

# CALIBRACIÓN DE TACÓMETROS ÓPTICOS UTILIZANDO UN SISTEMA GENERADOR DE PULSOS DE LUZ

Henry Diaz, Luis Palma  
 Instituto Nacional de Calidad (INACAL)  
[hdiaz@inacal.gob.pe](mailto:hdiaz@inacal.gob.pe)

**Resumen:** Los tacómetros ópticos permiten medir la frecuencia de rotación en sistemas mecánicos sin contacto físico. Debido a que en el país no se contaba con un sistema o equipamiento adecuado para poder realizar su calibración se desarrolló un sistema generador de pulsos de luz para poder calibrar tacómetros ópticos por medición directa con una incertidumbre de medición mejor o igual que  $0,1 \mu\text{Hz}/\text{Hz}$ .

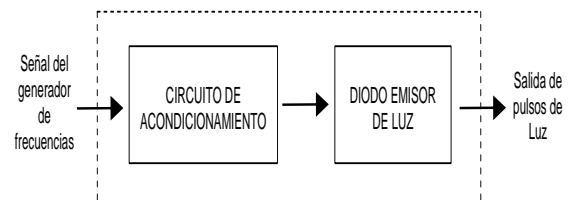
## 1. INTRODUCCIÓN

Los tacómetros ópticos miden la frecuencia de rotación de sistemas mecánicos (como son motores, molinos, bandas transportadoras, turbinas, etc). En metrología los tacómetros ópticos también pueden ser utilizados como patrones para la calibración de centrifugas, generadores de velocidad y tacómetros en general. Debido a la importancia de estos instrumentos en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del INACAL (antes SNM - INDECOPI) se desarrolló un sistema generador de pulsos de luz utilizando como patrón un generador de frecuencias de tal forma que el tacómetro registre una lectura proporcional en revoluciones por minuto (rpm) a la frecuencia del generador de frecuencias en Hertz (Hz) para lo cual fue necesario tener en cuenta la siguiente relación:  $1 \text{ Hz} = 60 \text{ rpm}$  [1].

## 2. CIRCUITO EMISOR DE PULSOS DE LUZ

Para poder generar pulsos de luz periódicos fue necesario desarrollar un circuito emisor de pulsos de luz, el cual se conecta al patrón y es capaz de encender y apagar un diodo emisor de pulsos de luz a la misma frecuencia de la señal generada por el patrón. El circuito emisor de pulsos de luz está conformado por un circuito de acondicionamiento y un diodo emisor de luz. El circuito de acondicionamiento está compuesto por una resistencia de  $1 \text{ k}\Omega$  y un transistor NPN SC2901. Con la resistencia se acondiciona la señal del patrón en una señal de corriente que alimenta la base del transistor y con el transistor en su estado de saturación se transmiten los pulsos generados por el patrón, de tal forma que el transistor actúa como un interruptor de rápida respuesta para el diodo emisor de luz. El diodo emisor de luz es de luz blanca ultra brillante para abarcar la mayor parte del espectro que emiten los tacómetros ópticos para lo cual se decidió utilizar una linterna la cual contiene

al diodo emisor de luz. La linterna seleccionada utiliza una lupa para concentrar y aumentar la dispersión de emisión de luz. Luego de realizar diversas pruebas se decidió utilizar la linterna aumentando en su totalidad la dispersión de la emisión de luz (ver Fig. 2). A la entrada del diodo emisor de luz se colocó una resistencia limitadora de corriente de  $50 \Omega$  como protección. Para polarizar al diodo emisor de luz, al colector y al emisor del transistor se utilizó una fuente de tensión continua de  $5 \text{ V}$  con lo cual se cierra el circuito cada vez que recibe el flanco de subida de la señal, encendiéndose y apagándose el diodo emisor de luz a la misma frecuencia generada en el patrón. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques del circuito emisor de pulsos de luz.



**Fig. 1.** Diagrama de bloques del circuito emisor de pulsos de luz.

Finalmente el patrón se conecta al circuito emisor de pulsos de luz por medio de un cable BNC, se selecciona la función pulso, la frecuencia necesaria (por ejemplo una frecuencia de  $100 \text{ Hz}$ ), con una amplitud de  $2 \text{ V}$ . Al generar esta señal el circuito emisor de pulsos de luz convierte los pulsos eléctricos del patrón en pulsos de luz de tal forma que el tacómetro registra una lectura proporcional en revoluciones por minuto de la frecuencia seleccionada (por ejemplo en este caso una lectura de  $6000 \text{ rpm}$ ). Entonces para realizar la calibración de tacómetros en todo su rango de medición (en rpm) solo es necesario variar la frecuencia en el patrón.

### 3. SISTEMA GENERADOR DE PULSOS DE LUZ DEL INACAL

En el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del INACAL se distribuye una señal de 5 MHz y 10 MHz proporcionada por nuestro oscilador de Cesio Symmetricom 5071A. Con este patrón el INACAL contribuye al Tiempo Universal Coordinado (UTC) [6] y a la red virtual "SIM Time Network" [7] obteniendo trazabilidad al UTC. Esta frecuencia patrón se utiliza para mejorar la base de tiempo de los equipos del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del INACAL que cuenta con la opción de referencia externa, la cual es una técnica muy utilizada por diversos Institutos Nacionales de Metrología (INMs). El sistema generador de pulsos de luz del INACAL está compuesto por un generador de frecuencias Tektronix AFG3102 y un circuito emisor de pulsos de luz. El generador de frecuencias se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio obteniendo trazabilidad al UTC. El circuito emisor de pulsos de luz ha sido comentado ampliamente en el punto anterior. En la Fig. 2 se muestra una foto del sistema de medición.



Fig. 2. Foto del sistema generador de pulsos de luz del INACAL.

### 4. CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DEL SISTEMA GENERADOR DE PULSOS DE LUZ DEL INACAL

El sistema generador de pulsos de luz debe ser caracterizado para poder evaluar el ruido del sistema de medición y su desempeño continuo, por tal motivo es necesario contar con un circuito de verificación simulando ser el tacómetro a calibrar, de tal forma que detecte y regenere la señal periódica del sistema generador de pulsos de luz [4]. El circuito de verificación está compuesto por un sistema de recepción de pulsos de luz y un circuito de acondicionamiento de señal los cuales se

encuentran alimentadas por una fuente de tensión continua de 5 V. El sistema de recepción de impulsos de luz consta de un fototransistor ST1KL3B para capturar los pulsos de luz del sistema generador de pulsos de luz de tal forma que el fototransistor convierte los pulsos de luz capturados en una señal de corriente cada vez que recibe estos impulsos de luz. Esta señal de corriente capturada tiene la misma frecuencia de los pulsos de luz emitidos por el sistema generador de pulsos de luz. El circuito de acondicionamiento de señal consta de una resistencia de 10  $\Omega$  y un comparador LM393N. Con la resistencia se acondiciona la señal de capturada en una señal cuya amplitud es de 1,8 V y con el comparador se limita el pase de señales que cuenten con una amplitud menor a 1,5 V, de tal forma que el comparador actúa como un filtro para evitar el pase de señales no deseadas. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de bloques del circuito de verificación.

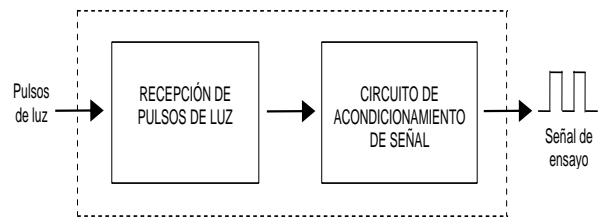


Fig. 3. Diagrama de bloques del circuito de verificación.

Finalmente se obtiene una señal acondicionada con la misma frecuencia de los pulsos de luz emitidos por el sistema generador de pulsos de luz que puede ser medida con un contador de frecuencias Fluke PM6690, el cual se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio obteniendo trazabilidad al UTC. En la Fig. 4 se muestra una foto del circuito de verificación.

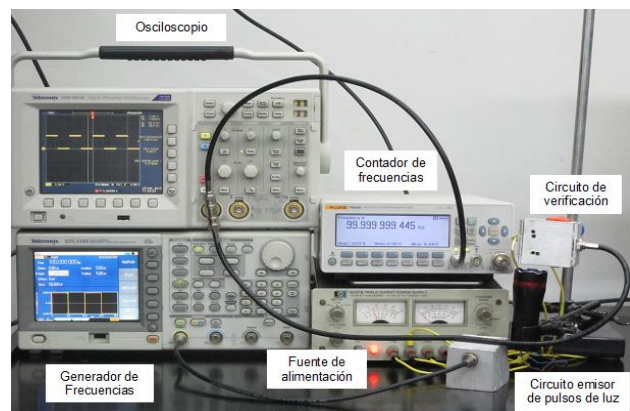
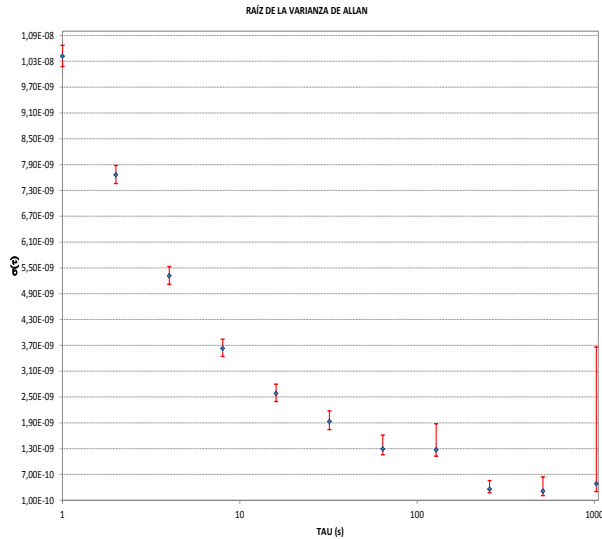


Fig. 4. Foto del circuito de verificación.

Disponemos de un historial de varios años de datos realizando continuamente la caracterización del ruido del sistema generador de pulsos de luz. En la Fig. 5 se muestra la estabilidad obtenida en la caracterización del ruido del sistema generador de pulsos de luz en términos de la raíz de la varianza de Allan ( $\sigma(\tau)$ ) [5] usando el software AMTyF [8], obteniendo un valor alrededor de 0,01  $\mu\text{Hz}/\text{Hz}$  ( $1 \times 10^{-8} \text{ Hz}/\text{Hz}$ ) para un tiempo de 1024 s.



**Fig. 5.** Caracterización del ruido del sistema generador de pulsos de luz del INACAL en términos de la raíz de la varianza de Allan.

### 5. TRATAMIENTO DE DATOS

Para la calibración de tacómetros ópticos se tiene el siguiente modelo matemático para obtener de esta forma el error ( $E$ ) del tacómetro a calibrar, el cual está dado por:

$$E = (L_{cal} + C_{res} + C_{temp_c}) - (L_{pat} + C_{base} + C_{temp_p}) \quad (1)$$

donde:

$L_{cal}$  es la lectura del tacómetro en revoluciones por minuto (rpm).

$C_{res}$  es la corrección debida a la resolución del tacómetro.

$C_{temp_c}$  es la corrección debida a la temperatura de funcionamiento del tacómetro.

$L_{pat}$  es la lectura del patrón en Hertz (Hz), teniendo en cuenta que: 1 Hz = 60 rpm.

$C_{base}$  es la corrección debida a la base de tiempo del patrón.

$C_{temp_p}$  es la corrección debida a la temperatura de funcionamiento del patrón.

A continuación se procede a analizar cada aporte a la incertidumbre del sistema de generación:

**Variación de las lecturas:** En la caracterización del ruido del sistema generador de pulsos de luz del INACAL se considera un aporte de  $1 \times 10^{-8} \text{ Hz}/\text{Hz}$ .

**Resolución del instrumento a calibrar:** Como la verificación se realiza utilizando un circuito verificador entonces este aporte dependería del contador de frecuencia utilizado. Como el contador de frecuencias es de 12 dígitos. Entonces se estima un aporte de  $1 \times 10^{-10} \text{ Hz}/\text{Hz} = 1 \times 10^{-12} \text{ Hz} / 100 \text{ Hz}$ .

**Calibración del patrón utilizado:** Esta contribución corresponde al generador de frecuencia el cual se encuentra comandado por referencia externa por lo que adquiere las características del patrón que lo comanda. La incertidumbre de calibración de nuestro oscilador patrón se indica en su manual con un aporte de  $5 \times 10^{-14}$  para un tiempo de 5 días.

**Deriva del patrón utilizado:** Esta contribución corresponde al generador de frecuencia el cual se encuentra comandado por referencia externa por lo que adquiere las características del patrón que lo comanda. Se estima en el peor de los casos un aporte inferior a  $1 \times 10^{-11} \text{ Hz}/\text{Hz}$ , valor similar a las Capacidades de Medición y Calibración (CMCs) del INACAL publicadas en la página web del BIPM.

**Contribuciones por condiciones ambientales:** En el laboratorio se mantienen condiciones ambientales controladas por lo que estos aportes no se consideran.

En la Tabla 1 se muestra el presupuesto de incertidumbre del sistema de generación:

Fuente de Incertidumbre	Tipo	Aporte (Hz/Hz)	Valor (Hz/Hz)
Variación de las Lecturas	A	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-8}$
Resolución del Instrumento a Calibrar	B	$1 \times 10^{-10} / 2 \times \text{raiz}(3)$	$0,3 \times 10^{-10}$
Calibración del Patrón Utilizado	B	$5 \times 10^{-14} / 2$	$2,5 \times 10^{-14}$
Deriva del Patrón Utilizado	B	$< 1 \times 10^{-11} / \text{raiz}(3)$	$< 0,6 \times 10^{-11}$
Incertidumbre Combinada			$1 \times 10^{-8}$
Incertidumbre Expandida			$2 \times 10^{-8}$

**Tabla 1.** Presupuesto de incertidumbre.

Es fácil observar que la mayor contribución a la incertidumbre sería la contribución debida a la caracterización del ruido del sistema generador de pulsos de luz del INACAL con un aporte de  $1 \times 10^{-8}$  Hz/Hz por lo que en la calibración de tacómetros ópticos se estima un aporte mejor o igual que  $0,1 \mu\text{Hz/Hz}$  ( $1 \times 10^{-7}$  Hz/Hz), 10 veces mayor a la contribución debida a esta caracterización y 1000 veces mayor al típico error máximo permisible de un tacómetro óptico considerado actualmente en el orden de  $100 \mu\text{Hz/Hz}$  (0,01%). Si se mantienen condiciones ambientales controladas y teniendo en cuenta que el patrón se encuentra comandado a la frecuencia patrón del laboratorio estos aportes se pueden despreciar y la incertidumbre de  $E$  dependería solo de la variación de las lecturas y de la resolución del tacómetro a calibrar [3], con lo cual es posible indicar que con este sistema de medición la incertidumbre se reduce considerablemente ya que dependería de las bondades del instrumento a calibrar.

Para el caso de que el laboratorio de calibración no cuente con una frecuencia referencia patrón y el laboratorio opte por calibrar sus equipos en un INM o en un laboratorio acreditado en calibración de generadores de frecuencia para obtener la trazabilidad correspondiente se debe tener en cuenta que la corrección debida a la base de tiempo del patrón ( $C_{base}$ ) en la ecuación (1) debe ser reemplazada por una corrección debida a la calibración del generador de frecuencias y una corrección debida a las especificaciones del generador de frecuencias. Esta corrección debida a las especificaciones del generador de frecuencias puede ser reemplazada por la deriva del equipo si es que se cuenta con un buen historial del mismo. Teniendo en cuenta que el mejor error máximo permisible (accuracy = exactitud, según el fabricante) de un tacómetro óptico se encuentra en el orden de  $100 \mu\text{Hz/Hz}$  (0,01%). Entonces para seleccionar el generador patrón a utilizar en este servicio de calibración se recomienda que el patrón seleccionado cuente con un error máximo permitido por lo menos 4 veces mejor a este valor. Finalmente el laboratorio que opte por esta opción deberá evaluar su incertidumbre de calibración tomando como referencia lo indicado en este trabajo ya que este trabajo se ha desarrollado teniendo en cuenta que en el laboratorio se distribuye una frecuencia de referencia patrón, la cual se utiliza para mejorar la base de tiempo de los equipos del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del INACAL.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que es posible calibrar tacómetros ópticos utilizando un sistema generador de pulsos de luz con una incertidumbre de medición mejor o igual que  $0,1 \mu\text{Hz/Hz}$ .

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al “SIM Time and Frequency Metrology Working Group” por sus diversos aportes y constante apoyo en la realización de este trabajo, en especial al Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP).

## REFERENCIAS

- [1] C. S. Veldman. Calibration of Tachometers. National Metrology Laboratory. CSIR, PO Box 395, Pretoria 0001.
- [2] Henry Diaz - Luis Palma (SNM-INDECOPI). Calibration of optical Tachometers using a generator system of light pulses. CPEM 2014. August 2014.
- [3] Liz C. Hernández, Nelson Bahamón. INM. Estimación de Incertidumbre en la Calibración de Tacómetros Ópticos. Momento. Revista de Física, No 52, Junio 2016.
- [4] Henry Diaz - Luis Palma. Calibración de estroboscopios utilizando un sistema de medición de frecuencia. INACAL. Perú. Simposio de Metrología 2016 (CENAM). Setiembre 2016.
- [5] CENAM – ema. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la metrología de tiempo y frecuencia. México. Abril 2008. Revisión 01.
- [6] Circular T. This page allows you to view the monthly publication of the BIPM Time Department that provides traceability to UTC for the local realizations UTC(k) maintained by national institutes <http://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Circular-T.html#nohref>.
- [7] The SIM Time Network. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology (NIST). Volume 116, Number 2, March-April 2011.
- [8] Francisco Jiménez. CENAM. AMTyF Análisis de Mediciones de Tiempo y Frecuencia. Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2005.