tratar estos datos de mediciones con la ayuda del software AMTyF para el análisis de mediciones de frecuencia, obteniendo finalmente el error en la medida del tiempo del cronómetro.

Se aprovechó que los equipos que componen el sistema de medición pertenecen al SNM-INDECOPI, los dos software de medición y tratamiento de datos son de libre disposición, por lo cual se destinó directamente el presupuesto al desarrollo e implementación del sistema detector de frecuencias, el cual se puso en funcionamiento desde el año 2011 en el SNM-INDECOPI. El sistema detector de frecuencias viene trabajando adecuadamente realizando la calibración de cualquier cronómetro digital en el país en corto tiempo, con la menor incertidumbre de medición y con un presupuesto económico para su implementación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Cronómetros Digitales

Los cronómetros digitales o también llamados de tipo I, descritos por Graham (NIST) [1], emplean un oscilador de cuarzo y un circuito electrónico para medir el intervalo de tiempo, estos equipos están compuestos por una fuente de poder, una base de tiempo, un contador y un indicador (normalmente una pantalla LCD). El diseño y construcción de cada componente depende del tipo de cronómetro.

La fuente de poder o alimentación, que usualmente es una celda de plata o batería alcalina, es la que alimenta tanto al oscilador como al circuito del contador y el indicador. La base de tiempo es un oscilador de cristal de cuarzo con una frecuencia nominal de 32 768 Hz, el cual es un valor estandarizado por los fabricantes de cronómetros.

Originalmente se escogió la frecuencia de 32 768 Hz debido a que de éste valor se puede obtener un pulso por segundo en el circuito usando una simple división de este valor con un estado 2 elevado a la potencia 15, pudiéndose implementar fácilmente divisores de frecuencia con tamaños reducidos y de bajo consumo de potencia. Los divisores están constituidos por contadores por lo que es necesario que el valor de la frecuencia sea compatible con la base de tiempo.

En la Figura 2.1 se muestra el interior de un cronómetro digital típico, con la placa de circuito impreso, el oscilador de cristal de cuarzo (Quartz Crystal) y la batería (Battery) visibles. El circuito contador consta de

divisores digitales que cuentan las oscilaciones de base de tiempo para el periodo que se inicia con los botones (Buttons) de inicio/parada (Start/Stop). El indicador típico cuenta con siete u ocho dígitos.

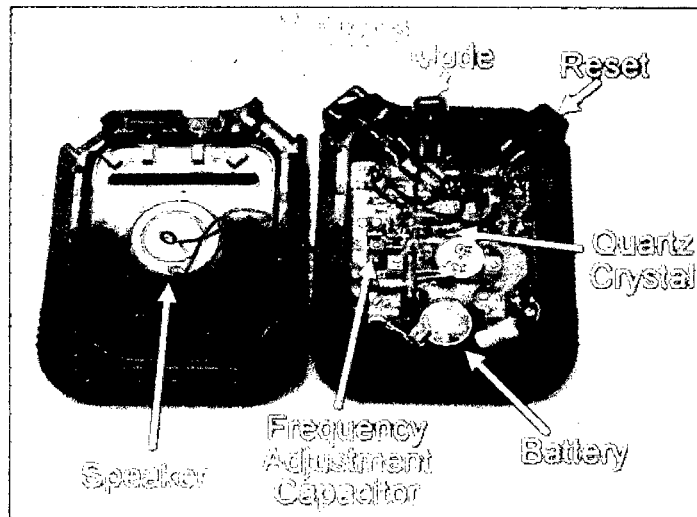


Figura 2.1. Interior de un cronómetro digital, Graham (NIST) [1].

Los cristales de cuarzo son de material piezoeléctrico, el cual tiene la propiedad de convertir las vibraciones mecánicas en oscilaciones de tensión de la misma frecuencia. En algunos materiales de cuarzo, se halla que aplicando un campo eléctrico al cuarzo, según la dirección, produce una deformación mecánica en forma normal a la dirección del campo eléctrico, produciendo una diferencia de potencial. La frecuencia de resonancia del cuarzo depende de la forma y el tamaño de los cortes que haya tenido, la cual es muy estable ante las variaciones de temperatura. Por esta razón el cuarzo es ideal para ser usado como base de tiempo en cronómetros debido a las diferentes temperaturas a las que pueden ser expuestos.

En los cronómetros, los osciladores de cuarzo son alimentados por un campo eléctrico oscilante a la misma frecuencia de resonancia del cuarzo, el cual es generado por el circuito electrónico. De este modo el

cristal vibra y produce una señal que retroalimenta el circuito, minimizando de esta forma las desviaciones de frecuencia que puede presentar con respecto a su frecuencia de resonancia por retroalimentación, por lo cual el cuarzo cumple un papel de regulador y estabilizador de la frecuencia. La frecuencia del cuarzo se utilizará para dar una medida del tiempo en el cronómetro.

2.2 Funcionamiento de un Cronómetro Digital

Los cronómetros digitales poseen un oscilador de cuarzo, cuya frecuencia fundamental es de 32 768 Hz (2^{15}), la cual es la base de tiempo del instrumento, Trigo (UTE) [2]. El buen funcionamiento del cronómetro depende de esta frecuencia, la cual internamente es dividida digitalmente, usando un divisor de frecuencia de un estado 2 elevado a la potencia n, donde n es un número entero positivo, este valor obtenido es amplificado emitiendo una señal típica de frecuencia a un sistema contador, para que éste realice la función de cronómetro y finalmente muestre dicha información de conteo por medio de una pantalla LCD. En la Figura 2.2 se muestra un esquema simplificado de un cronómetro digital con pantalla LCD.

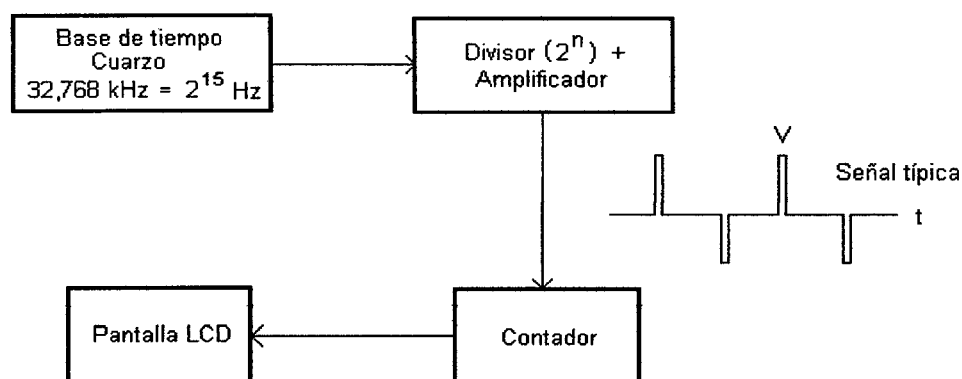


Figura 2.2. Esquema simplificado de un cronómetro digital con pantalla LCD, Trigo (UTE) [2].

La señal que llega al contador interno del cronómetro es la frecuencia que realiza el refresco de la pantalla LCD en el cronómetro. Dicha señal puede tener diferentes valores de frecuencia según los divisores utilizados, la cual depende de la marca y el modelo de los fabricantes. En la Tabla 2.1 se muestran los valores típicos de frecuencia en cronómetros, esta frecuencia puede ser capturada por un receptor inductivo para realizar la calibración del instrumento midiendo el valor de su frecuencia.

Tabla 2.1. Valores típicos de frecuencia en cronómetros, Trigo (UTE) [2].

Frecuencia fundamental (Hz)	Divisor		Frecuencia de la señal a capturar (Hz)
32 768	1 152	$2^{10} + 2^7$	28,444
	1 024	2^{10}	32
	768	$2^9 + 2^8$	42,666

En la Tabla 2.1 solo se presentan los valores típicos de frecuencia en cronómetros, para obtener otros valores de frecuencias solo es necesario considerar como divisor de la frecuencia fundamental del cronómetro un estado 2 elevado a alguna potencia o combinaciones de esta (por ejemplo, una suma de un estado 2 elevado a alguna potencia con otro valor similar).

2.3 Métodos de Calibración de Cronómetros

Graham (NIST) [1] describe tres métodos para realizar la calibración de cronómetros, cuyas principales características son:

- El método por comparación directa, el cual presenta una incertidumbre de medición alta debido a los factores que intervienen en la medición, entre ellos el tiempo de respuesta del operador.
- El método totalizador, similar al anterior pero en este caso se utiliza un contador y generador de frecuencias para disminuir la incertidumbre de medición debida al tiempo de respuesta del operador.
- El método de base de tiempo, el cual consiste en medir directamente la frecuencia fundamental del cronómetro de 32 768 Hz sin necesidad de activar el cronómetro eliminando así la intervención de un operador.

En la Tabla 2.2 se realiza una comparación entre estos tres métodos de calibración de cronómetros indicados, presentando sus principales propiedades.

Tabla 2.2. Comparación entre los métodos de calibración de cronómetros, Graham (NIST) [1].

Métodos Propiedades	Comparación directa	Totalizador	Base de tiempo
Requerimientos de equipos	Bien	El mejor	El mejor
Rapidez	Bueno	Bien	El mejor
Incertidumbre	Bueno	Bueno	Bien
Aplicabilidad	Bueno	Bien	El mejor

De los tres métodos indicados, Graham (NIST) [1] recomienda utilizar el método de base de tiempo para la calibración de cronómetros

debido al corto tiempo que implica su desarrollo y porque la incertidumbre de medición es pequeña. Este método es el que se detalla a continuación.

2.3.1 Método de Base de Tiempo

El método de medición de base de tiempo, Graham (NIST) [1], es el método preferido para la calibración de cronómetros, ya que éste introduce la menor incertidumbre en la medición debido a que la base de tiempo del instrumento es medida directamente y el tiempo de respuesta del operador que realiza la calibración no es un factor de incertidumbre.

Este método depende del tipo de cronómetro a ser calibrado. Si el equipo tiene como base de tiempo un cristal de cuarzo, un receptor inductivo o acústico es usado para monitorear la frecuencia de 32 768 Hz de la base de tiempo del cronómetro con un contador de frecuencias calibrado (el receptor se alimenta de un amplificador para aumentar la intensidad de la señal). Incluso un receptor inductivo puede ser usado para medir la frecuencia que realiza el refresco de la pantalla LCD de un cronómetro digital.

La ventaja de este método es que elimina completamente la incertidumbre introducida por el tiempo de respuesta del operador. La incertidumbre de la medición puede quedar reducida en varios órdenes de magnitud cuando se compara con el método por comparación directa, alrededor de 1×10^{-6} (1 μ s/s) o menor. Este método es mucho más rápido, la medición puede desarrollarse en corto tiempo, al contrario del método por comparación directa que lleva varias horas.

La desventaja de este método es que requiere más equipos comparado con el método por comparación directa, y no trabaja fácilmente con algunos equipos. Este método no verifica la funcionalidad del

cronómetro, sino la funcionalidad de la base de tiempo del cronómetro. Se necesita desarrollar separadamente la función inicio y parada del cronómetro, dejando correr el instrumento por unos minutos u horas dependiendo de su uso. Si se demuestra que el instrumento está contando correctamente, el intervalo de tiempo que se muestra sería exacto.

Este método utiliza cualquier sistema de medición de base de tiempo o un contador de frecuencias con un lector acústico o inductivo para medir la frecuencia interna de oscilación de la base de tiempo del instrumento. La incertidumbre por la resolución del instrumento no necesita ser considerada, desde el punto de vista que el valor no es observado desde el indicador del instrumento a calibrar. De este modo, solo hay una componente de incertidumbre debido a la variación de la medición de la frecuencia del oscilador del cronómetro.

La referencia de este método es el oscilador de la base de tiempo del equipo utilizado para realizar la calibración. Por ejemplo, si un contador de frecuencias es usado, la referencia de la medición es la base de tiempo del oscilador de dicho contador. Para establecer la trazabilidad de las mediciones, la base de tiempo del contador de frecuencias debe estar calibrada. Una segunda alternativa es mantener una señal de referencia del laboratorio de 5 MHz o 10 MHz que puede ser usada como base de tiempo externa al contador de frecuencias y otros equipos de medida. Sin embargo, si una base de tiempo externa es usada y su incertidumbre es conocida, no es necesario calibrar la base de tiempo del oscilador interno del equipo utilizado para realizar la calibración.

Es importante recordar que no se debe desarmar el cronómetro para medir la frecuencia de su base de tiempo haciendo una conexión eléctrica directa. Los osciladores de cristal de estas unidades son muy pequeños y de bajo consumo. Su frecuencia puede cambiar dramáticamente si son

perturbados o descargados por la impedancia de un contador de frecuencias y, en algunos casos, se pueden destruir por conexiones eléctricas incorrectas.

Graham (NIST) [1] presenta dos formas de realizar la medición de la frecuencia fundamental del cronómetro utilizando el método de base de tiempo: mediante un sistema de medida disponible en el mercado con receptor inductivo, o utilizando un contador de frecuencias con receptor o lector acústico.

En la Figura 2.3 se muestra un sistema de medida de base de tiempo de cronómetros disponible en el mercado con receptor inductivo.

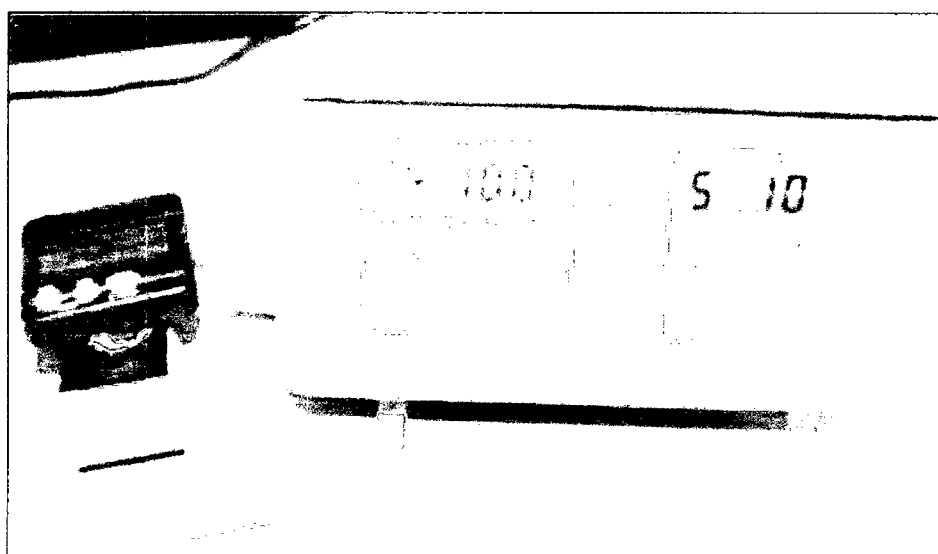


Figura 2.3. Sistema de medida de base de tiempo de cronómetros disponible en el mercado, Graham (NIST) [1].

Debido a que Graham (NIST) [1], no detalla de manera extensa el método inductivo sino solo presenta un sistema disponible en el mercado utilizando un receptor inductivo, se vio la necesidad de desarrollar este

método, el cual se describe en el Capítulo III. El método acústico, el cual utiliza un receptor o lector acústico, se detalla a continuación.

2.3.2 Calibración de Cronómetros Utilizando un Contador de Frecuencias con Lector Acústico

Con un lector acústico y un amplificador se puede medir directamente la base de tiempo de un cronómetro con ayuda de un contador de frecuencias. La lectura en la pantalla del contador puede ser usada para calcular la desviación fraccional de frecuencia ($f(offset)$), de acuerdo con la siguiente relación:

$$f(offset) = \frac{f_{medida} - f_{nominal}}{f_{nominal}} \quad (2.1)$$

donde:

$f(offset)$ es la desviación fraccional de frecuencia,
 $f_{nominal}$ es la frecuencia nominal o fundamental del cronómetro,
 f_{medida} es la frecuencia medida del cronómetro.

Si $f_{nominal}$ es 32 768 Hz y f_{medida} es 32 767,5 Hz, entonces la desviación fraccional de frecuencia es $-0,5 / 32\ 768$ ó $-1,5 \times 10^{-5}$ ó $-0,0015\%$. Para obtener la desviación fraccional de tiempo en segundos por día, se debe multiplicar el número de segundos por día (86 400 s) con la desviación fraccional de frecuencia, es decir:

$$86\ 400 \times (-1,5 \times 10^{-5}) = -1,3 \text{ s por día}$$

Esto significa que el cronómetro se atrasa 1,3 s por día. Se puede notar fácilmente que el error para 1 Hz de un dispositivo de 32 768 Hz

equivale a una desviación fraccional de tiempo alrededor de 2,64 s por día, obtenido de la relación $86\,400 \times (1 / 32\,768) = 2,64$ s por día. Por lo tanto, la desviación a 2 Hz es aproximadamente de 5,3 s por día, la desviación a 3 Hz es aproximadamente de 7,9 s por día, etc. Además si la tolerancia es 10 s por día, entonces 3 Hz, se encuentra dentro de la tolerancia.

Estos resultados muestran que incluso un contador de frecuencias de 8 dígitos de bajo costo proporciona la resolución necesaria cuando se miden dispositivos de 32 768 Hz (por ejemplo 32 768,000 Hz). El último dígito en un contador de frecuencias de 8 dígitos representa 0,001 Hz ó 1 mHz, y una desviación de frecuencia de 1 mHz representa una desviación fraccional de tiempo de tan solo 2,6 ms por día. Con lo cual algunos cronómetros pueden calibrarse en este nivel.

2.4 Trazabilidad del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia

Para la creación del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia en el SNM-INDECOPI se adquirieron diversos equipos, entre ellos, inicialmente se adquirió un oscilador de rubidio Symmetricom 8040C como patrón de referencia del laboratorio. A mediados del 2012 hasta la actualidad el laboratorio ya cuenta un oscilador de cesio Symmetricom 5071A como patrón de referencia. El oscilador de cesio es considerado un patrón primario en tiempo y frecuencia, debido a que la definición del segundo se deriva de este oscilador.

En el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI se distribuye una señal de frecuencia patrón proporcionada por el oscilador de cesio, la cual está referenciada a patrones primarios de frecuencia de la red de países que compone la red virtual SIM Time Network [8]. A través de un sistema GPS SIM, se envía información de 1 pps y 5 MHz del oscilador patrón del SNM-INDECOPI, la cual es evaluada para contribuir con la

creación y mantenimiento de la red virtual SIM Time Network, esta red virtual se describe en la revista de investigación del NIST [7]. De esta manera el patrón del SNM-INDECOPI se mantiene en comparación continua con diferentes osciladores patrones de los países del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) de la región América que componen esta red virtual.

Por medio de la red virtual SIM Time Network es posible conocer el comportamiento del oscilador patrón del SNM-INDECOPI ingresando por medio de internet al siguiente enlace http://gps.nist.gov/scripts/sim_rx_grid.exe [8], ubicar a Perú SIMT (SNM) o INDECOPI, seleccionar, por ejemplo, el primer casillero de diferencia de tiempo en nanosegundos "ns", en donde se realiza una comparación del oscilador patrón de INDECOPI con el oscilador de Estados Unidos SIMT (NIST) o NIST, obteniendo información en tiempo real del comportamiento del oscilador patrón de INDECOPI, en forma numérica y gráfica, para conocer su exactitud y estabilidad en el tiempo con la respectiva trazabilidad a NIST de Estados Unidos (United States).

También es posible realizar esta comparación con otro país que pertenezca a esta red virtual tan solo seleccionando el correspondiente casillero de diferencia de tiempo en nanosegundos "ns". Esta red virtual se refresca cada 10 minutos y la comparación se realiza en forma continua por lo cual es posible conocer el comportamiento en el tiempo de cualquier oscilador que pertenezca a esta red virtual.

Gracias a la red virtual SIM Time Network no es necesario enviar el oscilador patrón del SNM-INDECOPI a calibrar fuera del país, tal como ocurre con otro tipo de cantidades físicas, debido a que la comparación entre osciladores patrones se realiza continuamente, siendo posible la comparación del oscilador patrón del SNM-INDECOPI con otro oscilador

patrón de un INM reconocido a nivel internacional, por ejemplo un INM que contribuye al mantenimiento y creación del Tiempo Universal Coordinado (UTC), como son NIST (Estados Unidos), CENAM (México) y NRC (Canadá), sin necesidad de transportar el oscilador patrón a sus instalaciones. La red virtual SIM Time Network proporciona la trazabilidad adecuada al oscilador patrón del SNM-INDECOPI para realizar mediciones en tiempo y frecuencia. Conseguida la trazabilidad es posible utilizar esta señal de frecuencia patrón como señal de sincronismo para mejorar la base de tiempo del contador y generador de frecuencias del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI.

En la Figura 2.4 se muestra los 19 países que participan en la creación y mantenimiento de la red virtual SIM Time Network [8]. Ingresando por medio de internet al siguiente enlace http://gps.nist.gov/scripts/sim_rx_grid.exe, es posible conocer el comportamiento de los osciladores patrones de los diversos países que participan, incluyendo al oscilador patrón del SNM-INDECOPI.

cuales es usada esta técnica se recomienda siempre que sea posible, realizar el proceso de calibración midiendo directamente la frecuencia de la base de tiempo del instrumento en calibración.

Es importante indicar que mientras sea posible, el contador de frecuencias deberá estar comandado a la frecuencia patrón del laboratorio. Generalmente los equipos utilizados en metrología de tiempo y frecuencia (frecuencímetros, contadores de intervalos de tiempo, sintetizadores de frecuencias, etc.) cuentan con una entrada tipo BNC en su parte posterior (EXT REF INPUT), para 5 MHz o 10 MHz, que permite deshabilitar su oscilador interno y sustituirlo por la frecuencia patrón del laboratorio. Con esta acción las mediciones tienen trazabilidad al patrón de referencia del laboratorio eliminando las contribuciones de incertidumbre por parte del oscilador interno del equipo de medición.

Una importante recomendación al utilizar este método es que se asegure que la señal en calibración que llega al contador de frecuencias tenga la amplitud adecuada, de acuerdo a las características del nivel de disparo (trigger) del contador de frecuencias, así como un adecuado acoplamiento de impedancias, generalmente de 50 Ω . Un mal acoplamiento de impedancias puede ser una importante causa de distorsión armónica de la señal en calibración, ocasionando que el método no funcione correctamente.

En el caso de usar un contador de frecuencias para la medición de frecuencia se tiene el siguiente diagrama de bloques:

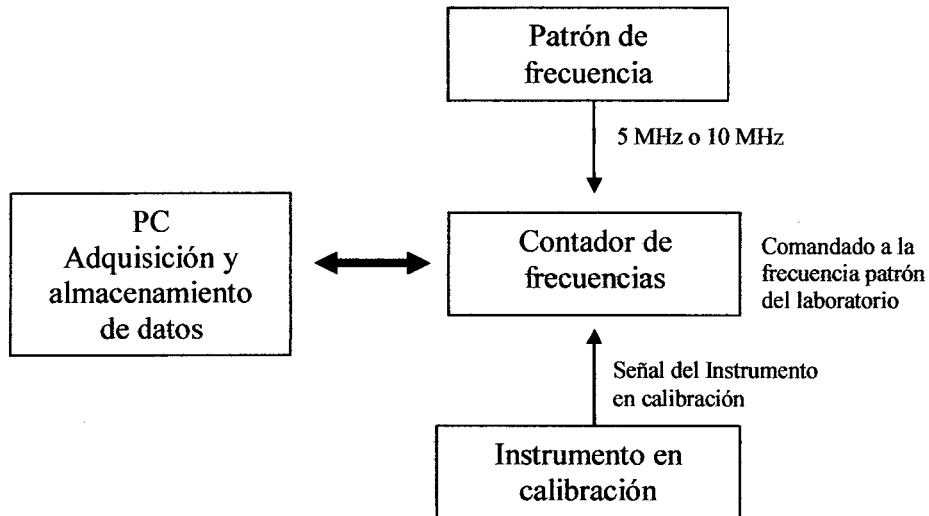


Figura 2.5. Ilustración esquemática del método de medición directa de frecuencia utilizando un contador de frecuencias, CENAM [4].

Debido a que toda medición tiene asociada una incertidumbre de medición, esta debe incorporar los efectos de inestabilidad de la frecuencia de los osciladores bajo calibración, expresada en términos de la desviación de Allan $\sigma_y(\tau)$. Tener en cuenta que a la raíz cuadrada positiva de la varianza de Allan se le llama desviación de Allan, con esta aclaración procedemos a comentar sobre las bondades de la varianza de Allan.

2.6 Varianza de Allan

CENAM [4], resalta las bondades del uso de la varianza de Allan (σ_y^2), como estimador de la estabilidad o incertidumbre en frecuencia de un oscilador. Una correcta estimación de la varianza de Allan requiere un gran número de mediciones. Típicamente para realizar la calibración de un oscilador se recomienda hacer una medición cada segundo por un intervalo, de ser posible de 24 horas. Bajo estas condiciones, el número total de mediciones realizadas es de 86 400. Cada una de las mediciones tiene asociada una incertidumbre de acuerdo a las características del

sistema de medición. En caso de no cumplirse esto, se recomienda que las mediciones sean realizadas al menos por un intervalo de tiempo cuatro veces mayor que el tiempo de medición al cual se realiza la calibración.

Es necesario tener en cuenta 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 esta incluye la incertidumbre asociada a cada medición individual introducida por el propio sistema de medición debida a los diversos parámetros como el tiempo de compuerta, el nivel de disparo (trigger) y la estabilidad de la base de tiempo del sistema de medición. De aquí se deriva 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 estimada por medio de la varianza de Allan puede estar asociado directamente a la estabilidad del instrumento de calibración.

2.6.1 Definición de la Varianza de Allan

La gran parte de equipos electrónicos contienen un oscilador de cuarzo, y el buen funcionamiento de estos equipos depende en buena medida de su oscilador interno. Para asegurar el buen funcionamiento de estos equipos es necesario calibrar su base de tiempo, esto es, el oscilador interno del equipo. En la calibración de osciladores es común hacer mediciones de frecuencias o de diferencia de fase. Estas mediciones contienen información sobre el desempeño de los osciladores en calibración y, con un adecuado tratamiento estadístico, es posible caracterizar los equipos en calibración.

Denotamos por $V(t)$ a la señal de salida de un oscilador, modelándolo de la siguiente manera:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \text{sen}[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] = [V_0 + \varepsilon(t)] \text{sen}\Phi(t) \quad (2.2)$$

con: $\Phi(t) = 2\pi\nu_0 t + \varphi(t)$

donde:

$\Phi(t)$ es la fase,

V_0 es la amplitud nominal,

$\varepsilon(t)$ es el ruido en amplitud,

ν_0 es la frecuencia nominal,

$\varphi(t)$ es el ruido en frecuencia.

De la ecuación (2.2) se asume que se cumplen las siguientes condiciones:

$$\varepsilon(t) \ll V_0 \quad (2.3)$$

$$\left| \frac{d}{dt} \varphi(t) \right| \ll 2\pi\nu_0 \quad (2.4)$$

Es posible determinar los parámetros V_0 , $\varepsilon(t)$, ν_0 , $\varphi(t)$ recurriendo a técnicas estadísticas aplicadas a un conjunto de mediciones en el dominio del tiempo o frecuencia. En la Figura 2.6 se muestra una gráfica para definir la herramienta estadística utilizada en metrología de tiempo y frecuencia conocida como Varianza de Allan.

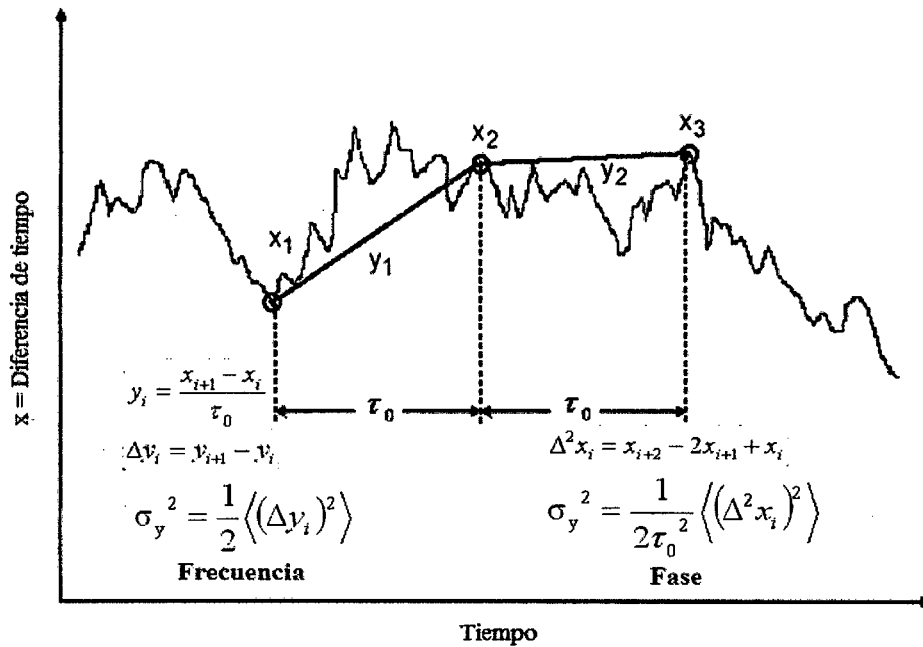


Figura 2.6. Definición de Varianza de Allan, CENAM [4].

Se Denota por $x(t)$ a la diferencia de fase entre dos señales de salida de dos osciladores $V_1(t)$ y $V_2(t)$ de la misma frecuencia nominal ν_0 , expresada en unidades de tiempo y evaluada en el 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.

$$M_x = \{x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots, x(t_N)\} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \quad (2.5)$$

donde $N \gg 1$ y, además, se cumple con la condición $t_{i+1} - t_i = \tau_0$ (ver Figura 2.6), esto 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 (ver ecuación 2.1) entre dos osciladores, denotada por $y(t)$ y determinada en el tiempo t , está definida por la relación:

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0} = \frac{d}{dt} x(t) \quad (2.6)$$

Cuando la única información disponible de x son muestras M_x (ver Figura 2.6), entonces $y(t)$ puede aproximarse a:

$$y_i = y(t_i) = \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau_0} \quad (2.7)$$

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:

$$M_y = \{y(t_1), y(t_2), y(t_3), \dots, y(t_{N-1})\} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_{N-1}\} \quad (2.8)$$

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

$$x(t) = \int_0^t y(t) dt \quad (2.9)$$

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

$$\{y_1, y_2\}, \{y_2, y_3\}, \{y_3, y_4\}, \dots, \{y_{N-2}, y_{N-1}\} \quad (2.10)$$

De la muestra M_y definida por las ecuaciones (2.7) y (2.8). 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:

$$\sigma_y^2 = \langle \sigma_i^2 \rangle \quad (2.11)$$

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

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} \langle (\Delta y_i)^2 \rangle \quad (2.12)$$

donde $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$. También es posible expresar la ecuación (2.12) en términos de las diferencias de fase x_i :

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2\tau_0^2} \langle (\Delta^2 x_i)^2 \rangle \quad (2.13)$$

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

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2\tau_0^2 (N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2 \quad (2.14)$$

σ_y^2 es una medida de la estabilidad en frecuencia del oscilador bajo prueba para tiempos de observación o promediación τ_0 .

2.7 Software de Medición y Tratamiento de Datos

Para poder realizar las mediciones de frecuencias en forma automática es necesario utilizar o desarrollar un software, tanto para realizar las mediciones como para el tratamiento de los datos obtenidos. En nuestro caso, para realizar las mediciones en forma automática, utilizamos el software TimeView proporcionado por el fabricante Fluke del contador de frecuencias, y para el tratamiento de los datos utilizamos el software AMTyF para el análisis de mediciones de frecuencia de libre disposición.

2.7.1 Software TimeView

El software TimeView, el cual lo proporciona el fabricante Fluke del contador de frecuencias que pertenece al Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI, se debe instalar en una PC utilizando su CD de instalación, siguiendo los pasos que se indican en el CD para su descarga. El software TimeView toma el control del contador de frecuencias por medio de un cable USB, para esto se selecciona el icono que le corresponde en la PC (TimeView 2.1), inmediatamente en la pantalla del contador de frecuencias aparecerá la indicación "display off", lo cual indica que el software TimeView tiene el control del equipo.

En el software TimeView se coloca el tiempo de muestreo o promediación a 1 segundo (valor de la ventana de observación), el número de mediciones o la cantidad de muestras según el tiempo que se desea medir (ver Tabla 2.3). Para considerar el número de mediciones, este debe ser por lo menos cuatro veces mayor al tiempo medido. En la Tabla 2.3 se muestra el número de mediciones según el tiempo a medir, el cual está dado en función de un estado 2 en potencias de n , donde $n = 0, 1, 2, 3$, etc.

Tabla 2.3 Número de mediciones según el tiempo a medir.

Valor (n)	Tiempo medido 2 ⁿ (s)	Tiempo medido	Número de mediciones	Tiempo de medición	
				horas	días
0	1	1 s	4	—	—
1	2	2 s	8	—	—
2	4	4 s	16	—	—
3	8	8 s	32	—	—
4	16	16 s	64	—	—
5	32	32 s	128	—	—
6	64	1 min	256	—	—
7	128	2 min	512	—	—
8	256	4 min	1024	—	—
9	512	9 min	2048	—	—
10	1024	17 min	4096	1,1	0
11	2048	34 min	8192	2,3	0
12	4096	1 h	16384	4,6	0
13	8192	2 h	32768	9,1	0
14	16384	5 h	65536	18,2	1
15	32768	9 h	131072	36,4	2
16	65536	18 h	262144	72,8	3
17	131072	36 h	524288	145,6	6

Finalmente se selecciona el botón “iniciar” ubicado en la parte superior de la pantalla del software TimeView para comenzar con la medida observándose que se comienza a construir una gráfica de mediciones de frecuencias, lo cual indica que la medición se está realizando en forma continua. Concluida la medición, es necesario guardar la data obtenida en un archivo electrónico según la extensión del software TimeView. Para esto, seleccionar el botón “guardar” ubicado en la parte superior de la pantalla del software TimeView. Los valores medidos se presentan con el punto “.” como separador decimal dejando un espacio entre cada medición.

El software AMTyF, el cual se detalla a continuación, reconoce el punto “.” como separador decimal y archivos con la extensión “.txt”, por lo que es necesario realizar algunos cambios sólo en la forma de presentación de la data obtenida con el software TimeView para poder exportarlos con el software AMTyF, esto se puede realizar con ayuda de las herramientas de Word y Excel. La PC que se utiliza pertenece al SNM-INDECOPI y está configurada para reconocer la coma como separador decimal, por lo cual los cambios que se deben realizar en la data obtenida es el punto “.” por la

coma “,” como separador decimal y luego eliminar los espacios en cada medición. También es necesario separar la frecuencia del número de mediciones para obtener solo una data de mediciones de frecuencias.

2.7.2 Software AMTyF

El software AMTyF para el análisis de mediciones de frecuencia es un software para el cálculo de la varianza de Allan y análisis gráfico de mediciones de tiempo y frecuencia, de libre disposición, el cual fue desarrollado por el INM de México (CENAM). El Grupo de Trabajo de Tiempo y Frecuencia del SIM (SIM Time and Frequency Metrology Working Group) recomienda el uso del software AMTyF a través de su página web, ver referencia [6]. A través de la página web del Grupo de Trabajo de Tiempo y Frecuencia del SIM, ingresando al siguiente enlace <http://tf.nist.gov/sim/papers.htm> [6], es posible realizar la descarga del software AMTyF en una PC que cumpla con sus requerimientos de instalación. En la referencia [5] se indican los requerimientos de instalación del software AMTyF. La PC que se utiliza pertenece al SNM-INDECOPI y cumple con los requerimientos de instalación del software AMTyF.

El software AMTyF se encuentra instalado en una PC, para poder utilizarlo es necesario seleccionar el icono que le corresponde en la PC (AMTyF v.2), luego proceder a seleccionar el icono “Mediciones de Frecuencia”, inmediatamente aparece la ventana del software. Se procede a seleccionar el icono amarillo “Cargar Archivos de Datos”, ubicado en la parte superior izquierda de la ventana, para cargar el archivo electrónico de la data obtenida con el software TimeView que se guardó inicialmente con la extensión “.txt”. En la ventana del software aparece el icono “Frecuencia Nominal”, en donde se debe colocar el valor de la frecuencia que se desea medir (ver Tabla 2.1), luego presionar “Enter” con el teclado y en el icono “Tau” o ventana de observación se debe colocar el tiempo en el cual se

realiza la medición, normalmente 1 s, luego presionar "Enter" con el teclado para cargar la data obtenida del archivo electrónico ".txt".

Después de un corto tiempo aparecerá en la ventana del software AMTyF los valores de las frecuencias medidas, mostrándose una gráfica de mediciones. En la parte inferior izquierda de la hoja de trabajo "Datos Originales" se puede observar la cantidad de datos "Número de Datos", el valor de la frecuencia nominal "F. Nominal" y el valor de la frecuencia promedio "F. Prom.". En la parte central se muestra la gráfica "Mediciones de Frecuencia", en el cual se observa el comportamiento del oscilador en calibración.

Luego se procede a seleccionar la hoja de trabajo "Desviación Fraccional de Frecuencia", seleccionando el icono "Desviación Fraccional" para cargar los datos obtenidos en la hoja de trabajo "Datos Originales", obteniendo después de un corto tiempo la desviación fraccional de frecuencia promedio, cuyo valor se puede observar en la parte inferior de la hoja de trabajo. En la parte central se muestra la gráfica "Desviación Fraccional de Frecuencia", en la cual se observa el comportamiento de la desviación fraccional de frecuencia obtenida del oscilador en calibración.

Finalmente se procede a seleccionar la hoja de trabajo "Raíz de la Varianza de Allan", seleccionando el icono "Raíz de la Varianza de Allan" para cargar los datos obtenidos en la hoja de trabajo "Desviación Fraccional de Frecuencia" obteniendo luego de un corto tiempo la raíz de la varianza de Allan hasta el tiempo que se desea medir (ver Tabla 2.3), cuyos valores se pueden observar en la parte izquierda de la pantalla. En la parte central se muestra la gráfica "Raíz de la Varianza de Allan", en la cual se observa el comportamiento de la estabilidad o incertidumbre del oscilador en calibración en términos de la raíz de la varianza de Allan. Seleccionando el icono "Flicker Frequency" se obtienen las barras o límites de incertidumbre,

los cuales aparecen en color rojo en la gráfica. Este icono corresponde al ruido asociado a las fluctuaciones en las condiciones ambientales bajo las que opera el oscilador.

Es posible utilizar el icono "Guardar" ubicado en la parte superior izquierda de la pantalla del software AMTyF para guardar las gráficas y los reportes o datos obtenidos. Los reportes de datos obtenidos de incertidumbre se guardan en otro archivo electrónico con la extensión ".txt". Este archivo electrónico se puede exportar con las herramientas de Excel.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Método de Inducción

Como se indicó en el punto 2.3.1, existen dos formas de medir la frecuencia del oscilador interno del cronómetro, usando el método inductivo y el método acústico. El método acústico requiere un sensor acústico (ultrasónico) de alto costo de adquisición, el cual debe ser importado, además este método requiere que las vibraciones debidas a otros equipos sean nulas. Considerando el alto costo del sensor y teniendo en cuenta que en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI se cuenta con un sistema de aire acondicionado y en general varios equipos de medición que generan vibraciones, no fue posible implementar el método acústico.

Por otro lado, el buen funcionamiento de los instrumentos depende directamente de su base de tiempo y, en el caso de los cronómetros, la base de tiempo es un oscilador de cuarzo. El cuarzo tiene la propiedad de ser un material piezoeléctrico, por lo tanto existe la presencia de un campo eléctrico implicado en el circuito interno de los cronómetros. Por este motivo se optó por utilizar el método inductivo desarrollando un sistema receptor de campo eléctrico (receptor inductivo), cuya función sea generar una señal eléctrica a partir de la recepción del campo eléctrico generado por el circuito eléctrico del cronómetro y su oscilador interno. Esta señal lleva información de las formas de las ondas y las frecuencias involucradas en los cronómetros.

Es necesario colocar este sistema receptor de campo eléctrico en un blindaje que actúe como una jaula de Faraday para evitar campos eléctricos externos (por ejemplo debido a equipos situados alrededor, lámparas fluorescentes, ruido de la línea de alimentación, entre otros). El blindaje metálico sirve tanto para no dejar salir los campos encerrados en su interior como para evitar que ingresen campos eléctricos externos. La atenuación que produce la superficie del blindaje metálico es considerada principalmente por tres factores [12]:

- La energía de la onda incidente del campo eléctrico externo es reflejada por la superficie del blindaje debido al desacople de impedancia entre el medio y la vecindad del metal.
- La energía de la onda del campo eléctrico externo que cruza la superficie del metal se atenúa al pasar a través del blindaje.
- La energía de la onda del campo eléctrico externo que alcanza la cara opuesta del metal encuentra otro desacople de impedancias entre el blindaje y el medio, por lo que es reflejada dentro del blindaje.

De este modo, cuando se utiliza una caja metálica como blindaje y ésta es expuesta a ondas de campos eléctricos externos, la caja metálica se polariza quedando cargada de manera positiva en el mismo sentido del campo eléctrico externo y de forma negativa en la dirección contraria. Esta distribución de cargas eléctricas en la superficie externa de la caja metálica produce un campo eléctrico de la misma magnitud del campo eléctrico externo pero en dirección opuesta, por lo que la suma de los campos en el interior del blindaje es nula. Los metales utilizados para atenuar campos eléctricos son el aluminio y el cobre.

El sistema a desarrollar estará basado en la inducción del campo eléctrico que genera el oscilador interno del cronómetro mediante el uso de dos placas paralelas, formando así un condensador. El condensador de placas paralelas consiste de un par de planos conductores colocados en forma paralela, en el cual un plano se carga de manera positiva y el otro de manera negativa, entonces según la ley de Gauss [13] existe un campo eléctrico que va desde el plano cargado de manera positiva al plano cargado de manera negativa en forma perpendicular a la superficie. Para lograr uniformidad del campo eléctrico es recomendable que las dimensiones del área de los planos sea mucho mayor que la distancia de separación entre ellos. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de un condensador de placas paralelas.

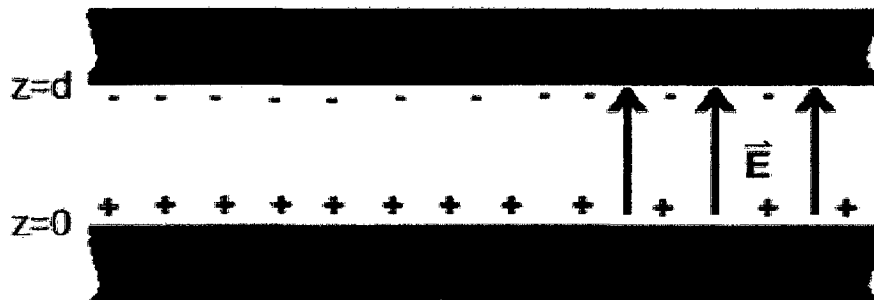


Figura 3.1. Diagrama de un condensador.

Como el condensador es un elemento capaz de almacenar energía eléctrica [15], esta se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$W_E = \frac{1}{2} \int_{vol} \epsilon_0 E^2 dv \quad (3.1)$$

donde:

W_E es la energía almacenada en el condensador,
 E es el campo eléctrico entre las placas,

dv es un diferencial del volumen del condensador,
 ϵ_0 es la permeabilidad eléctrica del aire.

Es posible reescribir la integral en la ecuación (3.1) en una integral doble considerando el área de las placas así como la separación entre estas, obteniendo:

$$W_E = \frac{1}{2} \int_0^s \int_0^d \epsilon_0 E^2 dz dS = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 Sd \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) nos muestra que si se proporciona energía al condensador, este la almacena en forma de campo eléctrico. De manera análoga, si se aplica un campo eléctrico entre las placas, se almacenaría una energía en el condensador, el cual es el parámetro que nos interesa para poder capturar una señal relacionada con el oscilador interno del cronómetro a partir del campo eléctrico que éste genera.

La inducción en las placas paralelas se debe a las corrientes de desplazamiento que se generan al haber una variación del campo eléctrico en el tiempo. Utilizando las ecuaciones de Maxwell [15] es posible establecer una relación entre la densidad de corriente de desplazamiento (I_d) y la densidad de flujo eléctrico (\vec{D}) de la siguiente manera:

$$\vec{I}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.3)$$

La densidad de flujo eléctrico se relaciona con el campo eléctrico mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.4)$$

Como el material entre las placas es aire, \vec{P} es cero, debido a que no hay polarización en el medio. Reemplazando (3.4) en (3.3), la densidad de corriente de desplazamiento estaría dada por:

$$\vec{I}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial(\epsilon_0 \vec{E})}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.5)$$

El sistema receptor de campo eléctrico a desarrollar utilizará el efecto capacitivo, por medio del modelo del condensador de placas paralelas, para inducir una pequeña corriente en las superficies conductoras debido a la variación del campo eléctrico generado por el oscilador interno del cronómetro. Esta señal que se obtiene es una señal que se repite periódicamente debido a la corriente que se está induciendo en las placas paralelas. Por medio de la medición de esta señal periódica se obtiene la frecuencia que se induce en el cronómetro.

Se realizaron algunas pruebas para observar y analizar la señal capturada del cronómetro por medio de las placas paralelas, utilizando un osciloscopio se pudo observar que la señal capturada es ruidosa con una amplitud pequeña, alrededor de 20 mV, por lo cual no fue posible realizar un análisis de la señal.

En la Figura 3.2 se muestra una foto de la señal capturada de un cronómetro por medio de las placas paralelas.

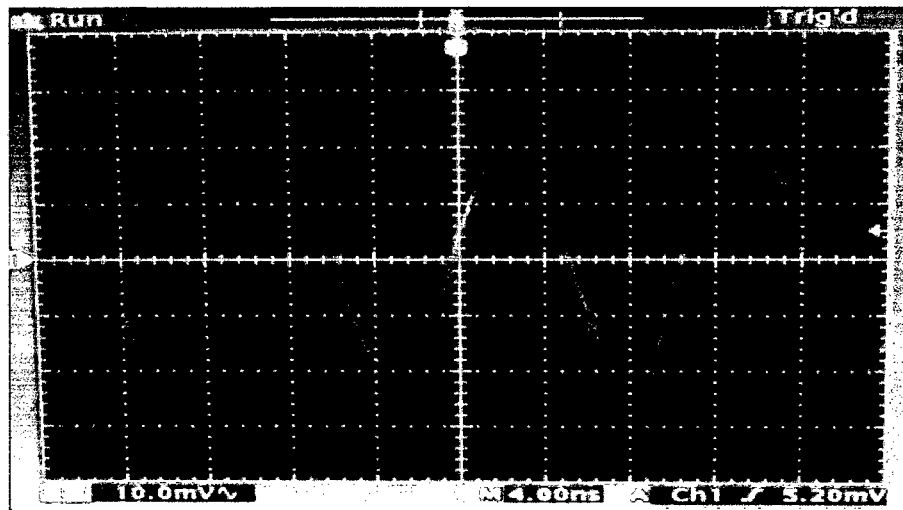


Figura 3.2. Señal capturada de un cronómetro por medio de las placas paralelas.

Como la amplitud de señal capturada es pequeña para su tratamiento, es necesario utilizar un amplificador para observar y analizar la señal capturada con ayuda de un osciloscopio. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama del sistema receptor de campo eléctrico propuesto para capturar la señal del cronómetro, el cual utiliza el principio de jaula de Faraday para atenuar el efecto de campos eléctricos externos por medio de un blindaje metálico.

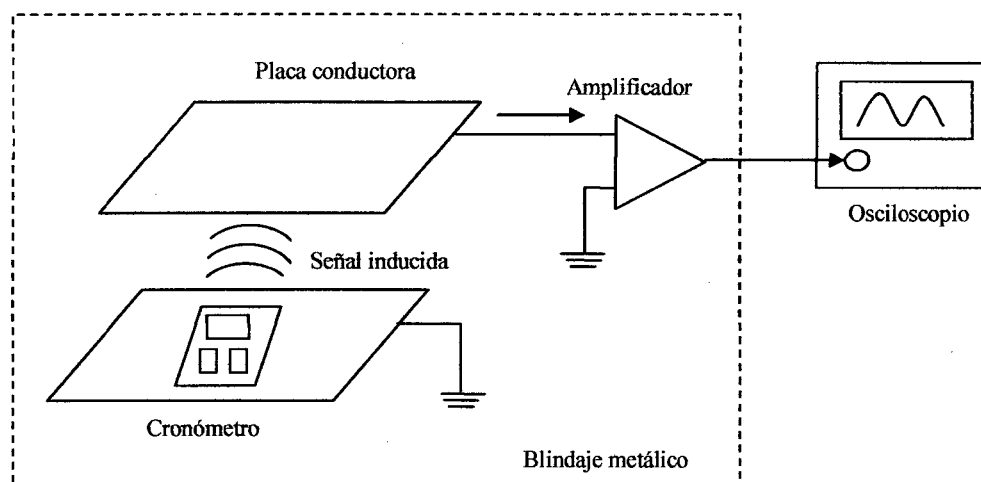


Figura 3.3. Diagrama del sistema receptor de campo eléctrico propuesto para analizar las señales capturadas del cronómetro.

Los circuitos implementados internamente en los cronómetros están basados en divisores digitales de frecuencia, los cuales emiten señales digitales a un sistema contador (ver Figura 2.2). Por medio del arreglo indicado en la Figura 3.3 se observó en el osciloscopio que las señales capturadas del cronómetro corresponden a señales sinusoidales. Realizando pruebas con una variedad de cronómetros que se utilizan en los laboratorios del SNM-INDECOPI, se pudo notar que la intensidad del campo eléctrico no es igual para todos los cronómetros, debido a que los instrumentos pueden contener ya sea un blindaje metálico con características diferentes según el espesor, o un tipo de material que no permite su radiación al exterior.

En el osciloscopio se observó que los impulsos de mayor amplitud generados por los cronómetros presentan valores de frecuencias diferentes, lo cual indica que existe libertad de diseño en la fabricación de los circuitos internos de los cronómetros. Estos impulsos observados corresponden a una estandarización en el uso de un oscilador de cuarzo como base de tiempo para el circuito interno del cronómetro, debido a que

estos valores corresponden a submúltiplos de la frecuencia fundamental del cuarzo, los mismos que se indican en la Tabla 2.1. De este modo, se pudo comprobar que los impulsos de mayor amplitud de estas señales corresponden a la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro.

También se observó la presencia de impulsos de menor amplitud y de otras frecuencias que corresponde a señales digitales de menor potencia que también se inducen. Los impulsos que corresponden a la frecuencia fundamental del cuarzo presentan una amplitud muy pequeña, la cual se confunde con el ruido total de la señal, dificultando su medición. Por este motivo se optó por capturar la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro debido a que los impulsos que generan estas señales son de mayor amplitud con respecto a otras frecuencias capturadas, lo cual facilita su medición.

El método de inducción propuesto en el presente trabajo se basa en el método de base de tiempo, Graham (NIST) [1], el cual se realiza con algunas variantes, no midiendo directamente la frecuencia fundamental del cronómetro sino un submúltiplo de esta frecuencia por medio de la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro. El sistema receptor de campo eléctrico propuesto consiste en un sistema detector de frecuencias para 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 del cronómetro de 32 768 Hz.

3.1.1 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 metálico contra estas señales, en ella se coloca tanto el cronómetro como el sistema detector de frecuencias.

La señal es capturada por medio de dos placas conductoras de 12 cm de largo x 12 cm de ancho, de tal manera que se cubre las dimensiones del cronómetro, obteniendo señales con una amplitud alrededor de 20 mV. Esta señal debe ser amplificada hasta obtener valores en el orden de 4 V para poder tratarla. 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 adecuado de la amplitud de la señal deseada.

En la Figura 3.4 se muestra una foto de las formas de ondas de las frecuencias capturadas de un cronómetro luego de la amplificación. Por medio del osciloscopio se puede observar que la señal capturada corresponde a una señal sinusoidal. Con el potenciómetro se realizó el ajuste de la amplitud de la señal capturada al valor de referencia de 4 V para su tratamiento, observándose otras señales de menor amplitud que también se inducen.

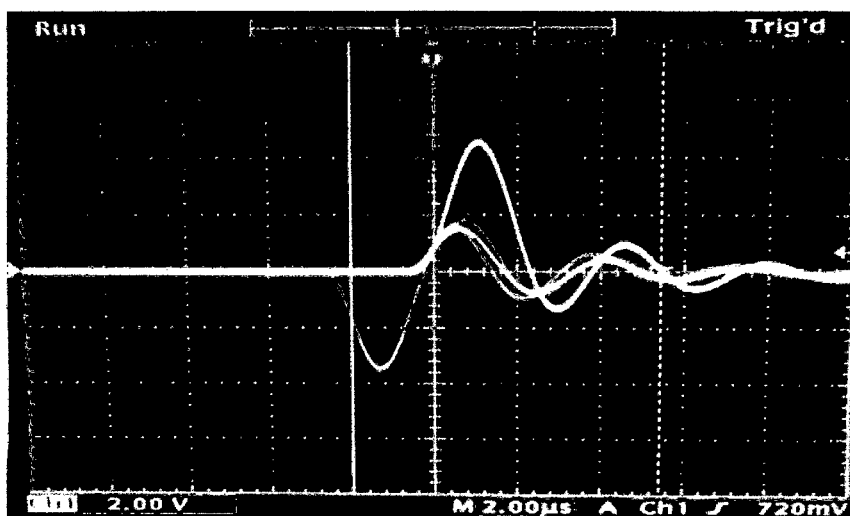


Figura 3.4. Formas de ondas de las frecuencias capturadas de un cronómetro.

Luego de amplificar la señal capturada se observó que estaban presentes otras señales a diferentes frecuencias pero de menor amplitud, en el orden de 100 mV a 600 mV, por lo que fue necesario utilizar un filtro y un comparador para eliminar estas señales no deseadas cuyo nivel de referencia no fuese mayor a 4 V. Con el filtro se elimina la tensión continua que pueda contener la señal amplificada, permitiendo solo el paso de la tensión alterna de la señal amplificada. Con el comparador se eliminan las señales de frecuencias que cuentan con una amplitud menor al nivel de referencia de 4 V.

Finalmente se utiliza un circuito acondicionador de señal debido a que los pulsos capturados son de muy corta duración, normalmente alrededor de 10 μ s, y el contador de frecuencias no puede captarlos adecuadamente. El circuito acondicionador de señal a partir de pulsos con una duración del orden 10 μ s genera pulsos con una duración del orden de 100 μ s, el cual es un valor que puede capturar adecuadamente el contador de frecuencias del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI para poder realizar las mediciones.

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama del sistema detector de frecuencias, el cual se conecta al contador de frecuencias por medio de un cable coaxial o BNC. El sistema detector de frecuencias, el cual se encuentra dentro de la caja metálica para evitar las interferencias externas, muestra que la señal capturada del cronómetro por medio de la placa conductora debe ser amplificada, luego filtrada y comparada, para finalmente ser acondicionada y poder realizar la medición de la frecuencia inducida del cronómetro con ayuda de un contador de frecuencias.

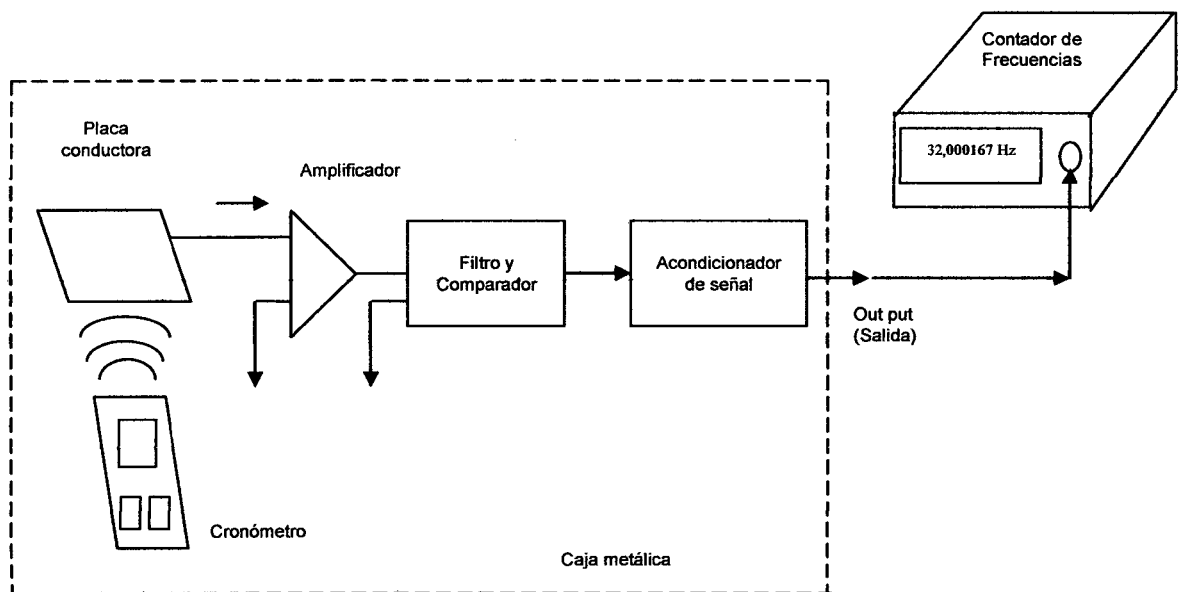


Figura 3.5. Diagrama del sistema detector de frecuencias.

Para evitar la interferencia del campo magnético del transformador que compone la fuente de alimentación, se colocó la fuente alimentación del sistema detector de frecuencias fuera de la caja metálica. Se utiliza una fuente externa de ± 8 V, la cual está separada alrededor de 40 cm de la caja metálica.

Colocando un osciloscopio a la salida del sistema detector de frecuencias se observa la forma y la amplitud de la señal capturada y, en caso de ser necesario, se ajusta la amplitud de la señal capturada con ayuda del potenciómetro del sistema detector de frecuencias al valor de referencia de 4 V. Asegurando este valor de referencia, el sistema detector de frecuencias funciona adecuadamente realizando la calibración de cualquier tipo de cronómetro, con lo cual se supera la desventaja del método de base de tiempo (ver punto 2.3.1), el cual no trabaja fácilmente con algunos equipos.

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama electrónico del sistema detector de frecuencias que se desarrolló en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencias del SNM-INDECOPI para capturar la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro.

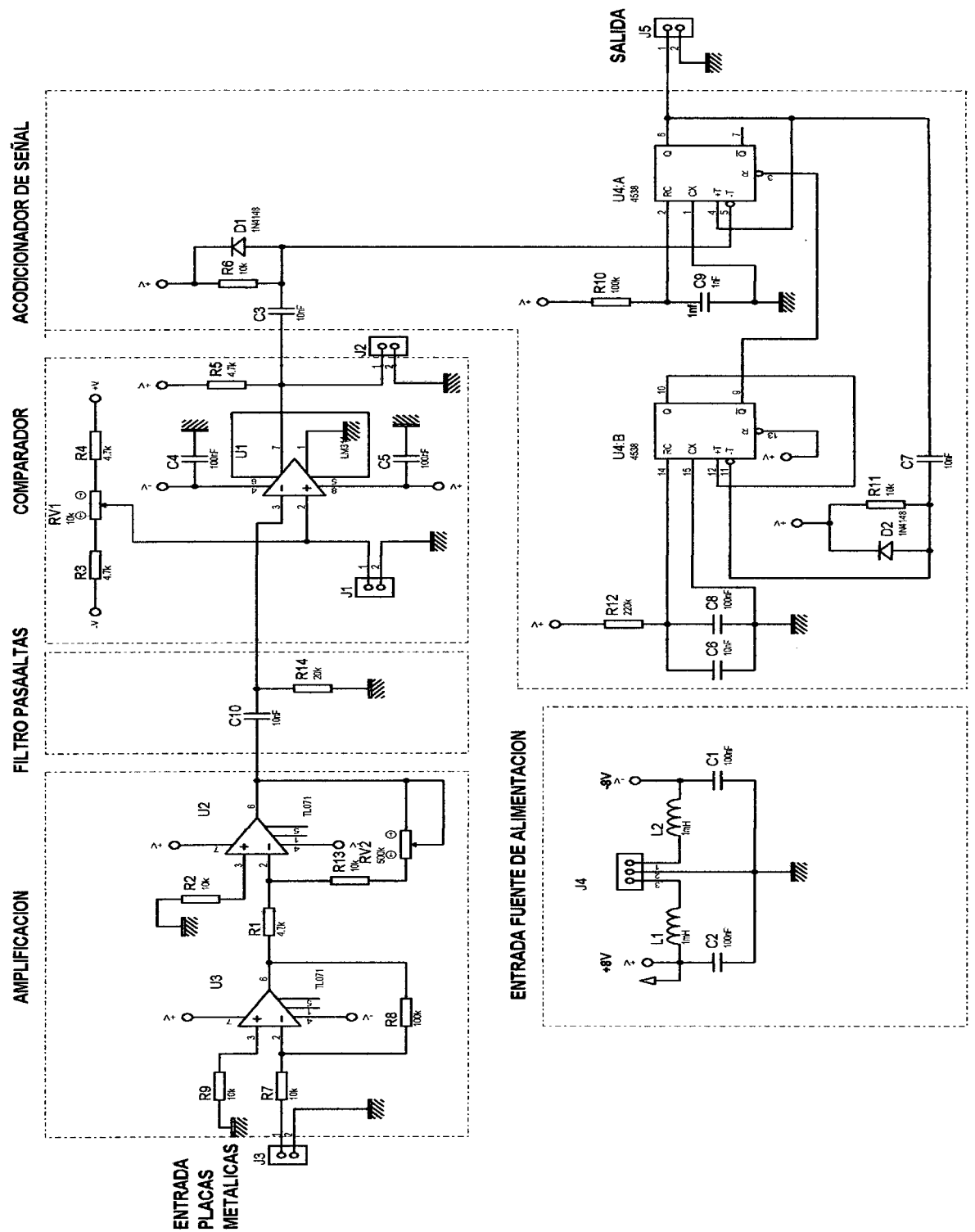


Figura 3.6. Diagrama electrónico del sistema detector de frecuencias.

En la Tabla 3.1 se detallan los principales componentes utilizados en el diagrama electrónico del sistema detector de frecuencias indicando su correspondiente símbolo con su valor asignado.

Tabla 3.1. Lista de componentes del sistema detector de frecuencias.

Componente	Símbolo	Valor
Resistencias	R1, R3, R4, R5	4,7 k Ω
	R2, R6, R7, R9, R11, R13	10 k Ω
	R8, R10	100 k Ω
	R12	220 k Ω
	R14	20 k Ω
Condensadores	C1, C2, C4, C5, C8	100 nF
	C3, C6, C7, C10	10 nF
	C9	1 nF
Circuitos integrados	U1	LM311 (comparador)
	U2, U3	TL071 (opamp)
	U4	CD4538 (temporizador)
Diodos	D1, D2	1N4148
Misceláneo	J1, J2, J3, J5	MOLEX (2 pines)
	J4	BORNERA (3 pines)
	L1, L2	Bobina de choque
	RV1	Potenciómetro 10 k Ω
	RV2	Potenciómetro 500 k Ω

El uso de los componentes varía según el diseño del sistema detector de frecuencias y, de manera general, se puede indicar lo siguiente:

- En la etapa de amplificación, las resistencias y potenciómetros sirven para ajustar la ganancia en la amplificación.

- En la etapa de comparación, las resistencias actúan como divisor de tensión para proporcionar una señal de referencia de comparación, mientras que los condensadores se usan como filtros para la fuente de alimentación.
- En la etapa de acondicionamiento de la señal, las resistencias y condensadores se utilizan para establecer el tiempo de duración del pulso de salida.
- El circuito integrado LM311 es usado para la comparación de dos señales de entrada. Si la entrada positiva es mayor que la entrada negativa la salida es positiva, caso contrario es negativa.
- Los circuitos integrados TL071 son amplificadores operacionales, y se usan para la amplificación o atenuación de la señal.
- El circuito integrado CD4538 se usa para la temporización mediante el uso de resistencias y condensadores.
- Los diodos se utilizan para eliminar o atenuar la sobretensión que se puede producir cuando la señal pasa por el condensador y la resistencia.
- Los Molex se utilizan como conectores de entrada y salida para verificar el funcionamiento de cada etapa, y la bornera se utiliza como conector de la fuente de alimentación.
- Los condensadores y bobinas de choque en la entrada de alimentación actúan como filtro para evitar el ruido eléctrico presente.

- Los condensadores cerca del comparador también actúan como filtro en la alimentación positiva y negativa.

En la Figura 3.7 se muestra una foto del sistema detector de frecuencias desarrollado en el SNM-INDECOPI, en donde se pueden observar las componentes mencionadas.

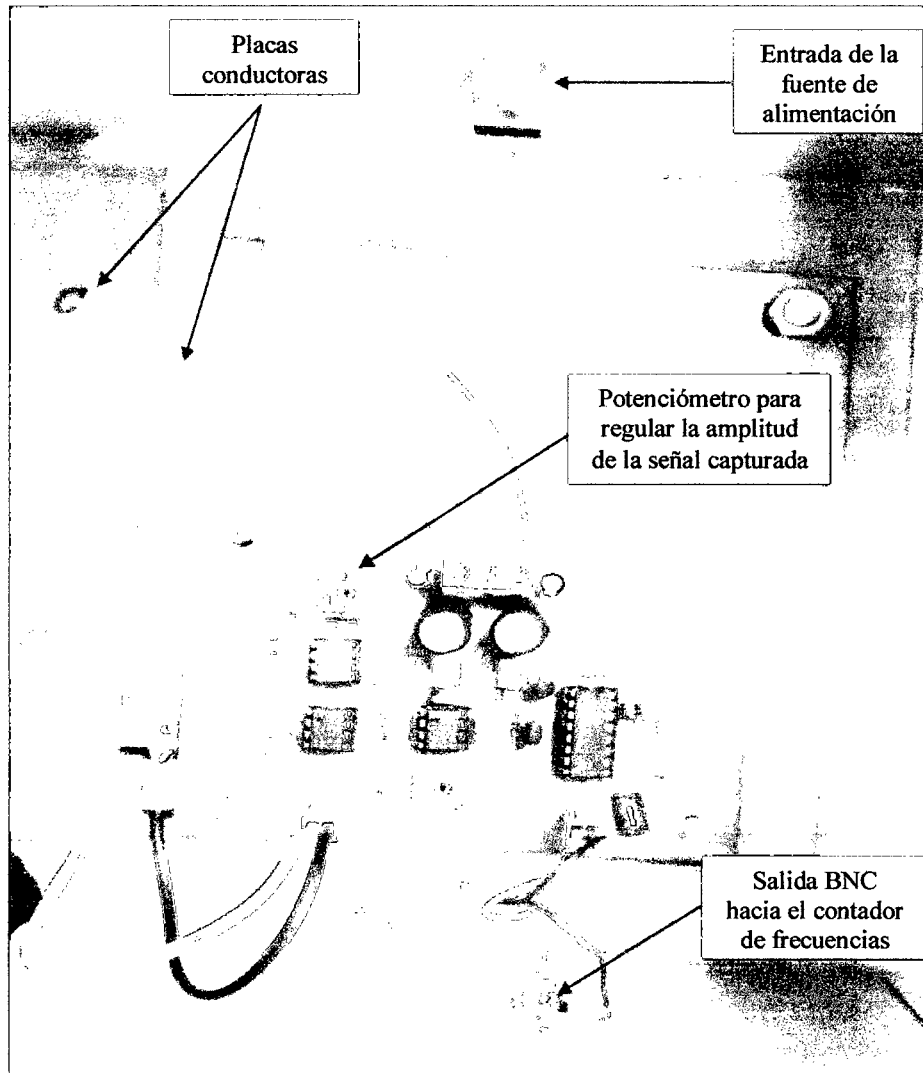


Figura 3.7. Sistema detector de frecuencias desarrollado en el SNM-INDECOPI.

3.1.2 Sistema de Medición

El sistema de medición se compone de un sistema detector de frecuencias, un contador de frecuencias, un osciloscopio y una computadora (PC) para realizar las medidas en forma automática.

El sistema detector de frecuencia ya ha sido ampliamente comentado en el punto 3.1.1.

El contador de frecuencias Fluke PM6690 se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio que proporciona el oscilador de cesio para mejorar su base de tiempo. Esta genera desvíos y derivas de su base de tiempo despreciables, además le proporciona la trazabilidad adecuada al contador de frecuencias. Con este equipo se medirá la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro.

Haciendo uso del osciloscopio Tektronix TDS3012C se puede observar la señal capturada por el sistema detector de frecuencias, verificando que la amplitud de la señal sea la adecuada para poder realizar las mediciones. En caso la amplitud de la señal capturada no sea la adecuada es posible ajustarla usando el potenciómetro del sistema detector de frecuencias para aumentar o disminuir la amplitud al valor de referencia de 4 V (ver Figura 3.4).

También es necesario utilizar o implementar un software, tanto para realizar las medidas como para su tratamiento en forma automática. En nuestro caso, para realizar las mediciones de frecuencia, utilizamos el software TimeView proporcionado por el fabricante Fluke del contador de frecuencias. Para el tratamiento de los datos utilizamos el software AMTyF para el análisis de mediciones de frecuencia, el cual es un software desarrollado por el INM de México (CENAM) de libre disposición.

Los dos software de medición y tratamiento de datos se encuentran instalados en una PC. El requerimiento de la PC debe ser tal que permita realizar mediciones con un número grande de muestras y sea compatible con los requerimientos del software a instalar. La PC del SNM-INDECOPI cumple con estos requerimientos de instalación.

En la Figura 3.8 se puede apreciar una foto del sistema de medición compuesto por los equipos mencionados.

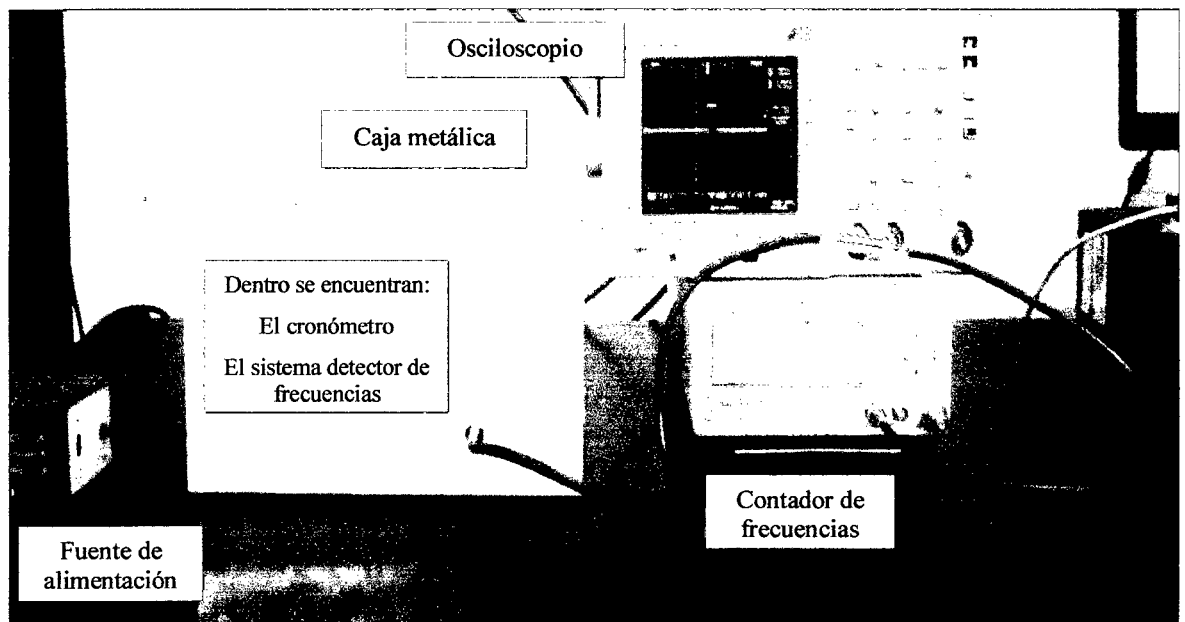


Figura 3.8. Sistema de medición.

3.1.3 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 de implementar y está conformado por una antena y un generador de señal.

Como antena se usa un arreglo simple que consiste en una resistencia de $10\text{ k}\Omega$, la cual se conecta al 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 para mejorar sus características, proporcionándole además la trazabilidad adecuada al generador de señal.

Por medio de este arreglo se pudo conocer la intensidad del campo eléctrico emitido por un cronómetro variando la tensión de salida del generador de señal, observándose en el osciloscopio que el sistema detector de frecuencias captura adecuadamente señales de frecuencias con una amplitud mayor a 3 V , por lo cual se decidió realizar la amplificación de la señal a un valor de referencia de 4 V . Este arreglo también permitió comprobar el funcionamiento de las componentes utilizadas en el circuito electrónico del sistema detector de frecuencia, detectando que componentes debían ser mejoradas.

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama del arreglo utilizado para realizar la verificación del sistema detector de frecuencias, en donde utilizando el generador de señal se aplica una señal de frecuencia en modo pulso de 32 Hz hasta obtener una amplitud de 4 V a través de la antena (resistencia de $10\text{ k}\Omega$), la cual se encuentra dentro de la caja metálica para evitar las interferencias externas. La señal inducida es capturada por la placa conductora del sistema detector de frecuencias para ser medida por el contador de frecuencias, verificando así su funcionamiento y su inmunidad contra influencias externas.

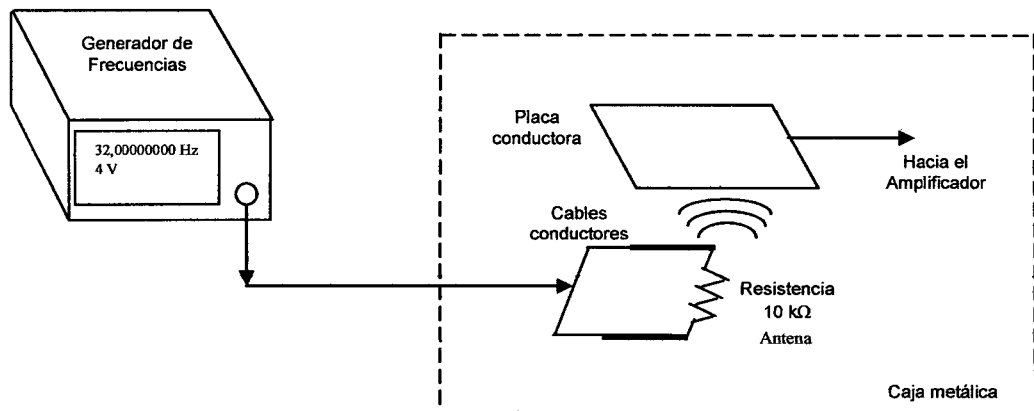


Figura 3.9. Diagrama del arreglo utilizado para realizar la verificación del sistema detector de frecuencias.

Considerando como la mejor exactitud de un cronómetro digital un valor de $\pm 3 \times 10^{-6}$ (0,0003%), entonces en la verificación del sistema detector de frecuencias se debe obtener un valor de incertidumbre mejor a la exactitud indicada, por lo menos diez veces mejor (ver punto 2.6), por lo cual para la verificación del sistema detector de frecuencias es posible considerar como tolerancia de incertidumbre de medición un valor de $\pm 1 \times 10^{-7}$ ó 0,1 $\mu\text{s/s}$. En caso de no cumplir con esta tolerancia se deberá verificar el funcionamiento del sistema detector de frecuencias.

En la Figura 3.10 se puede apreciar una foto de la verificación del sistema detector de frecuencias compuesto por los equipos mencionados.

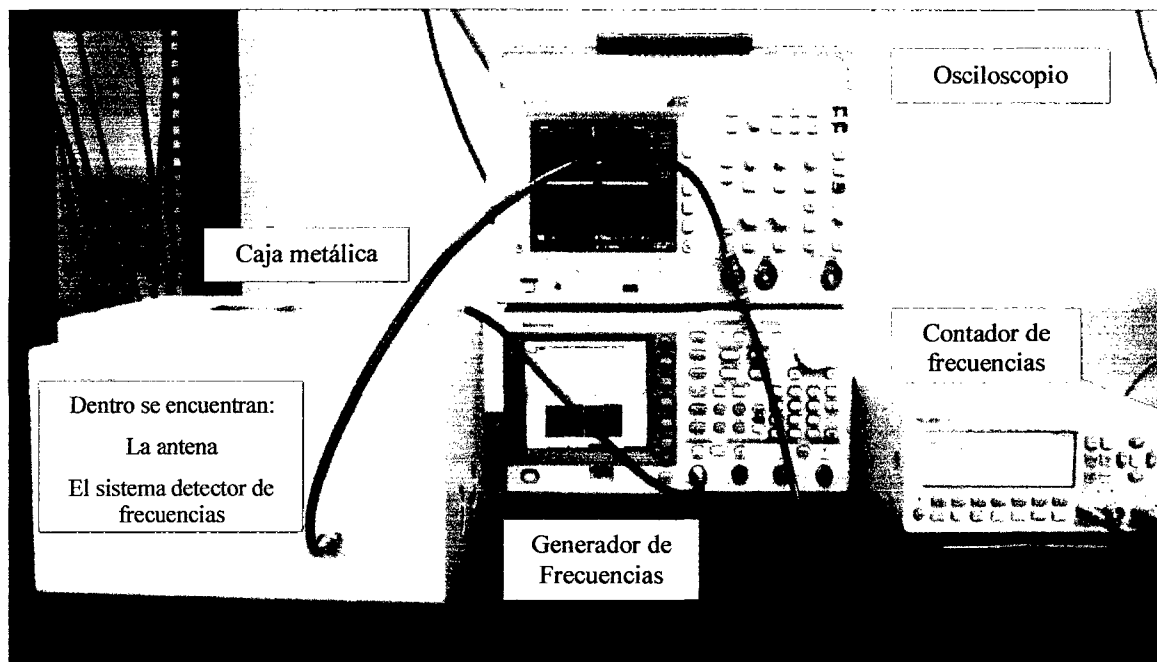


Figura 3.10. Verificación del sistema detector de frecuencias.

3.2 Equipos y Materiales

Para poder realizar la calibración del cronómetro por el método de inducción se cuenta con un sistema de medición compuesto por los siguientes equipos:

- Oscilador de Cesio Symmetricom 5071A.
- Contador de frecuencias Fluke PM6690.
- Sistema detector de frecuencias desarrollado en el SNM-INDECOPI.

Como equipos adicionales se requieren:

- Osciloscopio Tektronix TDS3012C.
- Generador de frecuencias Tektronix AFG3102.
- Una PC para realizar las mediciones en forma automática.

Como materiales se requieren:

- Cables y adaptadores con terminales BNC de 50Ω para realizar las conexiones.
- Una pequeña antena para verificar el funcionamiento del sistema detector de frecuencias y su inmunidad contra influencias externas.
- Termómetro con error máximo permisible de $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Con este instrumento se tomarán los valores de la temperatura ambiente a la que se realiza la calibración.
- Higrómetro con error máximo permisible de $\pm 5 \%$. Con este instrumento se tomarán los valores de la humedad relativa del ambiente a la que se realiza la calibración.

En general los equipos y materiales pertenecen al SNM-INDECOPI, por lo cual solo se tuvo que invertir en el desarrollo del sistema detector de frecuencias. El sistema detector de frecuencias se desarrolló con un presupuesto aproximado de 2 000 nuevos soles.

3.3 Preparación

Antes de realizar la calibración del cronómetro digital por el método de inducción se comprobará que:

- Se disponen de los cables y adaptadores necesarios para realizar las conexiones.
- Se cuenta con el manual o especificaciones del cronómetro a calibrar, para conocer su error máximo permisible según el fabricante. La desviación fraccional de frecuencia obtenida en la

calibración se comparará con el error máximo permisible del instrumento.

- Los instrumentos deberán ser estabilizados por lo menos una hora a la temperatura ambiente. En el caso que se especifiquen condiciones de pre acondicionamiento, estas deberán cumplirse.
- Las especificaciones de los patrones e instrumento a calibrar generalmente se dan a una temperatura ambiente entre 18 °C y 28 °C, margen normal en el que mantienen sus especificaciones. Si no se tuviera indicación de la temperatura de referencia podría considerarse una temperatura ambiente de $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$.
- La humedad relativa no deberá sobrepasar el 80%, o de lo que se indique en las especificaciones de los patrones e instrumento a calibrar.

3.4 Proceso de Calibración

- 1° Conectar la fuente de alimentación del sistema detector de frecuencias, así como los demás equipos a la tensión de línea. Esperar un tiempo prudente para la estabilización de los equipos, este tiempo no debe ser menor a 1 hora. Por lo general los equipos del laboratorio se encuentran conectados a la tensión de línea de manera diaria por lo cual es posible omitir el tiempo de estabilización.
- 2° Verificar que el contador de frecuencias patrón se encuentra comandado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio para mejorar su base de tiempo, proporcionándole la trazabilidad adecuada. Es necesario verificar, en la parte

posterior del contador de frecuencias, que su entrada de referencia externa "EXT REF INPUT" se encuentra conectado por medio de un cable BNC a la frecuencia patrón del laboratorio. El contador de frecuencias utilizado se conecta automáticamente a referencia externa en el momento que se conecta una frecuencia de referencia en su entrada "EXT REF INPUT" ubica en su parte posterior.

- 3° Conectar el sistema detector de frecuencias tanto al osciloscopio como al contador de frecuencias (ver Figura 3.8) colocando el cronómetro a calibrar en el sistema detector de frecuencias (dentro de la caja metálica), sin necesidad de activarlo.
- 4° Observar la señal capturada en el osciloscopio y, en caso de ser necesario, ajustar la amplitud de la señal de frecuencia capturada con ayuda del potenciómetro del sistema detector de frecuencias al valor de referencia de 4 V (ver Figura 3.4).
- 5° El software TimeView comanda al contador de frecuencias por medio de una PC. Activar el software TimeView y colocar el tiempo de muestreo a 1 segundo, el número de muestras según el tiempo que se desea medir (ver Tabla 2.3), finalmente activar el botón iniciar para comenzar con la mediciones de frecuencias. En el software TimeView se muestra una gráfica de medición continua de frecuencias lo cual indica que la medición se está realizando adecuadamente.
- 6° Los datos obtenidos con el software TimeView del contador de frecuencias serán guardados en un archivo electrónico según la extensión que se tenga asignada, luego es necesario cambiar la extensión de este archivo electrónico a la extensión ".txt", ya que

el software AMTyF reconoce la extensión “.txt”. Al realizar este cambio se eliminan las primeras filas que corresponden a los datos del software dejando solo los datos obtenidos en la medición en donde se aprecia, por ejemplo, el valor de la primera medición (1) junto a un primer valor de frecuencia obtenida, el valor de la segunda medición (2) junto al segundo valor de frecuencia obtenida, así sucesivamente para cada valor medido hasta completar el número de mediciones. Los valores medidos se presentan con punto “.” como separador decimal dejando un espacio entre cada medición. Con ayuda de Word y Excel es posible limpiar la data obtenida en el archivo electrónico “.txt”, obteniendo solo las mediciones de frecuencias para poder exportar estos datos con el software AMTyF.

7° Se seleccionan los datos obtenidos en el archivo electrónico “.txt”, con ayuda de las herramientas “Copiar” y “Pegar”, se colocan estos datos en un archivo Word, con ayuda de las herramientas de Word se cambia el punto “.” por la coma “,” como separador decimal, para esto se usa la herramienta “Reemplazar”, luego en la opción “Buscar” se coloca “.”, en la opción “Reemplazar con” se coloca “,” y se selecciona la opción “Reemplazar todos”. Luego se procede a eliminar los espacios entre datos usando la herramienta “Reemplazar” - “Mas” - “Especial” - “Marca de Párrafo”, en la opción “Buscar” se coloca “^p^p”, en la opción “Reemplazar con” se coloca “^p”, seleccionando la opción “Reemplazar Todos”. Luego de realizar estos pasos se observa que los datos obtenidos se presentan con coma “,” como separador decimal y sin espacio entre datos. Se seleccionan los datos y con ayuda de las herramientas “Copiar” y “Pegar”, se vuelven a colocar estos datos en el archivo electrónico “.txt”.

8° Con ayuda de la herramienta de Excel "Datos" - "Obtener Datos Externos" - "Desde Texto", se exportan los datos obtenidos del archivo electrónico ".txt". Siguiendo los pasos de la exportación de datos es posible separar los datos obtenidos en dos columnas seleccionando la opción "Espacio", obteniendo solo las mediciones de frecuencias con coma como separador decimal en una columna. Se seleccionan las frecuencias medidas y con la herramienta "Aumentar Decimales" se aumenta la cantidad de decimales de las frecuencias medidas hasta que aparezca un valor cero. Finalmente se seleccionan las frecuencias medidas y con ayuda de las herramientas "Copiar" y "Pegar", se colocan solo los datos de frecuencias medidas en el archivo electrónico ".txt".

9° Tener en cuenta que el software AMTyF solo permite ingresar valores enteros de frecuencia nominal y no valores decimales, como por ejemplo frecuencias de 28,444 Hz y 42,666 Hz. Para poder superar este inconveniente, luego de limpiar la data obtenida con las herramientas de Excel, es necesario multiplicar cada valor de frecuencia medida por su respectivo divisor (ver Tabla 2.1) obteniendo valores alrededor de 32 768 Hz, el cual es un valor entero de frecuencia nominal que se puede ingresar en el software AMTyF para realizar el tratamiento de la data obtenida. Esta multiplicación no afecta los resultados, solo se usa como un artificio para que el software AMTyF pueda reconocer las frecuencias obtenidas.

10° Realizado lo indicado en los puntos del 6° al 9° se exportan los datos obtenidos de mediciones de frecuencias del archivo electrónico final ".txt" con el software AMTyF para su respectivo tratamiento.

11° El software AMTyF nos proporciona el valor de la frecuencia promedio medida (F. Prom.), el valor de la desviación fraccional de frecuencia promedio obtenida ($\frac{\overline{\Delta f}}{f_0}$) y los valores de la raíz de la varianza de Allan o desviación de Allan ($\sigma_y(t)$) hasta el tiempo que se realizó la medición. El software AMTyF también nos muestra esta información en forma gráfica.

12° Para obtener la exactitud del oscilador patrón del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI que comanda al contador de frecuencias, es necesario ingresar por medio del siguiente enlace http://gps.nist.gov/scripts/sim_rx_grid.exe, ubicar a Perú SIMT (SNM), luego seleccionar su correspondiente casillero para observar por medio de una gráfica el comportamiento del oscilador patrón del laboratorio con diferentes datos entre ellos su desviación fraccional de frecuencia (Frequency Offset). En la parte superior de la pantalla aparece un link, por ejemplo, de esta forma "http://132.163.4.82/scripts/onewaygps.exe?2013052819001", el cual corresponde al comportamiento del oscilador patrón a un día. Para poder conocer la desviación fraccional de frecuencia del oscilador patrón en el tiempo se debe cambiar el último dígito de este link por los números 2, 3, etc. según la cantidad de días que duró la calibración, por ejemplo el link debería ser "http://132.163.4.82/scripts/onewaygps.exe?201305281900X", en donde X = 1, 2, 3, etc., colocando el valor adecuado de X es posible conocer el comportamiento del oscilador patrón en el tiempo. La estabilidad o incertidumbre del oscilador patrón se puede tomar de su manual según el tiempo que llevó la calibración. Esto es necesario para indicar las características del oscilador patrón del laboratorio, debido a que oscilador patrón de

Cesio le proporciona la trazabilidad adecuada al contador de frecuencias que lo comanda para realizar diversas mediciones en tiempo y frecuencia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Determinación del Error del Cronómetro

La calibración de cronómetros digitales por el método de inducción se realiza por medición directa de la frecuencia utilizando un contador de frecuencias, el cual realiza una medición continua de la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro (ver Tabla 2.1). Esta medición automatizada se realiza a través de una PC con el software TeamView, obteniendo una data de mediciones de frecuencias, para luego ser tratada con el software AMTyF, el cual finalmente nos proporciona la frecuencia medida promedio, la desviación fraccional de frecuencia promedio $\left(\frac{\overline{\Delta f}}{f_0}\right)$ obtenida de la medición y los valores de la incertidumbre de medición en términos de la raíz de la varianza de Allan ($\sigma_y(t)$) hasta el tiempo que se desea medir (ver Tabla 2.3).

La herramienta estadística para evaluar las desviaciones fraccionales de frecuencia como función de tiempos de promediación es la varianza de Allan. Teniendo en cuenta la relación entre la varianza de Allan y la estimación de incertidumbres en el proceso de calibración de osciladores, y que la medición de la frecuencia del oscilador interno del cronómetro se obtiene por medio de la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro, entonces, según López [14], es posible utilizar la siguiente ecuación para el estudio de osciladores dado por:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \left(\frac{\overline{\Delta f}}{f_0}\right) \pm 2 \times \sigma_y(t) \quad (4.1)$$

La ecuación (4.1) es muy importante en los procesos de calibración de osciladores ya que, por un lado, aporta información sobre la exactitud del instrumento por medio de la desviación fraccional de frecuencia promedio y, por otro lado, indica la estabilidad en frecuencia del oscilador interpretada como la incertidumbre en la determinación de la desviación fraccional de frecuencia total del oscilador.

Reordenando la ecuación anterior es posible reescribir la ecuación (4.1) de la siguiente manera:

$$f = \left(1 + \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) f_0 \quad (4.2)$$

donde:

f es la frecuencia medida del cronómetro,

f_0 es la frecuencia nominal (de refresco del LCD) del cronómetro,

$\frac{\overline{\Delta f}}{f_0}$ es la desviación fraccional de frecuencia promedio (dato proporcionado por el software AMTyF),

$\sigma_y(t)$ es la raíz de la varianza de Allan (dato proporcionado por el software AMTyF).

También es posible colocar una ecuación similar a la ecuación (4.2) en función del tiempo dado por:

$$t = \left(1 + \frac{\overline{\Delta t}}{t_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) t_0 \quad (4.3)$$

donde:

t es el tiempo que realmente mide el cronómetro,

t_0 es el tiempo que se desea medir con el cronómetro (valor nominal),

$\frac{\overline{\Delta t}}{t_0}$ es la desviación fraccional de tiempo promedio,

$\sigma_y(t)$ es la raíz de la varianza de Allan.

De la ecuación (4.2) se puede observar que:

- Si $\frac{\overline{\Delta f}}{f_0} > 0$, se tiene que la frecuencia medida es mayor a la frecuencia nominal ($f > f_0$), por lo cual el cronómetro va a contar de más, entonces el cronómetro se adelanta ($t > t_0$), por lo tanto se tiene que $\frac{\overline{\Delta t}}{t_0} > 0$.
- Si $\frac{\overline{\Delta f}}{f_0} < 0$, se tiene que la frecuencia medida es menor a la frecuencia nominal ($f < f_0$), por lo cual el cronómetro va a contar menos, entonces el cronómetro se atrasa ($t < t_0$), por lo tanto se tiene que $\frac{\overline{\Delta t}}{t_0} < 0$.

Según lo indicado y teniendo en cuenta la referencia [9], es posible establecer una relación entre la desviación fraccional de frecuencia promedio ($\frac{\overline{\Delta f}}{f_0}$) y la desviación fracción de tiempo promedio ($\frac{\overline{\Delta t}}{t_0}$), dado por:

$$\frac{\overline{\Delta f}}{f_0} = \frac{\overline{\Delta t}}{t_0} \quad (4.4)$$

Reemplazando (4.4) en (4.3) se obtiene una ecuación en función del tiempo para el oscilador del cronómetro dado por:

$$t = \left(1 + \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \pm 2 \times \sigma_y(t)\right) t_0 \quad (4.5)$$

Reescribiendo la ecuación (4.5), se puede observar tanto el error del oscilador del cronómetro como su incertidumbre de medición asociada, en función del tiempo:

$$t - t_0 = \underbrace{\left[t_0 \times \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \right]}_{\text{Error(s)}} \pm \underbrace{\left[t_0 \times (2 \times \sigma_y(t)) \right]}_{\text{Incertidumbre(s)}} \quad (4.6)$$

donde:

t_0 se expresa en unidades de segundos (s).

La ecuación (4.6) es muy utilizada cuando se realiza la calibración de un instrumento, pues se compara la lectura del instrumento que se desea calibrar con la lectura de un instrumento calibrado (con un patrón). De (4.6) es posible observar que para obtener el error del cronómetro solo se tiene que multiplicar el tiempo que se desea medir (t_0) por la desviación

fraccional de frecuencia promedio $\left(\frac{\overline{\Delta f}}{f_0}\right)$, o por la desviación fraccional de

tiempo promedio $\left(\frac{\overline{\Delta t}}{t_0}\right)$.

$$Error(s) = t_0 \times \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} = t_0 \times \frac{\overline{\Delta t}}{t_0} \quad (4.7)$$

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. De este modo, la incertidumbre de medición estará dada en función de la desviación de Allan ($\sigma_y(t)$) hasta el tiempo de medición deseado.

4.2 Cálculo de la Incertidumbre de Medición del Cronómetro

Según la guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (Guide to the expression of uncertainty in measurement) [18], cuando se realizan mediciones están presentes dos tipos de incertidumbres: la incertidumbre tipo A, debido a la variación de las mediciones, y la incertidumbre tipo B, debido a otros parámetros (resolución del instrumento, características del patrón utilizado, etc.).

Teniendo en cuenta la resolución del contador de frecuencias de 12 dígitos y la exactitud de 1×10^{-12} del oscilador de cesio que lo comanda, se puede notar que estas contribuciones son despreciables por ser de un orden muy inferior. Por lo cual no es necesario considerar estas contribuciones de la incertidumbre tipo B en la incertidumbre de la medición.

Por otro lado, como la calibración del cronómetro se realiza midiendo constantemente la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro, solo es necesario considerar la contribución de la incertidumbre tipo A, como la

única contribución en la incertidumbre de la medición, la cual corresponde a una distribución normal [18].

Como la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro es proporcional a la frecuencia de su oscilador interno, la evaluación de la estabilidad del oscilador se realiza utilizando la varianza de Allan descrita en el punto 2.6.1, la cual está dada por la ecuación (2.14):

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

Tener en cuenta que a la raíz cuadrada positiva de la varianza de Allan se le llama desviación de Allan $\sigma_y(t)$. El software AMTyF nos proporciona el valor de la raíz de la varianza de Allan para cada tiempo de medición (expresado en potencias de 2^n).

Para obtener la incertidumbre de medición expandida (U) solo se tiene que multiplicar cada valor obtenido de la raíz de la varianza de Allan ($\sigma_y(t)$) por el correspondiente factor de cobertura (k). Como la distribución es normal $k=2$. Entonces la incertidumbre de medición expandida corresponderá a una distribución normal con un nivel de confianza del 95% aproximadamente [18], dado por:

$$U = k \times \sqrt{\sigma_y^2(t)} = 2 \times \sigma_y(t) \quad (4.8)$$

En la Tabla 4.1 se presentan las incertidumbres de medición obtenidas hasta el tiempo de medición deseado (expresado en potencias de 2^n).

Tabla 4.1. Expresión de la incertidumbre de medición en función del tiempo.

Potencia 2^n	t_0 (s)	$\sigma_y(t)$	U (10^{-9})
2^0	1		
2^1	2		
2^2	4		
2^3	8		
2^4	16		
2^5	32		
2^6	64		
2^7	128		
2^8	256		
2^9	512		
2^{10}	1024		
2^{11}	2048		
2^{12}	4096		
2^{13}	8192		
2^{14}	16384		
2^{15}	32768		

Donde: $U = 2 \times \sigma_y(t)$

Nota: El cuadro será ampliado o reducido según el tiempo que se desea medir.

4.3 Interpretación de Resultados

Los resultados obtenidos estarán referidos al error máximo permisible del instrumento, el cual se tomará de las especificaciones técnicas del fabricante dadas en el manual del instrumento y, de no existir estas, se indicará en el respectivo documento de calibración que no se cuentan con las especificaciones técnicas del equipo. El error máximo permisible del instrumento se comparará con la desviación fraccional de frecuencia promedio obtenida en la medición. Se deberá comprobar que el valor absoluto de la desviación fraccional de frecuencia promedio obtenida es inferior al error máximo permisible del instrumento disminuido de la incertidumbre de medición. Hay que tener en cuenta que en muchas

ocasiones los fabricantes denotan el término “exactitud” o “accuracy” como el error máximo permisible del instrumento.

Como ejemplo, se realizó la calibración de un cronómetro marca Control Company modelo 1034, el cual pertenece al SNM-INDECOPI. Según su manual, el error máximo permisible del instrumento (accuracy, según el fabricante) es de 0,0005% (5×10^{-6}). El cronómetro se colocó en el sistema detector de frecuencias, dentro de la caja metálica (ver Figura 3.8). Se procedió a realizar el ajuste de la amplitud de la señal capturada hasta un valor de 4 V con ayuda del osciloscopio (ver Figura 3.4), encontrándose que la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro corresponde a un valor de 32 Hz.

La medición se realizó hasta un tiempo de medición de una hora, por lo cual en el software TeamView del contador de frecuencias se colocó un tiempo de medida de 1 s con un número de muestras de 16 384 (ver Tabla 2.3), los datos obtenidos se trataron con el software AMTyF (ver punto 3.4). En la Tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos de la medición de frecuencia del cronómetro calibrado.

Tabla 4.2. Resultados de la medición de frecuencia del cronómetro calibrado.

Frecuencia (Hz)			Resultado
Base	De Refresco f_0	Medida f	$\Delta f/f_0$ ($\mu\text{Hz}/\text{Hz}$)
32768	32	32,000171	5,3

Con los resultados obtenidos en la Tabla 4.2 es posible obtener el error del cronómetro en tiempo, en unidades de segundo (s), utilizando la ecuación (4.7). Con la ecuación (4.8) es posible obtener las incertidumbres de medición hasta el tiempo de medición deseado. Con la ecuación (4.7) y la Tabla 4.1, se construye la Tabla 4.3, donde se muestran los resultados

obtenidos en tiempo del cronómetro calibrado, presentando tanto el error del cronómetro como su correspondiente incertidumbre de medición asociada.

Tabla 4.3. Resultados obtenidos en tiempo del cronómetro calibrado.

Indicación t (s)	Tiempo de ensayo t ₀ (s)	Error (s)	Incertidumbre	
			σ _y (t)	U (10 ⁻⁹)
1,00	1,00	0,00	1,52E-09	3
2,00	2,00	0,00	1,08E-09	2
4,00	4,00	0,00	7,51E-10	2
8,00	8,00	0,00	5,31E-10	1
16,00	16,00	0,00	4,18E-10	1
32,00	32,00	0,00	4,55E-10	1
64,00	64,00	0,00	7,51E-10	2
128,00	128,00	0,00	1,42E-09	3
256,00	256,00	0,00	2,66E-09	5
512,00	512,00	0,00	4,62E-09	9
1024,01	1024,00	0,01	7,36E-09	15
2048,01	2048,00	0,01	1,25E-08	25
4096,02	4096,00	0,02	1,75E-08	35

t₀: Tiempo de ensayo (referencia) del cronómetro.

Donde: $U (10^{-9}) = 2 \times \sigma_y(t)$

En la calibración del cronómetro se obtuvo una frecuencia promedio de 32,000171 Hz, con una desviación de frecuencia promedio de $5,3 \times 10^{-6}$ y una incertidumbre máxima de 35×10^{-9} . Al comparar la desviación fraccional de frecuencia promedio obtenida de $5,3 \times 10^{-6}$ con el error máximo permisible del instrumento indicado en su manual de 5×10^{-6} , se puede notar que el cronómetro presenta en general errores mayores a su error máximo permisible, accuracy según el fabricante (dato tomado del manual del instrumento).

De los resultados obtenidos se recomienda el ajuste del instrumento de medición debido a que los errores que presenta el instrumento de medición son mayores a la tolerancia establecida por el fabricante para su correcto uso. En caso de no ser posible el ajuste del instrumento de

medición, el cronómetro puede ser utilizado considerando los errores que presenta en su respectivo documento de calibración.

Tener en cuenta que este método de calibración no solo puede servir para calibrar cronómetros digitales en corto tiempo y con una incertidumbre de medición pequeña, sino también se puede ser utilizado para ajustar estos instrumentos con ayuda de su potenciómetro de ajuste (ver Figura 2.1), llevando el valor de la frecuencia capturada a un valor adecuado (ver Tabla 2.1).

4.4 Validación del Método

En la Norma Técnica Peruana NTP-ISO/IEC 17025 [20], la cual es un documento donde se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de calibración para demostrar su competencia técnica con el objetivo de reproducir resultados técnicamente válidos, se indica que la validación es la confirmación a través del examen y el aporte de evidencias objetivas de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico previsto. Es conveniente utilizar una o varias de las técnicas siguientes para la determinación del desempeño del método:

- Calibración utilizando patrones de referencia.
- Comparación con resultados obtenidos con otros métodos.
- Comparación interlaboratorios.
- Evaluación sistemática de los factores que influyen en el resultado.

- Evaluación de la incertidumbre de los resultados basado en el conocimiento científico de los principios teóricos del método y la experiencia práctica.

El Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI utilizó dos de las técnicas mencionadas para validar y demostrar el desempeño del método de calibración de cronómetros utilizando el método de inducción, para lo cual primero se realizó una evaluación de los resultados obtenidos de la incertidumbre de medición en la verificación del sistema detector de frecuencias por más de dos años, para luego mostrar los resultados obtenidos en la comparación internacional de laboratorios de la región SIM en la que participó el SNM-INDECOPI utilizando este método de calibración.

4.4.1 Evaluación de Resultados Obtenidos de la Verificación del Sistema Detector de Frecuencias

Desde inicios del 2011 se implementó el sistema detector de frecuencias para la calibración de cronómetros por el método de inducción en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI. Desde su implementación se han realizado verificaciones al sistema detector de frecuencias de manera semanal, obteniéndose la exactitud del sistema detector de frecuencias en términos de la desviación fraccional de frecuencia y su estabilidad en términos de la raíz de la varianza de Allan, la cual es la incertidumbre de medición del sistema detector de frecuencias.

Para realizar la verificación se utilizó un generador de frecuencias, seleccionando un valor de 32 Hz hasta obtener una amplitud de 4 V, utilizando la función pulso del generador de frecuencias, el cual se conecta por medio de un cable BNC a una pequeña antena para poder simular la frecuencia que induce un cronómetro. La antena se coloca en el sistema

detector de frecuencias, y ambos se encuentran dentro de la caja metálica para evitar interferencias externas (ver Figura 3.10).

El sistema detector de frecuencias se conecta al contador de frecuencias por medio de un cable BNC, se selecciona la salida en el generador de frecuencias, observándose en el contador de frecuencias un valor alrededor de 32 Hz, con una variación normalmente en el séptimo u octavo decimal (ver Figura 3.10). Por ejemplo, se observan valores de 32,000 000 XYZ Hz ó 32,000 000 OXY Hz, donde X, Y, Z, son números enteros positivos, los cuales son valores típicos que se obtienen cuando se realiza la verificación del sistema detector de frecuencias.

En la PC se selecciona el software Teamview del contador de frecuencias, colocando un tiempo de muestreo de 1 segundo con un número de mediciones de 4 096, para un tiempo de medida aproximado de 17 min, luego se procede seleccionar el inicio en el software para realizar las mediciones, observándose una gráfica de mediciones de frecuencia. La medición se realiza en un tiempo un poco mayor a 1 hora (ver Tabla 2.3).

La data de mediciones obtenida se guarda en un archivo con la extensión “.txt”, luego se realizan algunos cambios solo en la forma de presentación con ayuda de Word y Excel para poder exportar esta data de mediciones obtenida con el software AMTyF (ver punto 3.4). El software AMTyF nos proporciona la desviación fraccional de frecuencia promedio y la incertidumbre de la medición en términos de la raíz de la varianza de Allan.

En las Tablas 4.4 y 4.5 se muestran los valores obtenidos de la desviación fraccional de frecuencia promedio y la raíz de la varianza de Allan en la verificación del sistema detector de frecuencia en el año 2011.

Tabla 4.4. Valores obtenidos de Enero a Junio del 2011.

		ENERO			FEBRERO				MARZO					ABRIL				MAYO					JUNIO			
t (s)	$\Delta f/f (E-12)$	17	24	31	7	14	21	28	1	7	14	21	28	5	11	18	25	3	9	16	23	30	6	13	20	28
1	U (E-09)	1.8	1.6	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.6	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.6	1.3	1.4	1.3	1.4
2	U (E-09)	1.3	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9
4	U (E-09)	0.9	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6
8	U (E-09)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
16	U (E-09)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
32	U (E-09)	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
64	U (E-09)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
128	U (E-09)	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
256	U (E-09)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.04	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
512	U (E-09)	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.08	0.02	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.02	0.05	0.02	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.09
1024	U (E-09)	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.005	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.05	0.03	0.03	0.03

Tabla 4.5. Valores obtenidos de Julio a Diciembre del 2011.

		JULIO				AGOSTO					SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE					DICIEMBRE			
t (s)	$\Delta f/f (E-12)$	4	12	18	25	1	8	16	22	31	6	12	19	26	3	10	17	24	2	7	14	21	28	5	12	19	26
1	U (E-09)	1.4	1.4	1.4	3.5	1.4	2.3	1.4	1.4	3.2	1.4	1.4	1.6	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.4	1.6	1.6	1.4	3.3	1.4	1.4	1.4	1.4
2	U (E-09)	0.9	0.9	1.0	2.4	1.0	1.6	1.0	1.0	2.3	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	2.4	1.0	1.0	1.0	1.0
4	U (E-09)	0.7	0.7	0.7	1.8	0.7	1.2	0.7	0.7	1.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	1.6	0.7	0.7	0.7	0.7
8	U (E-09)	0.5	0.5	0.5	1.2	0.4	0.8	0.5	0.5	1.1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5
16	U (E-09)	0.4	0.3	0.3	0.9	0.3	0.6	0.3	0.3	0.8	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.8	0.3	0.3	0.3	0.3
32	U (E-09)	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.4	0.2	0.2	0.6	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
64	U (E-09)	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.1	0.1	0.1	0.2
128	U (E-09)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1
256	U (E-09)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.05	0.1
512	U (E-09)	0.03	0.08	0.03	0.13	0.06	0.05	0.04	0.08	0.08	0.03	0.06	0.09	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.03	0.08	0.04	0.07	0.19	0.05	0.04	0.02	0.04
1024	U (E-09)	0.00	0.05	0.01	0.15	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.002	0.005	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01	0.001	0.02	0.003	0.04	0.03	0.002	0.002

De los resultados presentados en las Tablas 4.4 y 4.5, correspondientes al año 2011, es posible indicar que se obtuvo una exactitud del sistema detector de frecuencias máxima de $0,1 \times 10^{-9}$ (140×10^{-12}), expresada en términos de la desviación fraccional de frecuencia promedio, con una estabilidad típica de $1,4 \times 10^{-9}$ y una estabilidad máxima de $3,5 \times 10^{-9}$, expresada en términos de la raíz de la varianza de Allan.

En las Tablas 4.6 y 4.7 se muestran los valores obtenidos de la desviación fraccional de frecuencia promedio y la raíz de la varianza de Allan en la verificación del sistema detector de frecuencia en el año 2012.

Tabla 4.6. Valores obtenidos de Enero a Junio del 2012.

		ENERO					FEBRERO					MARZO					ABRIL					MAYO					JUNIO				
		2	9	16	23	30	6	13	20	27	7	13	19	26	2	9	16	23	2	7	14	21	28	4	11	18	25				
t (s)	$\Delta f/f$ (E-12)	32	2	-7	-11	-34	-76	5	43	73	-135	18	27	14	13	-34	5	31	73	-43	-4	-59	49	53	-6	-78	-35				
1	U (E-09)	3.6	1.4	3.5	1.4	1.4	3.5	3.6	3.7	3.7	3.5	4.1	1.4	3.4	3.5	3.7	0.3	1.4	1.5	3.7	1.4	3.4	1.5	3.3	1.4	3.4	1.4				
2	U (E-09)	2.4	1.0	2.4	1.0	0.9	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.8	1.0	2.4	2.5	2.6	0.2	1.0	1.1	2.6	1.0	2.3	1.0	2.4	1.0	2.4	0.9				
4	U (E-09)	1.8	0.7	1.8	0.7	0.6	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8	2.0	0.7	1.6	1.7	1.9	0.1	0.7	0.7	1.8	0.7	1.7	0.7	1.7	0.7	1.7	0.7				
8	U (E-09)	1.3	0.5	1.3	0.5	0.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	0.5	1.1	1.2	1.3	0.1	0.5	0.5	1.3	0.5	1.2	0.5	1.2	0.5	1.2	0.5				
16	U (E-09)	1.0	0.4	1.0	0.3	0.3	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.3	0.8	0.9	0.9	0.1	0.4	0.4	0.9	0.3	0.8	0.3	0.8	0.4	0.8	0.3				
32	U (E-09)	0.6	0.3	0.6	0.2	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.2	0.6	0.7	0.6	0.05	0.2	0.3	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2				
64	U (E-09)	0.5	0.2	0.5	0.2	0.1	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.04	0.2	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	0.4	0.2	0.4	0.1				
128	U (E-09)	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.02	0.1	0.2	0.4	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1				
256	U (E-09)	0.2	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.02	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1				
512	U (E-09)	0.2	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.04	0.1	0.2	0.1	0.01	0.1	0.1	0.3	0.03	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1				
1024	U (E-09)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03	0.11	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.06	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.06	0.02	0.02	0.003				

Tabla 4.7. Valores obtenidos de Julio a Diciembre del 2012.

		JULIO					AGOSTO					SEPTIEMBRE					OCTUBRE					NOVIEMBRE					DICIEMBRE				
		2	9	16	23	30	6	13	20	27	3	10	17	24	3	10	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	26				
t (s)	$\Delta f/f$ (E-12)	18	-2	27	14	17	-50	-45	26	4	12	1	19	-0.5	53	-34	45	69	35	-6	22	-3	37	23	12	-4	-13				
1	U (E-09)	1.5	1.4	1.4	1.3	3.1	3.3	3.1	3.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	3.4	1.4	3.5	1.4	3.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	3.4				
2	U (E-09)	1.1	1.0	1.0	0.9	2.2	2.3	2.2	2.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.3	1.0	2.4	1.0	2.3	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	2.5				
4	U (E-09)	0.7	0.7	0.7	0.7	1.5	1.7	1.5	1.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.7	0.7	1.8	0.7	1.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.9				
8	U (E-09)	0.5	0.5	0.5	0.5	1.1	1.1	1.1	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	1.2	0.5	1.1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.3				
16	U (E-09)	0.4	0.4	0.4	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.9	0.3	0.9	0.3	0.8	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.8				
32	U (E-09)	0.3	0.2	0.3	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7	0.3	0.7	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.6				
64	U (E-09)	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4				
128	U (E-09)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3				
256	U (E-09)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				
512	U (E-09)	0.1	0.01	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.05	0.1	0.05	0.04	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.03	0.04	0.1	0.04	0.1	0.1				
1024	U (E-09)	0.002	0.000	0.02	0.03	0.10	0.04	0.14	0.08	0.03	0.01	0.01	0.003	0.02	0.001	0.10	0.01	0.13	0.01	0.09	0.005	0.01	0.06	0.01	0.01	0.003					

De los resultados presentados en las Tablas 4.6 y 4.7, correspondientes al año 2012, es posible indicar que se obtuvo una exactitud del sistema detector de frecuencias máxima de $0,1 \times 10^{-9}$ (135×10^{-12}), expresada en términos de la desviación fraccional de frecuencia promedio, con una estabilidad típica de $1,4 \times 10^{-9}$ y una estabilidad máxima de 4×10^{-9} , expresada en términos de la raíz de la varianza de Allan.

En la Tabla 4.8 se muestran los valores obtenidos de la desviación fraccional de frecuencia promedio y la raíz de la varianza de Allan en la verificación del sistema detector de frecuencia en el año 2013.

Tabla 4.8. Valores obtenidos de Enero a Junio del 2013.

t (s)	Δf/f (E-12)	ENERO					FEBRERO					MARZO				ABRIL					MAYO				JUNIO			
		3	7	14	21	29	4	13	18	26	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	
1	U (E-09)	1.4	1.4	3.4	1.4	3.4	3.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	3.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	3.2	1.4	1.4	3.4	1.3	1.4	1.4	
2	U (E-09)	1.0	1.0	2.4	1.0	2.4	2.4	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	2.4	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	2.3	0.9	1.0	2.5	0.9	1.0	0.9	
4	U (E-09)	0.7	0.7	1.8	0.7	1.7	1.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.7	0.7	0.7	1.9	0.7	0.7	0.7		
8	U (E-09)	0.5	0.5	1.3	0.5	1.3	1.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	0.5	1.3	0.5	0.5	0.5		
16	U (E-09)	0.4	0.4	0.8	0.3	0.8	0.9	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.8	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.8	0.3	0.3	0.8	0.3	0.4	0.4	
32	U (E-09)	0.3	0.3	0.6	0.2	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2		
64	U (E-09)	0.2	0.1	0.3	0.2	0.4	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	
128	U (E-09)	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	
256	U (E-09)	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.04	
512	U (E-09)	0.1	0.04	0.1	0.04	0.1	0.1	0.04	0.1	0.04	0.1	0.1	0.2	0.03	0.1	0.03	0.02	0.1	0.1	0.1	0.03	0.1	0.1	0.04	0.1	0.1	0.04	
1024	U (E-09)	0.03	0.01	0.04	0.02	0.002	0.04	0.001	0.04	0.01	0.001	0.02	0.01	0.003	0.05	0.02	0.002	0.03	0.01	0.07	0.003	0.03	0.1	0.04	0.02	0.05		

De los resultados presentados en la Tablas 4.8, correspondiente al año 2013, es posible indicar que se obtuvo una exactitud del sistema detector de frecuencias máxima de $0,1 \times 10^{-9}$ (77×10^{-12}), expresada en términos de la desviación fraccional de frecuencia promedio, con una estabilidad típica de $1,4 \times 10^{-9}$ y una estabilidad máxima de $3,5 \times 10^{-9}$, expresada en términos de la raíz de la varianza de Allan.

De los resultados mostrados en el año 2011, 2012 y 2013 es posible indicar que en la verificación del sistema detector de frecuencias se obtiene una incertidumbre típica de $1,4 \times 10^{-9}$ (1,4 ns/s) y una incertidumbre máxima de 4×10^{-9} (4 ns/s). Multiplicando estos valores obtenidos por el factor de cobertura ($k = 2$), para expandir la incertidumbre de medición, se obtienen valores de incertidumbres de medición del sistema detector de frecuencias de $3 \times 10^{-9} \leq 2 \times \sigma_y(t) \leq 8 \times 10^{-9}$ (entre 3 ns/s y 8 ns/s).

En general, cuando se realiza la verificación del sistema detector de frecuencias se obtiene un valor de incertidumbre de medición típica de $1,4 \times 10^{-9}$ (1,4 ns/s). En la Figura 4.1 se muestra la estabilidad típica obtenida en la verificación del sistema detector de frecuencias en términos de la raíz de la varianza de Allan usando el software AMTyF, donde es posible observar el comportamiento típico de la estabilidad del sistema

detector de frecuencias desarrollado en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI.

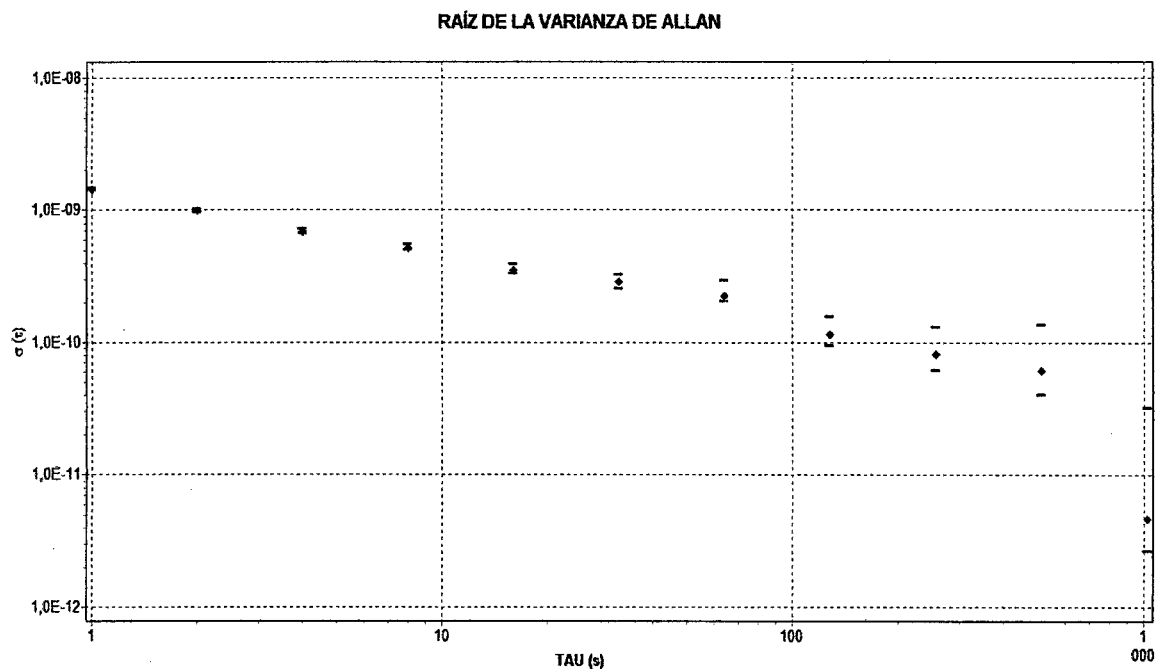


Figura 4.1. Verificación del sistema detector de frecuencia en términos de la raíz de la varianza de Allan.

Por otro lado, Jiménez (ICE) [3], obtiene una incertidumbre de medición debido al ruido de su sistema de medición de $1,7 \times 10^{-9}$ (dato tomado de Tabla 2 de la referencia [3]), el cual corresponde al valor obtenido en la verificación de su sistema de medición. Para expandir esta incertidumbre de medición es necesario multiplicar este valor por el factor de cobertura ($k=2$), obteniéndose una incertidumbre de medición de $3,4 \times 10^{-9}$ (3 ns/s), el cual es un valor similar a las incertidumbres de medición obtenidas en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI cuando se realiza la verificación del sistema detector de frecuencias.

Considerando como la mejor la exactitud de un cronómetro digital un valor de $\pm 3 \mu\text{s/s}$ (3×10^{-6}) y según los resultados presentados en la verificación del sistema detector de frecuencias, es posible obtener incertidumbres de medición típicas alrededor de 10^3 veces menor que la mejor exactitud del instrumento, por lo cual los valores obtenidos en la verificación del sistema detector de frecuencias cumplen con la tolerancia establecida de $\pm 1 \times 10^{-7}$ o $0,1 \mu\text{s/s}$ (ver punto 3.1.3). Entonces es posible indicar que la incertidumbre de medición del sistema detector de frecuencias no afecta a las mediciones que se realicen utilizando este sistema de medición.

Según lo indicado, es posible afirmar que el sistema detector de frecuencias utilizado para la calibración de cronómetros digitales por el método de inducción, el cual fue desarrollado en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI, es el adecuado y puede ser utilizado para calibrar cualquier tipo de cronómetro digital en el país con una incertidumbre de medición pequeña.

El Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI viene realizando por más de 2 años la calibración de diferentes marcas y modelos de cronómetros digitales utilizando el método de inducción, por lo cual hemos podido comprobar que con este método es posible obtener incertidumbres de medición desde 5 ns/s por la buena estabilidad del cronómetro pero, en general, es frecuente obtener una incertidumbre de medición $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$.

El Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI indica como su mejor Capacidad de Medición y Calibración (CMC) de cronómetros digitales por el método de inducción un valor de $0,1 \mu\text{s/s}$. Con este valor de incertidumbre de medición el SNM-INDECOPI se encuentra en proceso de demostrar su CMC de cronómetros digitales por el método

de inducción a nivel internacional para obtener el respectivo reconocimiento internacional utilizando este método de calibración.

4.4.2 Participación en una Comparación Internacional

El desarrollo del sistema detector de frecuencias se realizó a comienzos del 2010. Entre los meses de agosto y septiembre el sistema detector de frecuencias se encontraba listo para realizar pruebas con diferentes cronómetros digitales. En esta serie de pruebas se realizaron mejoras al circuito detector de frecuencias, cambiando algunas componentes por otros con mejores características y colocando un potenciómetro al circuito detector de frecuencias para asegurar que la amplitud de la señal de frecuencia sea la adecuada, obteniendo finalmente valores de frecuencias estables. Se volvieron a realizar pruebas obteniendo resultados satisfactorios, por lo cual para comienzos de octubre del 2010 era posible realizar la calibración de cronómetros digitales por el método de inducción.

En el año 2010 el Grupo de Trabajo de Tiempo y Frecuencia de la región SIM estaba realizando una comparación internacional en la región América de calibración de cronómetros, el cual se describe en el documento técnico "An interlaboratory Stopwatch Comparison in the SIM Region" [9]. El Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI considerando que ya contaba con un nuevo método de calibración, decidió participar en esta comparación para poder demostrar que el sistema detector de frecuencias para calibración de cronómetros digitales por el método de inducción estaba trabajando adecuadamente.

La comparación se realizó entre el año 2010 y 2011 en el cual participaron diversos INM de la región América, los cuales venían aplicando diferentes métodos de calibración de cronómetros digitales. La

comparación se realizó en dos grupos. En el grupo 1 se encuentran países participantes de la parte Norte de América y en el grupo 2 países participantes de la parte Sur de América. El Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI participó en el grupo 2, realizando mediciones a finales del 2010, identificándose como INDECOPI, y obteniendo buenos resultados como se puede apreciar en la Tabla 4.9, dato tomado de la referencia [9] para el grupo 2 de la comparación.

Tabla 4.9. Resultados de la comparación de cronómetros en la región SIM para el grupo 2 [9].

Laboratory	Temperature Range (°C)	Humidity Range (%)	Method	Results		U(k=2) (parts in 10 ⁶)
				Hz/Kz (parts in 10 ⁶)	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

En la Tabla 4.9 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).

En la comparación el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI obtuvo una incertidumbre de medición de $0,007 \times 10^{-6}$ (7 ns/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 realiza el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI.

También se puede observar que la incertidumbre de medición obtenida por el SNM-INDECOPI es menor a la mitad de la incertidumbre de medición reportada por UTE (Uruguay) y, como UTE desarrolló un sistema de calibración de cronómetros similar al sistema de calibración desarrollado en este trabajo (ver referencia [2]), se demuestra que con la utilización de un potenciómetro para regular la amplitud de la señal capturada es posible obtener valores de frecuencias estables, lo cual permite reducir considerablemente la incertidumbre de medición.

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 mediante la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro utilizando el método de inducción, lo cual nos ha permitido obtener resultados confiables y comparables con los resultados de otros INM de la región América.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Mediante el efecto capacitivo, por medio de las placas paralelas en la construcción del sistema detector de frecuencias, es posible obtener una señal con información de las señales que se generan dentro del cronómetro como son las formas de ondas y frecuencias involucradas, entre ellas la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro.

Utilizando una caja metálica como blindaje para la inducción de la señal debido al campo eléctrico generado por los cronómetros, se pudo evitar el efecto de campos externos no deseados facilitando la medición de la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro por el método de inducción.

Por medio del potenciómetro del sistema detector de frecuencias es posible regular y controlar la amplitud de la señal capturada con ayuda de un osciloscopio, asegurando que la amplitud de la señal capturada tiene un valor adecuado para realizar su medición, consiguiendo valores de frecuencias estables, lo cual permitió reducir considerablemente la incertidumbre de medición.

Por medio del arreglo utilizado para la verificación del sistema detector de frecuencias fue posible determinar la intensidad del campo eléctrico generado por el cronómetro, de tal manera que se pudo conocer la amplitud de referencia de 4 V, a la cual el sistema detector de frecuencias captura adecuadamente la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro.

La verificación del sistema detector de frecuencias desde su implementación, por medio de una antena que simule la frecuencia de refresco del LCD que se induce en el cronómetro, permitió obtener la incertidumbre de medición del sistema detector de frecuencias desarrollado, el cual presenta un valor típico de 3×10^{-9} , pero en general valores de $3 \times 10^{-9} \leq 2 \times \sigma_y(t) \leq 8 \times 10^{-9}$.

La verificación del sistema detector de frecuencias y la participación en una comparación de calibración de cronómetros nos permitió validar y demostrar el desempeño del método inducción implementado para realizar la calibración de cronómetros digitales en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI.

Es posible implementar el sistema detector de frecuencias para calibración de cronómetros digitales en cualquier laboratorio secundario de calibración del país debido a que su costo de implementación es económico y puede ser utilizado con un software de medición de libre disposición para el tratamiento de datos.

Este trabajo muestra que el sistema detector de frecuencias desarrollado en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del SNM-INDECOPI, es el adecuado para realizar la calibración de cualquier tipo de cronómetro digital en el país por medio de la medición de la frecuencia de refresco del LCD del cronómetro.

Por medio del sistema detector de frecuencias se pueden calibrar cronómetros digitales en forma semiautomática, en 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, con una incertidumbre de medición $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$.

5.2 Recomendaciones

Si un laboratorio secundario de calibración desea implementar este método de calibración y no cuenta con una frecuencia de referencia para comandar los equipos del laboratorio, se recomienda calibrar el contador y generador de frecuencias en el SNM-INDECOPI para contar con la trazabilidad adecuada al realizar sus mediciones.

Como mejora en el diseño del sistema detector de frecuencias es posible sustituir algunas componentes utilizadas por otras con mejores características y menores tolerancias. De este modo, se mejora la estabilidad en las mediciones, con lo cual es posible reducir la incertidumbre de medición.

Para lograr una automatización más efectiva, es posible desarrollar un sistema o software que trabaje con los dos software mencionados en el presente trabajo y con un sensor de medición de condiciones ambientales de tal manera que se reduzcan los tiempos de tratamiento de datos, presentando un reporte final de medición con todos los datos obtenidos y requeridos en la calibración.

Se puede desarrollar un sistema que realice la medición de la frecuencia fundamental del cronómetro implementado un sistema detector de frecuencias utilizando un arreglo basado en filtros para eliminar el ruido de esta señal, tomando como referencia lo indicado por Jiménez (ICE) [3].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gust, Jeff C; Graham, Robert M.; Lombardi, Michael A. Practice guide “Stopwatch and Timer Calibrations” (2009 Edition). NIST Special Publication 960-12. <http://tf.nist.gov/general/pdf/2281.pdf>.
- [2] Leonardo Trigo, Daniel Slomovitz. Calibración de cronómetros digitales por método de inducción. UTE. Uruguay. Octubre 2008. <http://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2008/TS08/TS08.pdf>.
- [3] Johnny Jiménez, Harold Sánchez. Calibración de cronómetros mediante la medición de la frecuencia del oscilador de cuarzo. ICE. Costa Rica. VIII Semetro. http://limcserver.dee.ufcg.edu.br/semetro/www/pdf/51970_1.pdf.
- [4] CENAM – ema. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la metrología de tiempo y frecuencia. México. Abril 2008. Revisión 01. <http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/>.
- [5] 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. <http://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE-An%C3%A1lisis%20de%20Mediciones%20de%20Tiempo%20y%20Frecuencia.pdf>.

- [6] 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>.
- [7] The SIM Time Network. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology (NIST). Volume 116, Number 2, March-April 2011. <http://tf.nist.gov/general/pdf/2450.pdf>.
- [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.
- [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. <http://tf.nist.gov/general/pdf/2571.pdf>.
- [10] La Guía Metas. Cronómetros y Temporizadores. Boletín periódico de Metas & Metrólogos Asociados. Año 07 #7. 2007 - Julio. <http://www.metas.com.mx/quiametas/La-Guia-MetAs-07-07-cronometro-temporizador.pdf>.
- [11] NCSL International Measure. The Journal of Measurement Science. Robert M Graham. Technical Tips. Stopwatch Calibrations, Part III: The Time Base Method. Vol. 1 No. 3. September 2006. http://ncsli.org/c/Downloads/MeasurePDF/NCSLI_Measure_2006_Sept.pdf.

- [12] Arlem L. Fernández Sigler Inv. Agregado ICID, Evelia Medina Pérez Inv. Agregado ICID. La compatibilidad electromagnética en el diseño de los equipos electrónicos. VII Jornada Electrotecnia. II taller de EMC del CEC. CEC (Comité Electrotécnico Cubano).
http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/3_3.pdf.
- [13] Francisco Jiménez T, Mauricio López R. Métodos de calibración en el dominio del tiempo. CENAM. Encuentro Nacional de Metrología eléctrica, Julio 2007.
<http://www.cenam.mx/dme/pdf/TF04.pdf>.
- [14] J. Mauricio López R. Estimación de incertidumbres en calibración de osciladores. División de Tiempo y Frecuencia. CENAM. Encuentro Nacional de Metrología eléctrica 2007.
<http://www.cenam.mx/dme/pdf/TF02.pdf>.
- [15] John R. Reitz, Frederick J. Milford, Robert W. Christy. Fundamentos de la teoría electromagnética. Cuarta edición. Versión en español de Carlos Gerardo Martínez Ávila.
- [16] Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). (JCGM 200:2008). Traducción al español de la 3ª edición del VIM 2008.
http://www.indecopi.gob.pe/repositorioaps/0/13/ier/otras_publicaciones/VIM_2009.pdf.

- [17] Metrología abreviada. Traducción de "Metrology - in short" 3ª edición, Julio 2008, 2ª edición en español por CEM http://www.indecopi.gob.pe/repositorioaps/0/13/ier/otras_publicaciones/METROLOGIC_ABREVIADA.pdf.
- [18] Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO 1995.
- [19] EA-4/02 Expression of the uncertainty of measurement in calibrations. European cooperation for accreditation (EA). December 1999.
- [20] Norma Técnica Peruana NTP-ISO/IEC 17025 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración. INDECOPI. Agosto 2006. 2ª edición.

ANEXO

DEFINICIONES

Ajuste de un instrumento de medida: Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la cantidad física a medir.

Calibración: Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones especificadas, la relación existente entre los valores de la cantidad física con incertidumbres de medida proporcionados por patrones de medida y las indicaciones correspondientes con las incertidumbres de medida asociadas del instrumento de medida.

Clase de exactitud: Clase de instrumentos de medida que, cumpliendo ciertos requisitos metrológicos establecidos, mantienen sus errores dentro de ciertos límites especificados bajo condiciones dadas.

Error máximo permitido (de un instrumento de medida): Valores extremos para un error de medida con respecto al valor de una cantidad física de referencia conocida, permitida por especificaciones para un instrumento de medida o sistema de medida dado.

Estabilidad: Propiedad de un instrumento de medida para mantener constantes sus características metrológicas a lo largo del tiempo.

Exactitud de un instrumento de medida: Capacidad de un instrumento de medida para dar respuestas próximas a un valor verdadero.

Incertidumbre de medida: Parámetro no negativo, asociado al resultado de medida que caracteriza la dispersión de valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando, basado en la información utilizada.

Referencia (valor de): Valor de una cantidad física que sirve como base de comparación con valores de cantidades de la misma naturaleza.

Patrón de referencia: Patrón utilizado designado para la calibración de patrones de cantidades de la misma naturaleza, en una organización o lugar dado.

Patrón primario: Patrón establecido mediante un procedimiento de medida primario o creado como un objeto elegido por convenio. Patrón designado o ampliamente reconocido como poseedor de la más alta calidad metrológica y cuyo valor es aceptado sin referencia a otros patrones de la misma cantidad física.

Trazabilidad metrológica (trazabilidad): Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

Valor nominal: Valor redondeado o aproximado de una cantidad física, característica de un instrumento o sistema de medida, que sirve de guía para su utilización apropiada.