

SISTEMA INTERFEROMETRICO HETERODINO ORIENTADO AL USO EN CAMPO

Isaías C. Merlín A., Miguel A. Benítez M., Marcos Mendoza R., Héctor A. Castillo M.
Centro Nacional de Metrología, División de Metrología Dimensional
km, 4.5 carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro, México C.P. 76246

Resumen: En el presente trabajo se describe el desarrollo de un sistema interferométrico diseñado y construido para la calibración de desplazamiento en campo de máquinas de medición y manufactura, para la calibración en campo de desplazamientos en maquinas de medición y manufactura así como escalas ópticas con resolución en el orden de $0.5 \mu\text{m}$. El sistema interferométrico desarrollado cuenta con un novedoso procesamiento electrónico de conteo e interpolación de la señal de interferencia con resolución interpolada en hardware de 26 nm y resolución numérica promediada y estable menor de 10 nm. Para la compensación de la longitud de onda, se diseño una unidad ambiental constituida por un barómetro, termómetro para material, termómetro para aire e higrómetro.

1. INTRODUCCIÓN

El aseguramiento de las mediciones de escalas ópticas de máquinas de medición de alta exactitud se realiza necesariamente con sistemas medición ópticos de no contacto basados en interferencia de la luz de un láser; estos sistemas pueden ser del tipo homodino con una sola frecuencia óptica o heterodino con dos frecuencias ópticas linealmente polarizadas y ortogonales entre si. Estos sistemas se denominan comúnmente sistemas interferométricos y compiten en las mediciones lineales y de no contacto con otros instrumentos que utilizan longitudes de onda en el visible o infrarrojo como medio para la medición de longitud o desplazamiento lineal.

Por su costo la aplicación de los sistemas interferométricos se limita en la actualidad a las mediciones que requieren exactitud en el orden de micrómetros ó décimas de micrómetro, o bien en la medición de desplazamientos muy cortos menores a los micrómetros en mediciones de no contacto en instrumentos para nanotecnología, microlitografía, circuitos integrados, etc. [1]

Existen sistemas de medición de desplazamiento o distancia mas versátiles que los interferómetros, estos pueden cubrir las necesidades de medición para instrumentos cuya reproducibilidad de las mediciones de desplazamiento se encuentra en el orden de decenas o centenas de micrómetros por metro como es el caso de la gran mayoría de escalas codificadas lineales o angulares usadas en aplicaciones industriales y de control de movimiento en la industria de la manufactura.

Para explotar adecuadamente la capacidad de medición de un sistema interferométrico, se deben de considerar que existen al menos dos limitaciones importantes en la medición por este método. 1.- La reproducibilidad de las mediciones de desplazamiento o longitud está limitada por la calidad del guiado mecánico, por el sistema de transmisión de movimiento y su control. 2.- Para poder calcular adecuadamente la longitud de onda en aire (escala de medición de un sistema interferométrico), se requiere que las condiciones ambientales de temperatura, humedad y presión de aire sean estables y puedan ser medidas con alta exactitud.

Las dos condiciones anteriores difícilmente se logran en la calibración máquinas o locaciones industriales, razón por la cual los sistemas de medición de no contacto que pueden emplearse en su calibración pero tienen menor exactitud que los sistemas interferométricos convencionales o bien especificaciones de exactitud holgadas en sus sensores ambientales o incluso carecer de ellos lo que limita su incertidumbre relativa a 10^{-4} (100 μm por metro). En contraste, los sistemas de medición empleados en calibraciones de instrumentos de laboratorios metrológicos requieren de una incertidumbre relativa menor a 10^{-5} (10 μm por metro), por lo que en estos casos se requiere la calibración de sus instrumentos con patrones físicos o interferómetros láser cuya compensación ambiental sea suficientemente rápida y exacta para mejorar la repetibilidad de las mediciones en condiciones ambientales variables. [2]

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un sistema interferométrico diseñado y construido para la calibración en campo de desplazamiento de máquinas de medición y manufactura, así como escalas lineales ópticas de media y alta exactitud de laboratorios metrologicos.

2. DESARROLLO

El sistema desarrollado cuenta con un novedoso procesamiento electrónico de conteo e interpolación de la señal de interferencia con resolución interpolada en hardware de 26 nm para arreglo óptico lineal con Retroreflector y resolución numérica promediada y estable menor de 10 nm. El alcance de la medición es de 20 m, distancia limitada por la intensidad del haz y la refracción debida a variaciones del índice de refracción en la trayectoria del haz de medición.

Para la compensación de la longitud de onda, se diseño una unidad ambiental constituida por un barómetro, termómetro para material, termómetro para aire e higrómetro. La unidad ambiental cuenta con la facilidad de comunicación inalámbrica con una PC a fin de localizarla en la mejor posición experimental disponible.

La fuente láser usada para el sistema interferométrico es la cabeza láser Agilent modelo 5519. Los elementos que conforman el sistema interferométrico se muestran en el esquema de la figura 1.

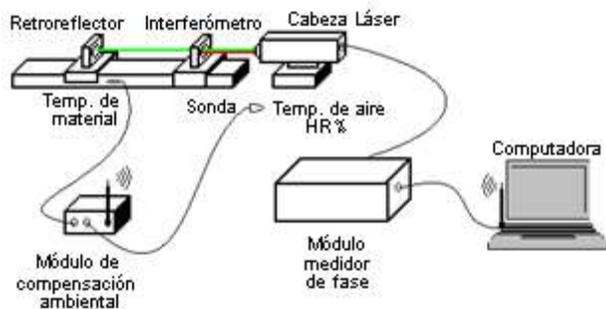


Figura 1.- Esquema del sistema interferométrico desarrollado

2.1. Modulo de compensación ambiental.

El módulo de compensación ambiental se encarga de medir temperatura de aire, temperatura de material, humedad relativa del aire y presión barométrica. Estas mediciones son controladas por

medio de un microcontrolador, utilizando los circuitos electrónicos diseñados para la medición especializada con cada uno de los sensores. El módulo está programado para que se conecte a una interfaz Bluetooth previamente identificada, la conexión entre los transceptores Bluetooth se realiza de manera automática, y una PC puede recibir los datos que envía el módulo y calcular el índice de refracción del aire del medio en donde se encuentra la medición. Los intervalos de medición para los sensores utilizados se encuentran en la tabla 1, así como la comunicación de datos y la alimentación de entrada del módulo.

Tabla 1.- Especificaciones alcanzadas con los sensores de la unidad ambiental.

Dispositivo	Intervalo de medición	Resolución del sensor	Reproducibilidad del sensor
Termómetro de material	(18.5-24) °C	1.3 m°C	Mejor que 40 m°C
Termómetro de aire	(17.5-34.5) °C	4.2 m°C	< 0.1 °C
Higrómetro	0-100 %HR sin condensación	± 0.5 %HR	2 %HR
Barómetro	(30-120) kPa	1.5 Pa	< 50 Pa
Bluetooth	Clase 1	Perfil: SPP	Alcance ≈ 100 m
*Puerto serial virtual por Bluetooth.			
Alimentación	(15-19) Vcc		

Para la medición de temperatura de material, se utilizó un termómetro de resistencia de platino PT100, con 100 Ω a 0 °C, α=0.00385 (0.385 Ω/°C.) clase A, sensor cilíndrico con diámetro de 0.125 de pulgada y longitud de 2 pulgadas. El sensor fue excitado con una fuente en corriente continua de 0.8 mA.

Para la calibración del sensor de aire se generaron puntos estables por medio de un intercambiador de calor basado en un bloque igualador con cambio de temperatura por termoeléctricos Peltier de 18 °C y 22 °C. Los puntos de calibración fueron usados para generar una función lineal entre el voltaje adquirido del circuito de puente diseñado y la temperatura de un puente termométrico ASL F250 y sensor de resistencia de platino calibrado con celdas de puntos fijos de agua y galio y de acuerdo a la ITS-90.

Con la función lineal obtenida, se midió la temperatura de los puntos mostrados en la tabla 2.

Tabla 2.- Medición de temperatura de material después de calibración del sensor PT100

F-250 CH-A (°C)	PT-100 (°C)	Desviación PT100 – Patrón (°C)
23.039	22.934	-0.105
22.266	22.323	0.057
21.045	21.084	0.039
20.007	20.045	0.038
19.176	19.151	-0.025
18.216	18.160	-0.056
17.381	17.364	-0.017

El sensor de temperatura de aire seleccionado fue una resistencia de platino PT1000 incorporada al cuerpo del sensor de humedad. Con resistencia de $1000 \Omega \pm 0.2 \% a 0 \text{ }^\circ\text{C}$, fabricado bajo DIN EN 60571, clase 2B y $3.85 \Omega/^\circ\text{C}$.

El sensor de aire y el de humedad relativa fueron colocados en una sonda con protector metálico y se conectaron a la unidad ambiental por medio de cable.

La excitación en corriente continua usada para la resistencia de platino es de $100 \mu\text{A}$ y fue calibrada por medio de una cámara cerrada de paredes metálicas y aislada térmicamente del laboratorio. Las paredes de la cámara cambian de temperatura por medio de termoeléctricos Peltier y la temperatura de aire es determinada por medio de dos sensores patrón conectados a un puente termométrico ASL F250. El sensor PT1000 es colocado entre los patrones, los cuales tienen una diferencia de temperatura menor a $50 \text{ m}^\circ\text{C}$ para los puntos de temperatura constante generados en la cámara.

Los resultados obtenidos después de linealizar la respuesta del sensor son los siguientes:

Tabla 3.- Resultados de medición de temperatura de aire con termómetro de resistencia de platino PT1000

F-250 (°C)	PT-1000 (°C)	Diferencia (°C)
17.181	17.041	-0.140
21.529	21.719	0.190
34.836	34.786	-0.050

Para la medición de humedad relativa de aire se utilizó un sensor modelo HIH-3602-C de la marca Honeywell, este sensor es de tipo capacitivo y está construido sobre sustrato de silicio y películas protectoras para ambiente industrial, tiene un encapsulado cilíndrico TO-5, su salida es en tensión y cuenta con un PT1000 para medir la temperatura

ambiente con las que puede realizar compensaciones en la medición de humedad.

Usando como referencia la norma ASTM E104 se utilizaron sales para generar un volumen de humedad relativa (HR) conocida dentro de matraces sellados en donde se colocaba el sensor de humedad a calibrar. Las sales utilizadas son cloruro de litio (LiCl) que generan una HR de 11.3%, cloruro de magnesio (MgCl_2) con HR de 33.1% y cloruro de sodio (NaCl) con HR 75%, todas las soluciones saturada se estabilizaron a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Los resultados obtenidos después de la calibración del sensor de humedad y ajuste lineal de su respuesta son los siguientes:

Tabla 4.- Resultados de la calibración del sensor HIH

Sales (% HR)	HIH (% HR)	Diferencias (% HR)
11.300	11.270	-0.030
33.100	33.145	0.045
75.500	75.485	-0.015

El sensor para la medición de la presión barométrica es de la marca VTI modelo SCP-1000, cuenta con una interfaz digital de comunicación SPI y sensor de temperatura para la compensación de la medición de presión.

El SCP-1000 es un sensor capacitivo de presión absoluta fabricado con MEMS (sistemas micro electromecánicos) sobre sustrato de silicio. El elemento sensible consiste de una oblea de silicio adelgazada localmente en la región del sensor formado una membrana sensible a la presión por medio del cambio de capacitancia. El diafragma se deforma debido a la diferencia de presión entre el exterior del sensor y el interior de la cámara de referencia de vacío.

El sensor de presión fue calibrado y ajustado usando como referencia un barómetro absoluto modelo Mensor 1450 con incertidumbre de medición menor de 10 Pa. La diferencia de presión entre ambos barómetros fue menor de 30 Pa en un periodo de 30 días. El comportamiento para 24 horas se presenta en la figura 2, donde se muestran las lecturas del patrón y del SCP tomadas en espacio abierto en laboratorio

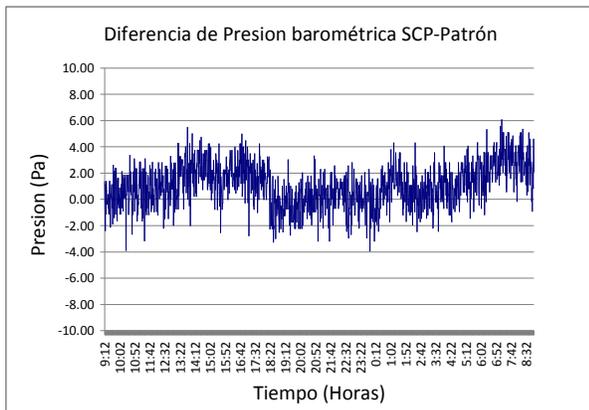


Figura 2. Diferencia de medición de presión entre los barómetros SCP y Mentor

El módulo de compensación mide las variables ambientales y por medio de la ecuación de Edlen corregida calcula el índice de refracción del aire, para determinar la longitud de onda en el aire del láser utilizado en la medición. El módulo de compensación se comunica por medio de bluetooth habilitado con el perfil de puerto serial y permanece oculto para otros dispositivos conectados a la PC.

2.2. Módulo de medición de fase e interpolador.

Las dos señales opto-electrónicas generadas en un interferómetro heterodino se denominan de referencia y de medición. Estas señales son producidas por el fenómeno de interferencia de luz láser en el arreglo óptico del interferómetro y son transformadas en señal eléctrica por medio de fotodiodos. [3,4]

La señal de referencia Δf , es obtenida de la frecuencia intermodal o mezclado de las dos frecuencias ópticas de la cabeza o fuente láser heterodina, esta señal es de frecuencia y fase constante, la cual es usada como referencia para la señal de medición.

La señal de medición se obtiene del arreglo óptico del interferómetro y es una señal con frecuencia variable con variación máxima $\pm \Delta f$, la fase de esta señal se desplaza directamente proporcional al movimiento del objeto que se desea medir.

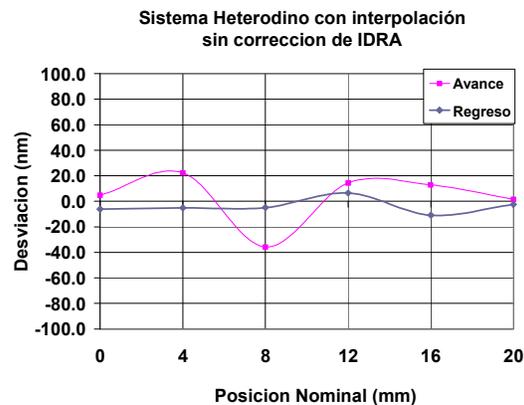
El módulo de medición de fase es usado para la determinación de fase con resolución de $2\lambda/32$ entre las señales de referencia y de medición provenientes de un interferómetro heterodino con arreglo óptico de espejo plano de doble incidencia.

El resultado de aplicar el módulo a las señales de medición del interferómetro heterodino es la obtención del número de cuentas enteras de las fracciones $2\lambda/32$ obtenidas por el movimiento del retro reflector móvil del arreglo óptico del interferómetro heterodino. Adicional a la resolución obtenida por la fracciones enteras, el módulo cuenta con interpolación en hardware para la determinación de la fase en fracciones $2\lambda/96$ (≈ 13 nm) para un arreglo de espejo plano.

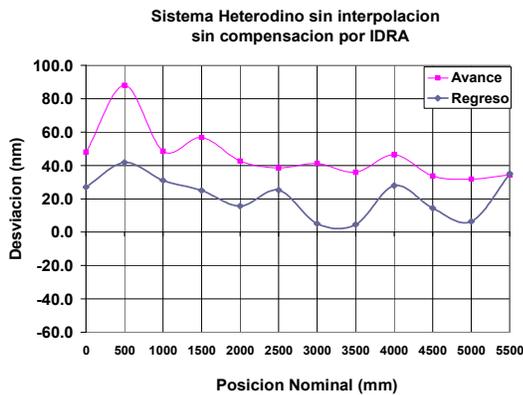
La velocidad máxima de medición usando una cabeza láser Agilent 5519A con frecuencia intermodal de 2.89 MHz es de 0.2 m/s y puede ser ampliada usando cabezas láser cuya generación de los dos modos ortogonales sea obtenida por medio de moduladores y no por efecto Zeeman como en el caso de las cabeza Agilent. Es conveniente indicar que la diferencia entre las dos componentes de frecuencia óptica de un láser heterodino (frecuencia intermodal) determinan la máxima variación en frecuencia (efecto Doppler) que puede tener la señal óptica debido al movimiento del objeto a medir.

El módulo de medición de fase se comunica con la PC por medio de un puerto serial. La velocidad de muestreo en el programa de la PC es independiente de la actualización en tiempo real que se realiza en el módulo de medición de fase, debido a que el sistema electrónico opera independientemente de la PC con una velocidad de muestreo de 8 mega muestras por segundo.

En la figura 3a, se muestra una medición del sistema interpolado para desplazamientos ejecutados por una mesa con actuadores piezo eléctricos y resolución de desplazamiento de 10 nm.



a)



b)

Figura 3.- Diferencia de desplazamiento, módulo interpolado – interferómetro patrón.

La medición mostrada en la figura 3a fue realizada usando un sistema interferométrico de referencia Agilent 5529 con arreglo óptico lineal y resolución en el patrón de 10 nm. Las mediciones de la figura 3b fueron hechas en un riel con recorrido máximo de 5.5 m. Ambas mediciones se realizaron sin compensación del índice de refracción del aire y midiendo simultáneamente con la misma cabeza láser en el patrón y el módulo desarrollado. En estas mediciones no hay error de alineación entre las trayectorias de los láseres debido a que se usa un mismo haz láser y el resultado solo compara el conteo electrónico de los sistemas interferométricos usando el mismo arreglo óptico sin compensación ambiental aplicada.

3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA COMPLETO

La medición con compensación ambiental se realizó usando un arreglo óptico lineal común a ambos sistemas láser ensamblados con un divisor de haz polarizado, y dos retro reflectores. El camino óptico fue común al haz del láser de referencia y del láser bajo medición.

En las mediciones se usó como referencia la longitud de onda calibrada y corregida en el láser patrón y los valores de temperatura, humedad y presión de patrones. Los valores usados en el sistema desarrollado, fueron tomados automáticamente por el programa de medición usando los sensores conectados al modulo de compensación ambiental.

Estos resultados evalúan la longitud de onda del láser, el sistema electrónico de conteo, la compensación del índice de refracción del aire y la desviación de los sensores ambientales. El coeficiente de expansión térmica usado en ambos sistemas para la compensación de la temperatura de material fue $\alpha=11.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

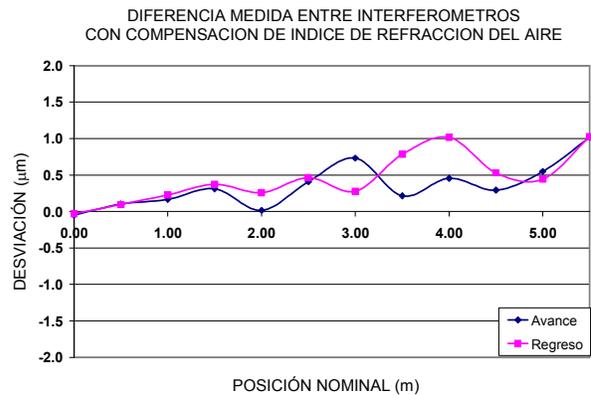


Figura 4.- Diferencia de desplazamiento entre interferómetro de referencia y sistema desarrollado usando compensación ambiental automática.

En las mediciones anteriores, se utilizaron dos cabezas láser Agilent modelo 5519A, de las cual se conocen datos de baja deriva y alta estabilidad y han sido calibradas con láseres estabilizados al Yodo.

La incertidumbre calculada para error Instrumental (E_{Inst}) con datos de la figura 4 se estima partiendo de la ecuación siguiente la cual representa el modelo de medición de las diferencias medidas

$$E_{Inst} = \frac{m_{hp}\lambda_{hp1}}{n_{hp}} - \frac{m_c\lambda_{hp2}}{n_c} - edp \quad (1)$$

donde:

- m_{hp} Número de franjas leídas por la electrónica del sistema Interferométrico hp.
- λ_{hp1} Longitud de onda de la fuente láser hp1
- n_{hp} Índice de refracción del aire calculado con instrumentación patrón
- m_c Número de franjas leídas por la electrónica del sistema Interferométrico hp.
- λ_{hp2} Longitud de onda de la fuente láser hp2

n_c Índice de refracción del aire calculado el módulo de compensación ambiental hecho en CENAM

edp Error por camino muerto (dead path)

Y la incertidumbre finalmente queda:

$$\pm (0.14 + 1.07 * L) \mu\text{m con } L \text{ en metros}$$

Esta incertidumbre ha sido calculada con la ec. 1 para un factor de cobertura $k=2$; en donde las principales fuentes de incertidumbre consideradas para el análisis son temperatura de material en 0.05 °C para comparación de temperatura en bloque igualador, el índice de refracción del aire, con incertidumbre en presión de 50 Pa, humedad relativa 10 % y temperatura de aire 0.15 °C, así como la alineación entre los haces con incertidumbre de 150 μm de cateto en 5500 mm. La sincronización de disparo automático para la toma de datos impacta a través de la repetibilidad de la medición.

4. CONCLUSIONES

El sistema interferométrico desarrollado ha mostrado un desempeño robusto en la medición de fase para las señales heterodinas así como en la compensación ambiental para cálculo del índice de refracción del aire como se puede apreciar en la figura 4 ya que su error máximo fue de tan solo 1 μm en 5.5 metros; sin embargo para alcanzar velocidad de medición de hasta 1 m/s es necesario el uso de cabezas láser heterodinas con frecuencia intermodal de 15 MHz o mayor.

La portabilidad del sistema para mediciones en campo es muy adecuada usando la comunicación inalámbrica propuesta y es compatible con los componentes ópticos disponibles comercialmente. La resolución y reproducibilidad alcanzadas, son adecuadas para mediciones cuyo requerimiento de incertidumbre se encuentre en las décimas de micrómetro.

Las ventajas de tener un sistema interferométrico totalmente desarrollado en CENAM es el control y conocimiento total de los parámetros de medición de longitud y el bajo costo con respecto a interferómetros comerciales; el primer punto es el más importante ya que la evaluación de incertidumbre se realiza con la certeza que da el conocimiento de todas las variables que participan

en una medición con interferómetro y elimina la necesidad de tratar el sistema como caja negra.

El sistema de medición de variables ambientales es susceptible de mejoras entre ellas la sustitución de la resistencia de platino PT1000 por una resistencia PT100 para hacerlo menos sensible a las variaciones de tensión o corriente en el circuito; también puede ser conveniente extender el intervalo de medición de 0 a 30 °C para realizar su calibración directamente con celdas de puntos fijos, con lo que se alcanzaría menor incertidumbre de medición en temperatura.



Figura 5.- Sistema interferométrico desarrollado, mostrando los módulos de conteo e interpolación, compensación ambiental, fuente láser y programa de medición.

REFERENCIAS

- [1] Frank C Demarest, High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics, Meas. Sci. Technol. 9 (1998) 1024–1030
- [2] Información comercial y aplicaciones, <http://www.renishaw.com/en/laser-interferometer-systems--6800>, fecha de consulta Julio 2010
- [3] Oldham et al., Electronic limitations in phase meters for heterodyne interferometry, Prec Eng, 15 (1993).
- [4] Rosenbluth. A. E. and Bobroff, N. "Optical sources of nonlinearity in heterodyne interferometers," Prec Eng, 12 (1990).