

# CALIBRACIÓN EN LONGITUD DE ONDA DE UN LÁSER ESTABILIZADO DE HE-NE

Jorge Álvarez-Karina Bastida

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) - Centro INTI- Física y Metrología  
e-mail: jorge@inti.gov.ar

Se midieron las longitudes de onda de dos láseres (543 nm y 633 nm) de He-Ne estabilizados en frecuencia con una precisión de 1 parte en  $10^8$ . La medición se realizó mediante un interferómetro de Michelson con doble espejo móvil utilizando como referencia 6 longitudes de ondas absolutas de un láser estabilizado He-Ne/I<sub>2</sub> (Metro Patrón Nacional). Dichos láseres son la referencia en el interferómetro donde se calibran los patrones de longitud materializados (Bloques Patrón de Longitud) de INTI y distintas agencias de calibración. En el desarrollo del presente trabajo se describen los aspectos más importantes de la medición y las fuentes de incertidumbres involucradas.

Palabra clave: calibración, longitud de onda, interferómetro.

The wavelength of two frequency stabilized He-Ne lasers (543 nm y 633 nm) were measured with a precision of 1 part in  $10^8$ . The measurement was done by a Michelson Interferometer with double mobile mirrors, using as reference 6 absolute wavelengths of an iodide stabilized He-Ne laser (National Standard Meter). These lasers are used as reference in the interferometer where the materialized length standards (standards gauge blocks) from INTI and several calibrations laboratories are calibrated. The most important aspect of the measurement and the uncertainties source are described in this work.

Key Word: calibration, wavelength, interferometer.

## INTRODUCCIÓN

En el año 1983, en la 17<sup>ma</sup> Conferencia General sobre Pesas y Medidas, se adoptó la actual definición del metro que establece que  $1 \text{ m} = c_0 \times 1/299792458 \text{ seg.}$  (donde  $c_0 = 299792458 \text{ m/seg}$  es el valor adoptado para la velocidad de la luz en el vacío). En el mismo año el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) estableció las instrucciones para la realización práctica de la nueva definición. Con este fin los Institutos Nacionales de Medidas de todo el mundo construyeron láseres estabilizados en las frecuencias patrones recomendadas por CIPM<sup>1</sup>. La radiación más utilizada es la de los láseres de HeNe estabilizados sobre líneas de absorción del <sup>127</sup>I<sub>2</sub> (633 nm). Estos láseres constituyen la realización primaria del metro en la mayoría de Institutos Nacionales de medidas y son utilizados como patrones de frecuencia óptica para calibrar, por comparación, otras fuentes de radiación. Este trabajo trata de la calibración en longitud de onda, trazable al láser de He-Ne/I<sub>2</sub> perteneciente al INTI, de dos láseres de He-Ne estabilizados (543 nm y 633 nm). Los láseres calibrados son empleados en un sistema de medición interferométrico con los que se calibran los patrones de longitud materializados<sup>(2)</sup>, usados para dotar de trazabilidad a las distintas ramas de la industria. Anteriormente la calibración en longitud de onda se realizaba en el exterior. En esta oportunidad se logra cerrar por primera vez la cadena de trazabilidad dentro del país.

Actualmente la calibración en longitud de onda se realiza por dos métodos: sistema de batidos de frecuencia interferométrica. El método de batido se emplea cuando la diferencia de frecuencia entre la referencia y el

mesurando no supera la decena de GHz, lo que corresponde a una diferencia de longitud de onda no mayor a  $10^{-2} \text{ nm}$ . Por lo contrario la comparación de longitudes de onda utilizando arreglos interferométricos permite contrastar láseres de distintas longitudes de onda, y son el ancho de banda de los detectores de franjas o la incertidumbre de calibración los factores que establecen el límite diferencia de longitud de onda permitida. Una importante ventaja es que contando solo con un láser de referencia se pueden calibrarse láseres en un amplio rango del espectro. Por esta razón, en el presente trabajo, se eligió como método de calibración el interferométrico. El esquema interferométrico usado es básicamente el desarrollado por Hall y Lee<sup>(3)</sup> con la incorporación de las modificaciones realizadas por distintos autores<sup>(4)</sup>.

## MONTAJE Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El interferómetro montado es de tipo Michelson con doble espejo móvil (figura 1).

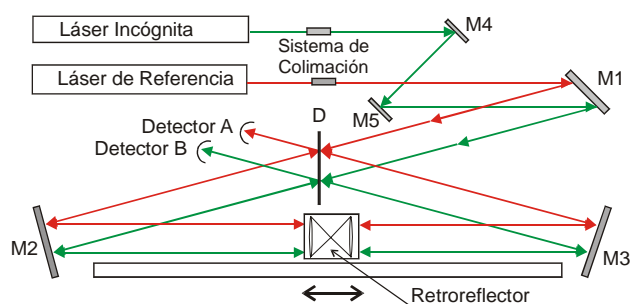


Figura 1: Esquema del interferómetro.

El interferómetro consta de dos espejos fijos,  $M_2$  y  $M_3$ , un retroreflector doble móvil que se desplaza entre los espejos  $M_2$  y  $M_3$  y un divisor de haz D. Este arreglo genera un desplazamiento de franja en  $\lambda/4$ .

El mecanismo de propulsión del retroreflector se logra con dos electroactuadores colocados en los extremos de un riel de granito de 1 m de longitud. El rozamiento se minimiza generando un colchón de aire entre la base que soporta el retroreflector y el riel.

Alineado el interferómetro con el láser de referencia, (láser patrón), se utilizaron los espejos  $M_4$  y  $M_5$  para alinear el láser a calibrar respecto de la de referencia, de modo que la diferencia de camino geométrico recorridos por cada láser sea la misma. En estas condiciones se cumple la relación

$$N_A \lambda_R = N_B \lambda_i \quad (1)$$

donde  $N_A$  es el número de máximos de intensidad registrados por el detector A, (láser patrón de referencia),  $N_B$  es el número de máximos de intensidad registrados por el detector B (láser a calibrar),  $\lambda_R$  la longitud de onda de referencia en el aire, y  $\lambda_i$  la longitud de onda incógnita en el aire.

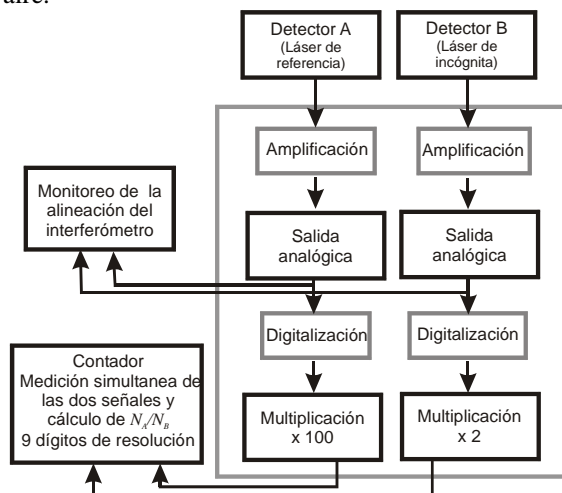


Figura 2: Medición de  $N_A/N_B$

El mesurando  $N_A/N_B$  se obtuvo adquiriendo con un contador en forma simultánea las señales de los detectores A y B (ver figura 2). Para aumentar la resolución en el cálculo del cociente  $N_A/N_B$ , se multiplicó en forma electrónica la señal del detector A (referencia) por 100, y la del detector B (incógnita) por 2. De este modo por cada desplazamiento del retroreflector de la ec. (1) resulta:

$$\lambda_i = \frac{1}{50} \frac{N_A}{N_B} \lambda_R \quad (2)$$

El conteo se efectuó en cada recorrido del retroreflector desde  $M_2$  a  $M_3$  y  $M_3$  a  $M_2$ . La velocidad del retroreflector se ajustó hasta obtener una señal de aproximadamente 1 MHz sobre los detectores. Cada medición se efectuó durante 4 segundos, (la duración del recorrido del retroreflector es de 6 segundos). La misma se realizó controlando que la tensión pico a pico de cada una de las señales se mantuviera constante en el tiempo, y que la

tensión continua de cada una de ellas no fluctuara a medida que el retroreflector se desplazaba.

La medición de  $\lambda_i$  depende a su vez del cociente entre índices de refracción como se muestra en la ecuación (3).

$$\lambda_{oi} = \frac{1}{50} \frac{N_A}{N_B} \left( \frac{n_i(\lambda_{oi}, T, HR, p)}{n_R(\lambda_{oR}, T, HR, p)} \right) \lambda_{oR} \quad (3)$$

donde  $\lambda_{oR}$  es la longitud de onda en el vacío del láser de referencia,  $\lambda_{oi}$  la longitud de onda en el vacío del láser a calibrar,  $n_R$  el índice de refracción del láser de referencia y  $n_i$  el índice de refracción del láser a calibrar.

Los índices de refracción se calcularon con la ecuación de Edlen<sup>(5)</sup>, adquiriendo temperatura (T), presión, (H.R) (p) y humedad relativa a lo largo de cada medición de  $N_A/N_B$ . En el caso de la temperatura, esta adquisición se realizó con 5 termo-resistencias calibradas (PT100) distribuidas a lo largo de los brazos del interferómetro.

La medición de  $\lambda_{oi}$  se realizó por comparación con un láser de He-Ne estabilizado por celda de  $I_2$ , (láser patrón o láser de referencia en la ecuación (3)). La reproducibilidad de estos láseres se encuentra bien documentada como resultado de intercomparaciones<sup>(6)</sup> entre Institutos Nacionales de Medidas (INM). El láser de referencia utilizado cumple con la recomendación del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM)<sup>(7)</sup>. La temperatura de la celda de  $I_2$  se mantiene en  $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  con una temperatura de dedo frío de  $15^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$  lo que asegura una presión de vapor estable en los valores deseados. El ancho de modulación de la frecuencia del láser es de  $6\text{MHz} \pm 0.3\text{MHz}$  y la potencia interna de cada una de las líneas de referencia se puede esperar en cada una de las líneas de referencia de la componente hiperfina del yodino  $^{127}\text{I}_2$  en la línea rotacional R127 (11-5)<sup>(8)</sup> del laser, una incertidumbre relativa de la frecuencia de  $2.5 \cdot 10^{-11}$  <sup>(9)</sup>

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para determinar los parámetros de influencia en la medición y caracterizar el comportamiento estadístico del conteo de franjas, se realizaron mediciones sucesivas sobre el láser verde con el láser de referencia estabilizado en una de las líneas de absorción. Se observó una secuencia de mediciones a lo largo de 60 min. en intervalos de 6 seg. Cada medición del mesurando  $N_A/N_B$  fue acompañada por una medición simultánea de la temperatura, la presión y la humedad relativa en la cercanías del interferómetro. Con valores simultáneos de el cociente entre índices de refracción y el mesurando  $N_A/N_B$ , se calculó la longitud de onda  $\lambda_i$ , a partir de la ecuación (3).

En la figura 3 puede apreciarse el comportamiento del cociente entre índices de refracción y la longitud de onda calculada para cada medición. Para hacer una comparación directa se graficaron las variaciones respecto al valor promedio obtenido para cada variable ( $\lambda_{oi}$  y  $n_i/n_R$ ) entre todas las mediciones.

Puede apreciarse que las variaciones de los valores de longitud de onda durante el periodo de medición no siguieron las variaciones del cociente entre índice de

refracción. Por lo tanto la medición esta dominada por la estadística de mesurando  $N_A/N_B$  (ver ec.(3)).

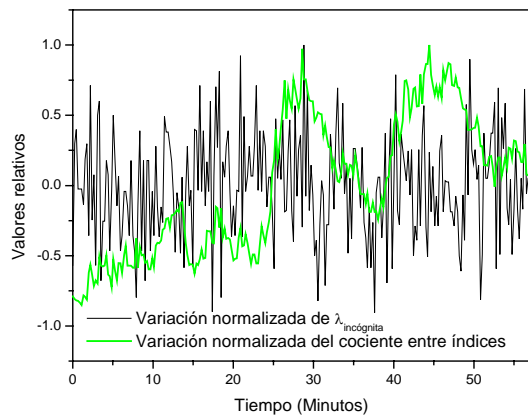


Figura 3. Variación normalizada del cociente entre índices de refracción y la longitud de onda  $\lambda_i$ .

La desviación estándar encontrada en 600 mediciones de  $N_A/N_B$  alcanza las 8 partes en  $10^9$  mientras que una secuencia de 10 mediciones cualquiera, tomada de la serie, presenta una desviación estándar máxima de 1 parte en  $10^8$ , siendo la resolución de una sola medición de 1 partes en  $10^9$ .

Para observar variaciones sufridas por la longitud de onda, con el mismo esquema interferométrico, debidas a cambios del índice de refracción y la propia estabilización a corto plazo de los láseres (2.5 partes en  $10^{11}$  en el caso del láser de referencia y 1 parte en  $10^9$  en el láser incógnita) se necesita de una mayor resolución y exactitud en la determinación de  $N_A/N_B$ .

Generalmente cuando se calibra la longitud de onda de un láser estabilizado por el método de batido de frecuencia se analiza la incertidumbre de medición utilizando variancia de Allan. En nuestro caso el comportamiento de la desviación estándar de la serie medición corresponde al de datos descorrelacionados<sup>(10)</sup>. Toda correlación producto de la estabilización en frecuencia de los láseres no se alcanza a visualizar y predomina la estadística relacionada a la medición de  $N_A/N_B$ . Por esta razón se calcularon las incertidumbres de medición suponiendo que los procesos involucrados eran Gaussianos.

Bajo estas consideraciones la calibración se efectuó comparando el láser incógnita contra 6 de las 7 longitudes de onda de referencia de la componente hiperfina del yodo  $^{127}\text{I}_2$  en la línea rotacional R127 (11-5). En cada longitud de onda de referencia, se realizaron 10 mediciones. El valor de longitud de onda en el vacío del láser incógnita,  $(\lambda_{oi})$  se determinó como el promedio de los valores promedios hallados en cada una de las 6 longitudes de onda de referencia, como se indica en la ecuación (4).

$$\langle \lambda_{oi} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\sum_{j=1}^{10} \lambda_{oRj}}{10}}{6} \quad (4)$$

Para el cálculo de incertidumbre se consideró la correlación existente entre los índices de refracción (estos son calculados por medio de la medición simultanea de las variables ambientales). De los datos representados en la figura 3 se calculó la correlación entre el mesurando  $N_A/N_B$  y el cociente entre índices  $n_i/n_R$  resultando esta despreciable.

Sucesivos ajustes de los espejos del interferómetro en conjunto con la observación de la señal analógica de los detectores A y B permitieron reducir los errores de coseno debido a la desalineación entre los láseres, a un orden inferior ( $10^{-9}$ ) que las componentes de incertidumbre estadística. La utilización de un retroreflector eliminó los errores producto de movimientos axiales durante el recorrido del mismo. Por este motivo las componentes de incertidumbre producto de la alineación no fueron tenidas en cuenta para el cálculo de la incertidumbre.

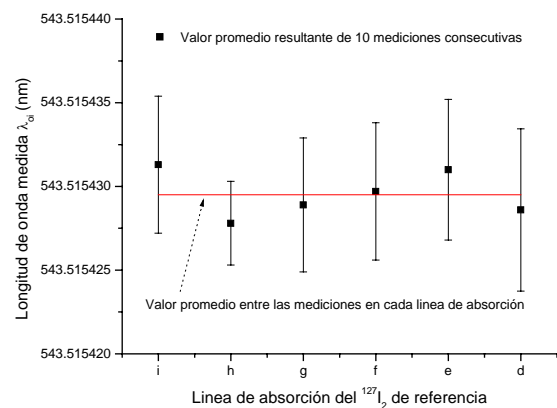


Figura 4. Longitud de onda medida,  $(\lambda_{oi})$ , del láser verde estabilizado, en cada una de las líneas de referencia.

La figura 4 muestra los valores obtenidos en la calibración del láser estabilizado verde. La longitud de onda resultante fue de 543.5154295nm con una incertidumbre ponderada relativa<sup>(11)</sup> de  $7 \times 10^{-9}$ .

Siguiendo el mismo procedimiento se calibró un láser estabilizado rojo, el de valor de longitud de onda resultó ser 632,9914865nm con una incertidumbre ponderada relativa de  $8 \times 10^{-9}$ .

## CONCLUSIONES

La realización de la mediciones en un área limpia con las condiciones ambientales controladas (Variaciones máximas en el periodo de medición  $\Delta T = 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\Delta HR = 0,1\%$ ;  $\Delta P = 0,01 \text{ mbar}$ ) minimizó la contribución a la incertidumbre en el cálculo del cociente entre índices. La incertidumbre de calibración quedo dominada entonces por el término estadístico relacionado con la determinación de  $N_A/N_B$  por lo que se obtuvieron incertidumbres similares tanto para el láser con longitud de onda mas cercana al láser de referencia (633 nm) como para el láser verde (543 nm). Si bien con este sistema no pudo resolverse la dinámica de estabilización de los láseres incógnitas, las incertidumbres relativas de

calibración alcanzadas ( $1 \times 10^{-8}$ ) son aptas para la utilización de dichos láseres como patrones de longitud en la calibración de bloques patrones. Contando con solo un láser de referencia (Patrón Nacional del Metro), por medio de este trabajo se logró cerrar la cadena de trazabilidad en longitud dentro del país, sin necesidad de recurrir a INM extranjeros.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la valiosa colaboración del Ing. Ricardo Iuzzolino.

## REFERENCIAS

- 1- Documents Concerning the New Definition of the Metre Metrologia, 1984, 19, 163-178.
- 2- "GPS - Length standard - Gauge blocks", ISO 3650, 2<sup>nd</sup> ed. 1998-12-15.
- 3- J.I. Hall and S.A. Lee. Appl. Interometry real-time display of CW dye laser wavelength with sub-Doppler accuracy, Phys. Lett. Vol. 29, No 6, 367 (1976)
- 4- P.J. Fox et al. A reliable, compact and low-cost Michelson wavemeter for laser wavelength measurement, Am. J. Phys., 67 (7), 624 (1999). Ayan Banerjee et al. Applied Physics Letters, Vol 79, No 14, 2139 (2001)
- 5- Correction of the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air, K.P.Birch and M.J.Downs, Metrología, 1994, 31,315-316
- 6- Ver por ejemplo: M. Erin, I. Malinovsky, A. Titov, A. Chartier and J. M. Chartier. Comparison between the He-Ne laser wavelength standards at 633 nm from the UME and the BIPM, Metrologia, 1995/96, 32, 363-365.
- 7- Recommendation M 1, BIPM Com. Cons. D'ef. M'etre, 9th Meeting 1997; Recommendation 1 (CI-1997), BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures, 1997, 65, 243-252; ver también Quinn T. J., Metrologia, 1993/94, 30, 523-541.
- 8- Quinn T. J., Metrologia, 1999, 36, 211-244.
- 9- Massone C.A., Titov A., Malinovsky I., Cogno J., Viliesid M., Pichardo R., Madej A., Chartier A., Chartier J.-M.[INMETRO, INTI, CENAM, NRC-INMS, BIPM]International Comparison: International comparisons of He-Ne lasers stabilized with  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda = 633$  nm (July 2000) *Metrologia*, 2002, 39, n°6, 579-585.
- 10- Fritz Riehle, Frequency Standards, Chapter 3 . Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KgaA, 2004.
- 11- Guide to the expression of uncertainty in Measurement (BIPM, IEC,IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML), 1993.