

Diseño de interferómetro láser para mediciones longitudinales

Design of Laser Interferometer for Longitudinal Measurements

HUGO ALEXANDER GONZÁLEZ BOCANEGRA*

RESUMEN

En el presente artículo se describe el desarrollo de un proyecto orientado a la física, óptica y electrónica hacia la implementación de un instrumento para medir distancias y velocidades. Su funcionamiento está basado en un interferómetro de desplazamiento lateral con una configuración óptica de dos señales a partir de una fuente de alimentación. Las mediciones realizadas con el instrumento muestran que se pueden medir distancias en un rango de 100 milímetros de acuerdo con la calibración y la implementación del expansor de haz. Además, se pone a la disposición del lector un instrumento orientado a la aplicación de tecnologías alternativas que no se encuentran ligadas a procesos productivos modernos del país como aplicaciones robóticas, avance necesario para poder lograr una mayor tecnificación y de esta manera lograr un desarrollo sostenible que permita el mejoramiento de las condiciones de producción.

Palabras clave: haz, interferencia, interferometría, monocromático, optomecanismos.

ABSTRACT

The present article describes the development of a project oriented towards physics, optics and electronics, and the implementation of an instrument to measure distance and speed. Its operation is based on a lateral movement interferometer with a two-sign optical configuration based on power supply. The measurements performed with the instrument show that distances can be measured in a 100 millimeter range according to its calibration and the implementation of the beam expander. In addition, the reader is presented with an instrument oriented to the application of alternative technologies that are not tied to modern productive processes such as robotic applications, a progress that is necessary to achieve greater technification and a sustainable development that allows the improvement of production conditions.

Keywords: Beam, interference, interferometry, monochromatic, optical mechanisms.

FECHA DE ENVÍO: 22 DE JULIO DEL 2012 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 26 DE NOVIEMBRE DEL 2012

* Profesor vinculado a la Universidad de La Salle. Correo electrónico: hugo.a.gonzalez.b@gmail.com

Introducción

La necesidad actual de estar a la vanguardia en el desarrollo de tecnología exige modernizar los medios de investigación y consecución de equipos que colmen las expectativas técnicas de las diferentes aplicaciones de estudio en los laboratorios experimentales de universidades o en la industria. Las técnicas ópticas no destructivas y sus aplicaciones industriales han cumplido un papel importante dentro de la industria durante los últimos años. Estas técnicas se basan en realizar mediciones sin estar en contacto con los objetos que se van a medir. Estos métodos han perfeccionado aplicaciones tales como la medición y redefinición de un metro patrón, medidas de deformaciones de superficies, determinación de la forma exacta de una superficie, alineación de objetos sobre una línea recta, determinación muy precisa de velocidades o de variaciones en su magnitud y mediciones de vibraciones.

Se plantea, por tanto, un problema basado en la necesidad de aplicar nuevas tecnologías en la parte académica y en el sector industrial: ¿es posible el diseño y la construcción de un sistema interferométrico para la solución de diferentes dificultades en la sociedad industrial y tecnológica? La justificación del desarrollo de un sistema como el planteado parte de la necesidad de realizar una investigación aplicada a las necesidades tecnológicas nacionales, ya que en la actualidad la aplicación de esta tecnología en el sector industrial nacional es casi nula y en la parte académica nacional se llega a algunos trabajos de grado como *Montaje de un modelo experimental de Michelson* presentado en la Universidad Nacional de Colombia y *Construction of a Two-Element Radio Interferometer*, presentado a nivel de investigación física en la Universidad de los Andes de Colombia.

En este trabajo se describe un instrumento óptico de no contacto que teóricamente puede medir más de 10.000 mm; sin embargo, el desarrollo del prototipo se hace solo para un rango de 100 mm a lo largo de una línea recta. Consideremos que es un instrumento ideal para realizar mediciones donde se requiere una precisión en el orden de las centésimas de milímetro, contando con una exactitud muy alta así como una alta eficiencia del trabajo, por lo que es apropiado en aplicaciones como la medición y la alineación para la fabricación de resonadores láser, alineación de cabezales de máquinas de cinco ejes, alineación de máquinas de corte con bancadas superiores a 5 m, cambios de niveles de líquidos, entre otras aplicaciones en las cuales es imposible utilizar técnicas de mediciones tradicionales.

Estado

La interferometría se basa en el fenómeno de la interferencia que podemos producir cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se superponen sobre una pantalla. Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir, que sus diferencias de fase y, por ende, las distancias entre las crestas de ambas ondas deben permanecer constantes con el tiempo (Serway, 2002). Esto es posible solo si la luz de ambas ondas que se interfieren proviene de la misma fuente luminosa. Pero si es únicamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben generarse de alguna manera del mismo haz. Así, a partir de elementos ópticos (espejos, placas y lentes), el haz de luz se puede dividir en dos trayectorias que finalmente se unen para formar las franjas de interferencia. Para medir la longitud de onda (movimiento ondulatorio) de una luz monocromática se utiliza un interferómetro dispuesto de tal forma que un espejo situado en la trayectoria de uno de los haces de luz puede desplazarse una distancia pequeña (que puede medirse con precisión) y varía así la trayectoria óptica del haz. Cuando se desplaza el espejo una distancia igual a la mitad de la longitud de onda de la luz, se produce un ciclo completo de cambios en las franjas de interferencia. Por consiguiente, la longitud de onda se calcula midiendo el número de ciclos que tienen lugar cuando se mueve el espejo una distancia determinada.

Fue Albert Michelson quien diseñó y construyó el primer dispositivo para producir interferencia que se puede aplicar en la medición de pequeñas longitudes o desplazamientos (Hariharan, 2003). El esquema del dispositivo original empleado por Michelson (figura 1) consiste en una fuente monocromática de luz, la cual emite un haz que llega hasta un divisor de haz (espejo semireflectivo, su propiedad principal es reflejar el 50 % de la luz incidente y transmitir el otro 50 %). El haz reflejado (haz 1) llega a un espejo fijo y se refleja nuevamente hacia el divisor de haz para recombinarse con el haz proveniente de un espejo móvil (haz 2), de tal forma que las dos ondas llegarán en diferentes fases, ya que recorren distancias distintas L_1 y L_2 . La distancia L_1 será siempre fija, mientras que L_2 variará dependiendo del movimiento del espejo móvil. Por este motivo, al ser diferente la fase, pero la amplitud y la frecuencia de los haces iguales se producirán franjas o patrones de interferencia, que constan de una serie de franjas (o círculos) brillantes u oscuros, espaciados igualmente entre sí (figura 2).

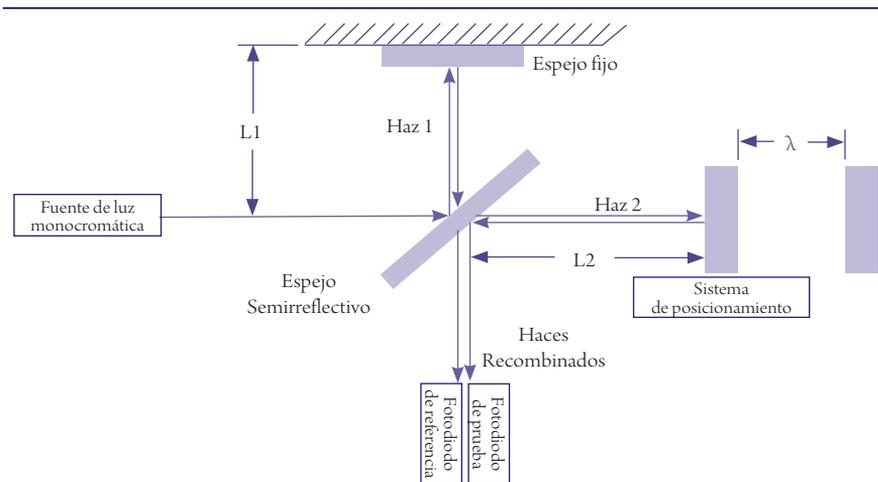


Figura 1. Esquema de un interferómetro de Michelson

Fuente: Martín (1999).

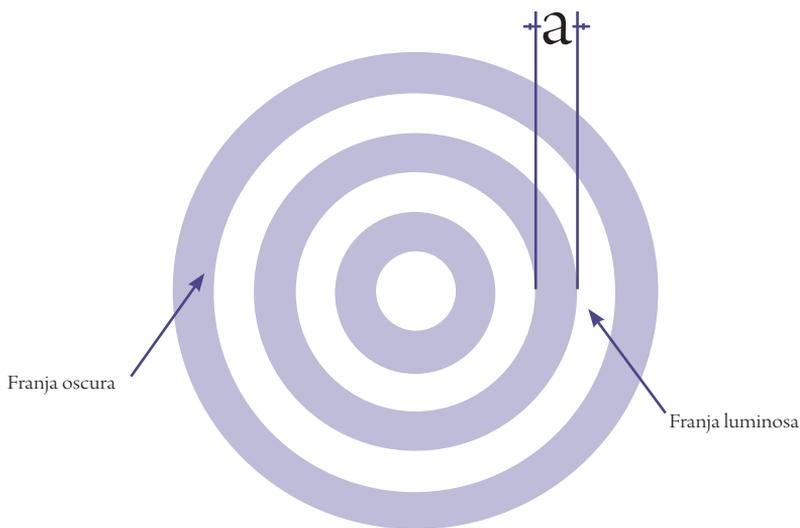


Figura 2. Forma circular de las franjas de interferencia

Fuente: Martín (1999).

Si las distancias L_1 y L_2 son iguales, los haces permanecerán en fase entre ellos y habrá interferencia constructiva. Si el espejo móvil se desplaza una distancia de $\lambda/4$, la diferencia de trayectoria entre los dos haces es de $\lambda/2$, por el recorrido mencionado de ida y vuelta, lo cual corresponde a media longitud de onda, es decir, 180° ,

con lo cual habrá interferencia destructiva. Si el espejo se vuelve a desplazar $\lambda/4$, de nuevo la diferencia es de $\lambda/2$ y el haz avanzará otros 180° , con lo cual se produce de nuevo interferencia constructiva. Esto quiere decir que cuando el espejo móvil avanza un ciclo de oscuridad-brillante-oscuridad, equivale a una distancia de $\lambda/2$ (Núñez, 1999). Si se utiliza algún medio para contar estos ciclos en las franjas de interferencia, se puede entonces medir la distancia recorrida por el espejo móvil con una resolución de $\lambda/2$ (figura 3).

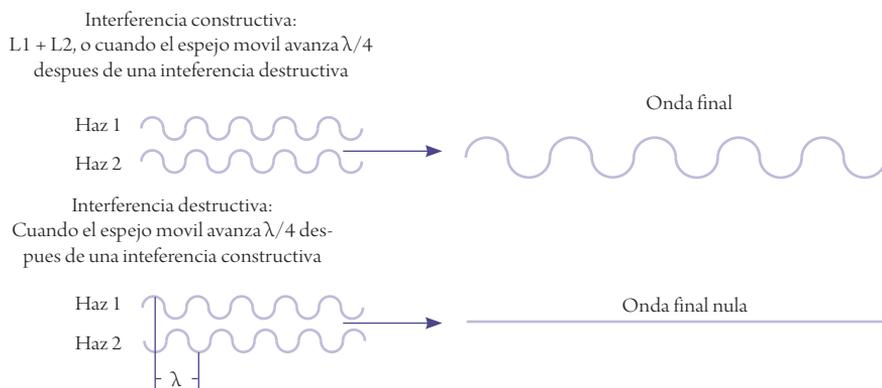


Figura 3. Interferencia constructiva y destructiva en el interferómetro

Fuente: Martín (1999).

Metodología

Configuración óptica del interferómetro

Se ha seleccionado un esquema en el cual se pueda obtener dos señales a partir de una fuente de alimentación; la obtención de estas dos señales (señal de referencia y señal de medición) (Hariharan, 2007).

En la figura 4 se muestra el esquema en el que se logran las dos señales a partir de dos haces que interfieren entre ellos. El sistema inicia con una fuente de alimentación monocromática, la cual proporciona un haz láser original con el 100 % de potencia; este haz pasa por un filtro espacial para reducir las fluctuaciones en la intensidad del haz y un expansor de haz para aumentar el diámetro de un haz de entrada colimado a un haz de salida colimado más grande. Una vez el haz está fil-

trado y expandido, alcanza el punto 1, donde se parte el haz en dos por medio de un divisor de haz. Una vez que se obtengan los dos haces divididos (cada uno con una potencia del 50 % de la potencia original), se enviarán a dos elementos ópticos: el primero denominado “espejo de referencia” o retrorreflectivo fijo cuya función será manejar y proporcionar el haz de referencia; y un segundo elemento óptico denominado “espejo de medición” o retrorreflectivo móvil cuya función es manejar y proporcionar el haz de medición. A diferencia del espejo de referencia, el espejo de medición se estará desplazando sobre el eje de medición del interferómetro.

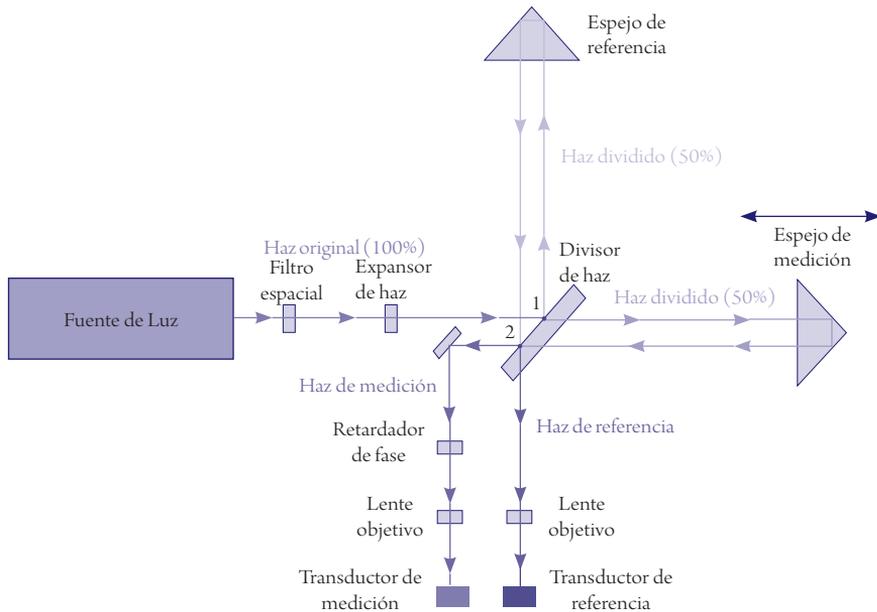


Figura 4. Esquema óptico del interferómetro de dos haces

Fuente: González (2012).

Posteriormente, los haces se hacen rebotar sobre cada uno de los espejos proporcionándoles un pequeño desplazamiento sobre su eje original (para evitar interferencias no pretendidas en el sistema) y se encuentran en el punto 2, donde se forman las dos señales de interferencia. Estas dos señales de interferencia, se envían a dos transductores no sin antes, realizar un desfase a una de estas señales y dirigir las con lentes objetivas hacia el transductor, para consecutivamente ser comparadas y así obtener, por medio de un sistema electrónico, la medida del desplazamiento del espejo de medición.

A diferencia del esquema del interferómetro de Michelson que maneja una sola señal, el esquema del interferómetro seleccionado maneja dos señales con el fin de no solamente identificar la distancia recorrida, sino también identificar el sentido de movimiento del espejo de medición.

Elementos de la configuración óptica

Como se muestra en la figura 4, bajo criterios de diseño (González, 2012) y despliegues de calidad y demanda (YojiAsao, 1996) de cada componente, se han seleccionado los siguientes elementos ópticos:

1. Fuente de láser: Aerotech® LS5P ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$).
2. Pinhole y lentes (filtro espacial): PHG56-228 Edmund® & 2 DCX G47-947 Edmund®.
3. Lentes expansor de haz: DCV G47-936 Edmund® y DCX G63-657 Edmund®.
4. Espejo divisor de haz: G32-781 Edmund®.
5. Retrorreflectivo fijo: T45-297 Edmund®.
6. Retrorreflectivo móvil: T45-297 Edmund®.
7. Espejos: T32-985 Edmund®.
8. Retardador de fase: NT95 - 877 Edmund®.
9. Lentes objetivos: DCX G47-983 Edmund®.
10. Fotodiodos: s6621 Hamamatsu®.

Configuración mecánica del interferómetro

El instrumento se divide en subconjuntos (figura 5) que cumplen funciones asociadas a la medición de desplazamientos con el interferómetro de acuerdo con el

modelo planteado. Los elementos mecánicos están comprendidos por la mesa antivibratoria y los optomecanismos (soportes para cada uno de los elementos ópticos del interferómetro).

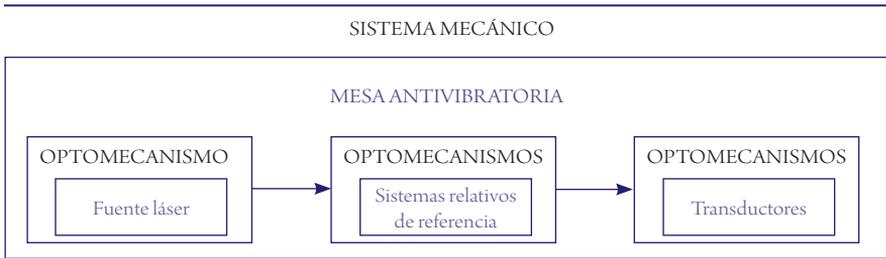


Figura 5. Subconjuntos sistema mecánico

Fuente: González (2012).

Elementos de la configuración mecánica

Bajo criterios de diseño (González, 2012), despliegues de calidad-demanda (YojiA-sao, 1996) y cantidad de grados de libertad de cada componente, se han diseñado y construido (González, 2012) los siguientes optomecanismos:

- a) Fuente láser: tres grados de libertad: 2 rotacionales y 1 traslacional (figura 6)

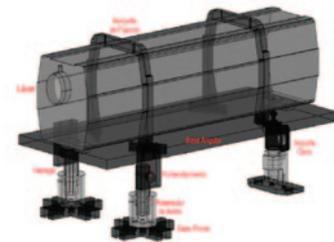
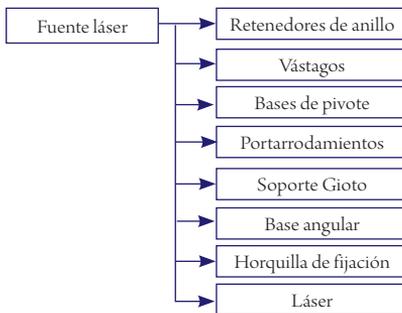


Figura 6. Optomecanismo fuente láser

Fuente: González (2012).

b) Filtro espacial: tres grados de libertad traslacionales (figura 7)

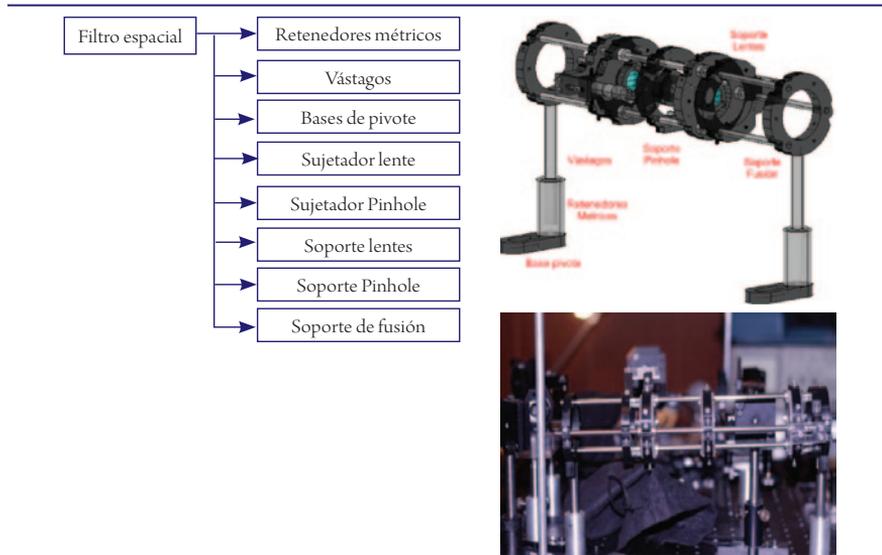


Figura 7. Optomecanismo filtro espacial

Fuente: González (2012).

c) Expansor de haz: un grado de libertad traslacional (figura 8)

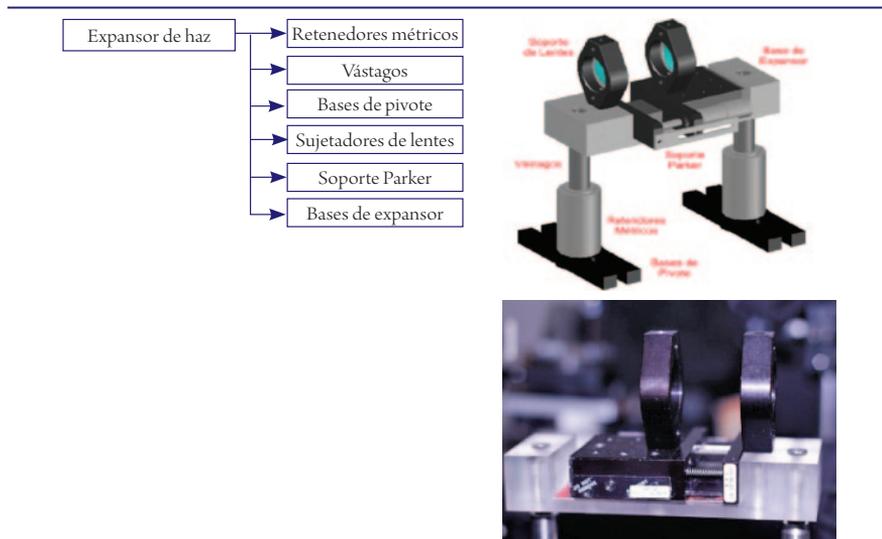


Figura 8. Optomecanismo expansor de haz

Fuente: González (2012).

- d) Divisor de haz: cuatro grados de libertad, tres grados rotacionales y un grado traslacional (figura 9)

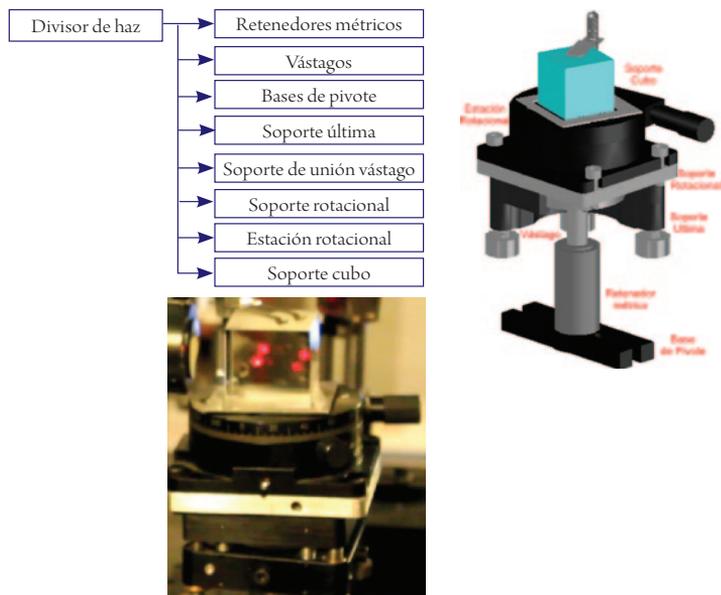


Figura 9. Optomecanismo divisor de haz

Fuente: González (2012).

- e) Espejos: tres grados de libertad, dos grados rotacionales y un grado traslacional (figura 10)

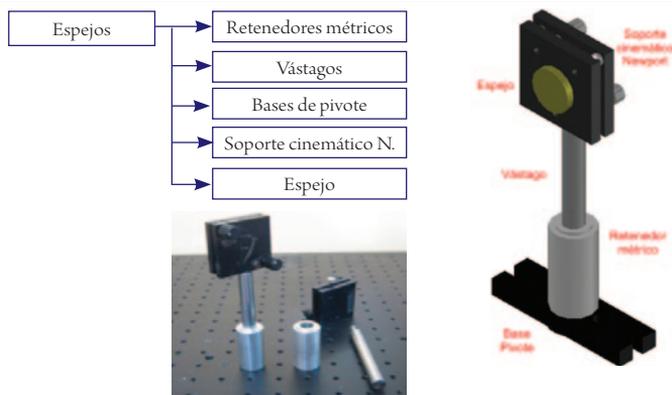


Figura 10. Optomecanismo de espejos

Fuente: González (2012).

f) Retrorreflectivo fijo: tres grados de libertad, dos grados rotacionales y un grado traslacional (figura 11)

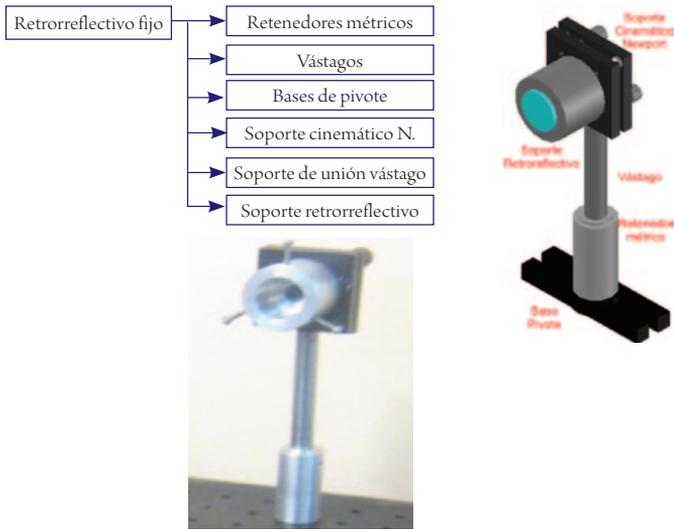


Figura 11. Optomecanismo del retrorreflectivo fijo

Fuente: González (2012).

g) Retrorreflectivo *móvil*: cinco grados de libertad, dos grados rotacionales y tres grados traslacionales (figura 12)

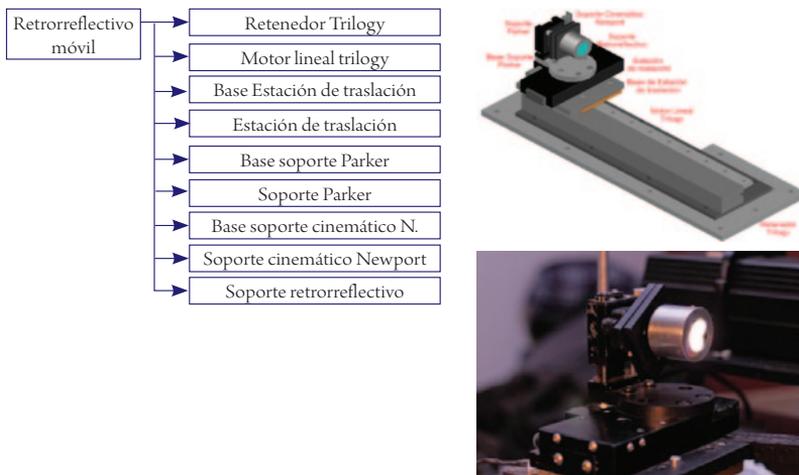


Figura 12. Optomecanismo del retrorreflectivo móvil

Fuente: González (2012).

- h) Retardador de fase: cuatro grados de libertad, tres grados rotacionales y un grado traslacionales (figura 13)

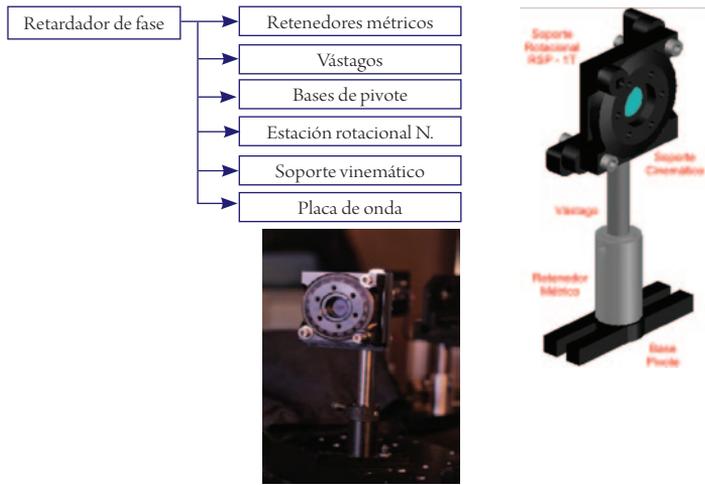


Figura 13. Optomecanismo del retardador de fase

Fuente: González (2012).

- i) Lente objetivo: cuatro grados de libertad, dos grados rotacionales y dos grados traslacionales (figura 14)

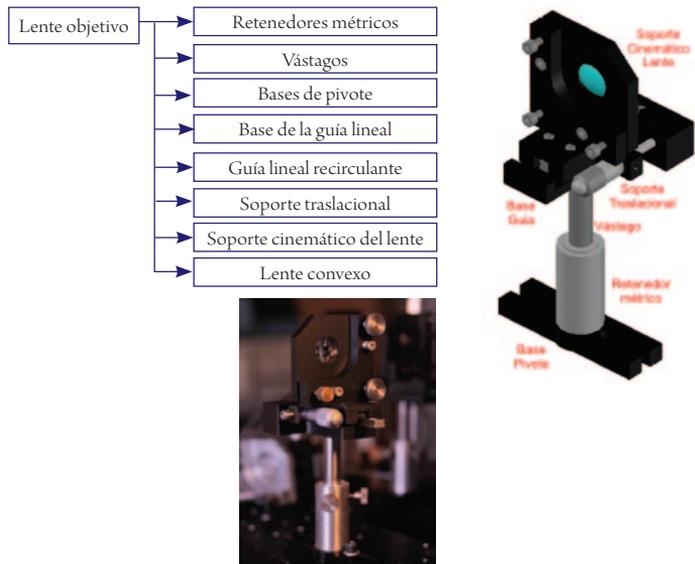


Figura 14. Optomecanismo del lente objetivo

Fuente: González (2012).

- j) Lente objetivo: cuatro grados de libertad, dos grados rotacionales y dos grados traslacionales (figura 15)

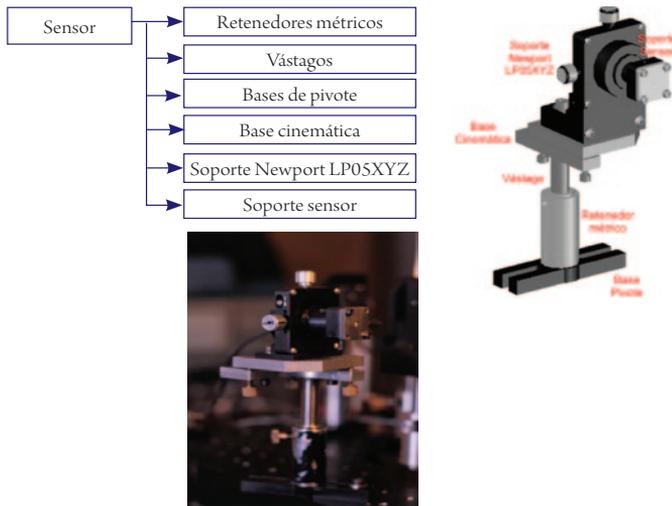


Figura 15. Optomecanismo del sensor

Fuente: González (2012).

Mesa antivibratoria

Bajo despliegues de calidad-demanda (YojiAsao, 1996) se ha diseñado y construido (González, 2012) una mesa antivibratoria que consta de balones neumáticos (*spring ball*), integrados en un marco rígido de acero tubular, ofreciendo una rigidez más alta para eliminar las resonancias en el marco estructural. El sistema además cuenta con una estructura hecha con perfil en IP8, la cual se diseñó con el fin de poder soportar una carga de 1000 lb. Por otro lado el sistema es aislado con una lona antivibratoria para esas vibraciones (Seto, 1989) que no puedan ser absorbidas por la estructura o por los balones neumáticos.

El puesto de trabajo cuenta con una plataforma de trabajo “apanalada”, es decir, con una cuadrícula de agujeros roscados M5 (distancia entre centros de 25 mm), con el propósito de posicionar los diferentes optomecanismos sobre la plataforma. La plataforma está hecha de una aleación de hierro y níquel que, por su escaso coeficiente de dilatación, se emplea para instrumentos de medida y aparatos de precisión (figura 16).

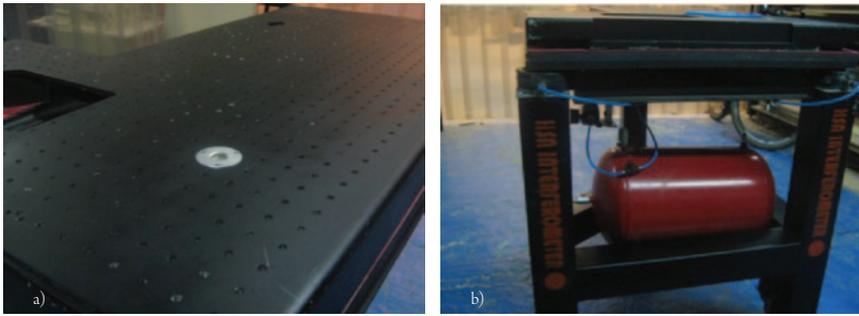


Figura 16. Mesa antivibratoria: a) Plataforma de trabajo aplanada, b) Sistema neumático

Fuente: González (2012).

Calibración del interferómetro

El proceso de calibración del interferómetro láser asegura su trazabilidad con patrones internacionales y expresa en valores numéricos la magnitud de los errores que puedan cometerse al utilizarlo. El ensayo tiene una duración de 12 horas en un ambiente con temperatura y humedad relativa controladas y está basado en un certificado de calibración expedido por el NPL (National Physical Laboratory [Prieto, 2007]).

Debido a la geometría de la mesa antivibratoria, los optomecanismos se ubican como se muestra en la figura 17.

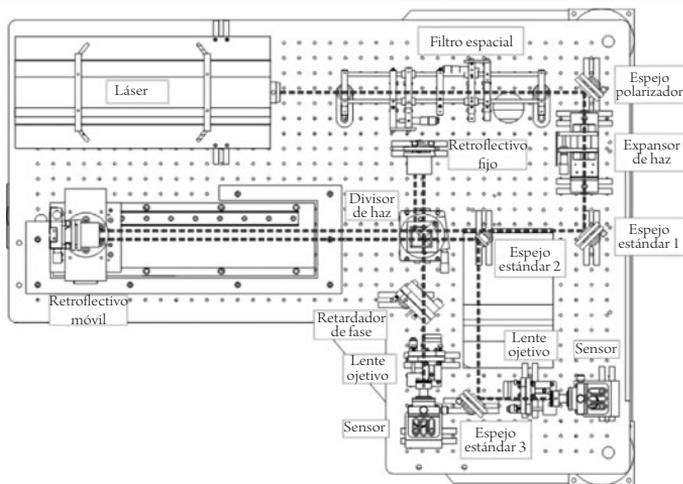


Figura 17. Montaje de optomecanismos en la mesa antivibratoria

Fuente: González (2012).

Configuración electrónica del interferómetro

El diseño del sistema electrónico desarrollado para el interferómetro consiste en fotodiodo de arseniuro de Galio (pin S3321) que permite convertir la luz en una señal eléctrica (González, 2012). Debido a la baja intensidad que suministra este elemento, se hace necesario adaptarla para ser enviada por medio de un cable coaxial desde la estructura mecánica del interferómetro hasta la mesa de trabajo con los circuitos electrónicos de adaptación y el equipo de cómputo (figura 18).

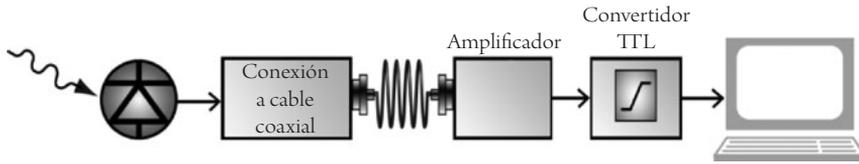


Figura 18. Esquema del sistema electrónico del interferómetro

Fuente: González (2012).

Sistema de detección con fotodiodo

En la longitud de onda del láser ($\lambda = 633\text{nm}$) se producirá una respuesta R de 0,37 A/W considerando que el láser empleado es de 5 mW la corriente máxima apuntando el láser en forma directa en el fotodiodo estaría determinada por la ecuación 1: cálculo de la corriente máxima en el fotodiodo producida por el haz láser.

$$I_p = R \times P_i \quad (1)$$

Donde:

I_p es la corriente en el fotodiodo.

P_i es la potencia de entrada.

Ecuación 2: corriente en el fotodiodo.

$$\begin{aligned} I_p &= 0,005 \times 0,37 \\ I_p &= 0,0018 \text{ A} \end{aligned} \quad (2)$$

Para determinar la corriente máxima que se puede esperar en el fotodiodo hay que tener en cuenta que el láser será dividido para lograr dos haces que llegarán a dos fotodiodos y que los diferentes elementos ópticos producirán pérdidas de intensidad debido a los reflejos producidos por las superficies de estos. Estas pérdidas son determinadas de acuerdo con las especificaciones de los diferentes elementos ópticos suministradas por el fabricante cuyos valores son estimados de acuerdo a los siguientes parámetros (tabla 1):

Tabla 1. Pérdidas de potencia de los elementos ópticos

Pérdidas por superficie en los lentes	< 0,4 %
Pérdidas por reflexión en los espejos	≤ 0,02 %
Pérdidas del divisor de haz y retro reflectores	≤ 0,6 %

Fuente: Edmund (2011).

De acuerdo con el montaje planteado en los capítulos anteriores, la pérdida estimada total es del 5,08 %, teniendo en cuenta este factor de pérdida debido al montaje se puede determinar la ecuación 3: el cálculo de la corriente máxima esperada en cada fotodiodo.

$$I_{ps} = \frac{(I_p - (I_p \times 0,0508))}{2} \quad (3)$$

Donde I_{ps} es la corriente máxima esperada en cada fotodiodo y para este caso, es de $5,26 \times 10^{-4} \text{A}$. La polarización inversa del fotodiodo garantiza, de acuerdo con el fabricante, que este produzca corriente proporcional a la cantidad de luz que incide sobre el área sensible haciendo que se produzca un campo eléctrico más intenso y mejor respuesta en frecuencia; por tanto, el circuito implementado es el de la figura 19.

Teniendo en cuenta el valor I_{ps} de corriente máxima esperada en el fotodiodo, se selecciona la resistencia de protección, la cual se determina en función de lograr el valor de voltaje máximo para este valor, impidiendo que se sature la entrada del circuito de amplificación. Se puede observar en la ecuación 4 el cálculo de la resistencia de protección:

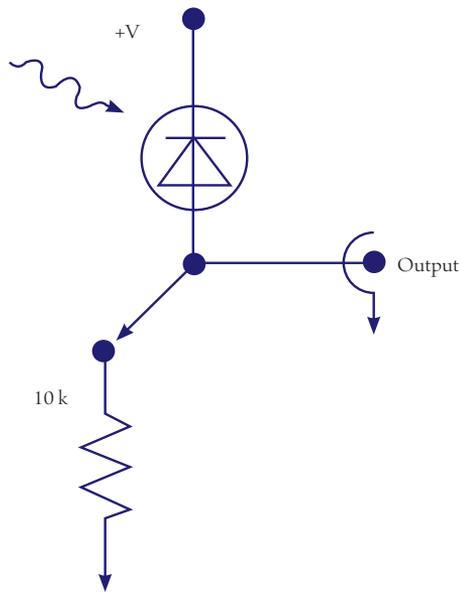


Figura 19. Circuito para el fotodiodo

Fuente: Webster (1999).

$$V = I \times R$$

$$R = \frac{5}{5,26 \times 10^{-4}} = 9505 \text{ Ohms. } (10K\Omega \text{ aprox.}) \quad (4)$$

Circuito de amplificación

El circuito empleado es un amplificador operacional con la configuración de amplificador no inversor determinado por la figura 20. Teniendo en cuenta que el voltaje de referencia V_{ref} es igual a cero:

La ecuación 5 hace el cálculo del voltaje de salida en el circuito de amplificación.

$$V_{out} = V_{in} \times \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \quad (5)$$

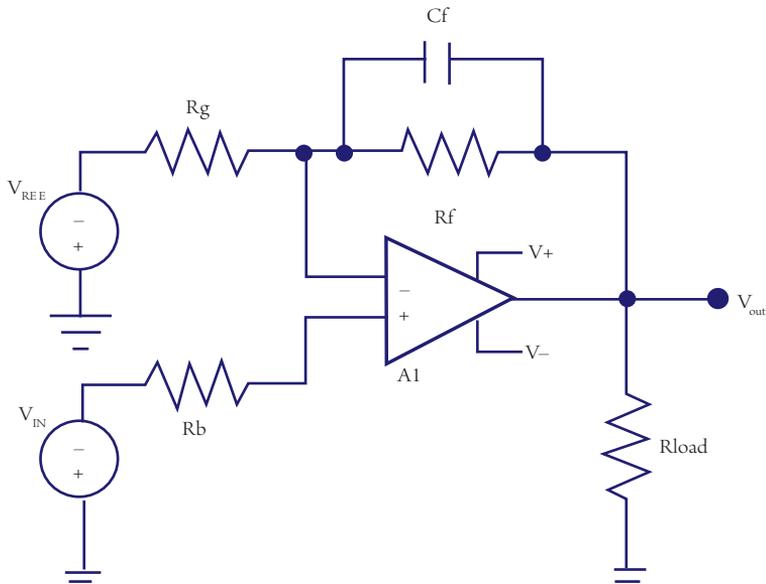


Figura 20. Circuito de amplificación para las señales

Fuente: Savant (2000).

El condensador C_f permite atenuar el ruido a alta frecuencia en razón de $(\frac{1}{2}\pi) \times R_f C_f$; en el caso del interferómetro la frecuencia máxima de trabajo está determinada por la velocidad de desplazamiento del espejo retroreflectivo móvil, teniendo como objetivo desplazar este espejo con una velocidad aproximada a 30 mm/s, la frecuencia de trabajo normal para este circuito es de 189.873 KHz, por tanto su valor es inferior a 5 pf. Para una ganancia de 10 V/V frecuencia de ~200 KHz Entrada de voltaje mínima de 0 V con una fuente de alimentación dual de $\pm 5V$ DC los valores de los componentes son (tabla 2):

Tabla 2. Valores del circuito de amplificación

$R_b (\Omega)$	1000
$R_f (\Omega)$	10000
$R_g (\Omega)$	1
$R_b (\Omega)$	150
Opam	LMH6672

Fuente: Savant (2000).

Convertidor a señal TTL

La última etapa consiste en convertir la señal sinusoidal a una señal cuadrada con el 50 % de ciclo útil, para esto se emplea el driver de línea μ A9638 (figura 21).

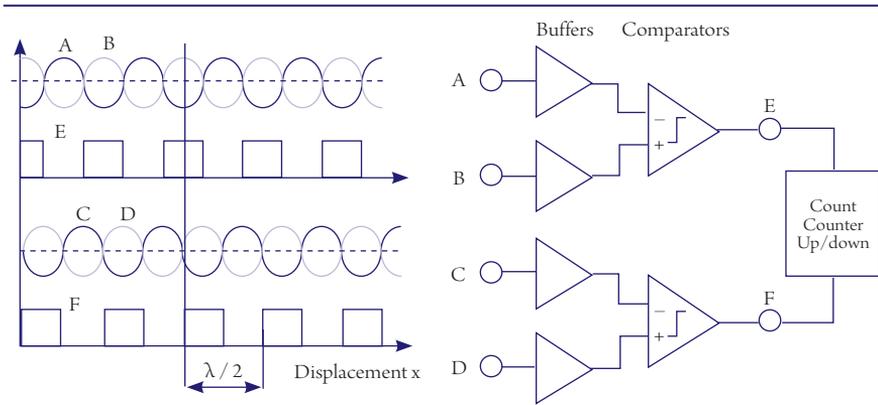


Figura 21. Señales sinusoidales transformadas a señales de cuadradas

Fuente: Donati (2004).

Adquisición de datos

La señal de encoder de cuadratura resultante es equivalente con el encoder que usan los motores como sistema de realimentación que se encuentran comúnmente en automatización. Esto permite el uso de la amplia gama de controladores y tarjetas de adquisición de datos comerciales que se manejan en entornos como LABVIEW[®], MATHLAB[®], además de los propios entornos desarrollados por algunos fabricantes para control de movimiento como GALIL[®] y AEROTECH[®], entre otros. El A3200 de AEROTECH[®] (1994) es la que se empleó para hacer las primeras pruebas de medición de desplazamientos del interferómetro por razones de disponibilidad y presupuesto.

La interfaz que se muestra en las imágenes de la figura 24 muestra las lecturas de desplazamientos correspondientes del interferómetro con una gráfica de desplazamiento que puede ser grabada para un análisis posterior. Siendo la distancia recorrida por el espejo retroreflector móvil la única variable registrada.

Análisis de resultados

Durante las pruebas realizadas con el interferómetro calibrado, se obtuvieron los siguientes resultados (figura 22):

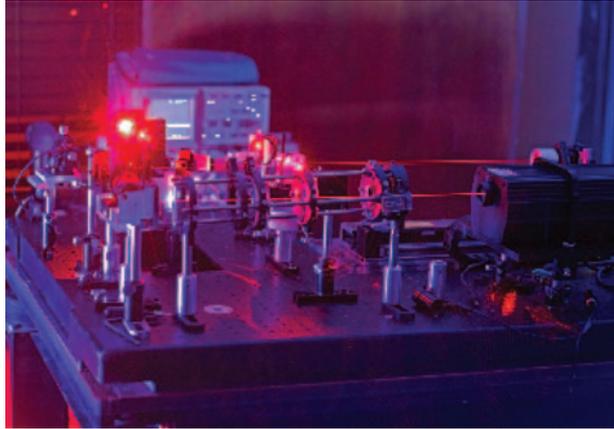


Figura 22. Montaje del interferómetro

Fuente: González (2012).

Medición de velocidad

La prueba más satisfactoria efectuada en todo el proceso de construcción del interferómetro se ejecutó haciendo que el motor alcanzara una velocidad de 100 mm/s para anular al máximo la vibración del motor Trilogy Parker® y poder registrar una imagen clara de la señal por un corto periodo (inferior a un segundo). Esta prueba se realizó a lo largo de una longitud de 200 mm (figura 23).

Como se muestra en la figura 23, cada campo de la cuadrícula equivale a dos microsegundos; por ende, la distancia entre picos de la señal es de 1,7 cuadrículas, lo que corresponde a 3,4 microsegundos y que igualmente equivalen a una frecuencia de 294.118 KHz.

Si la longitud de onda es de 632,8 nm y la interferencia es generada cada $\frac{1}{2}$ longitud de onda, la cantidad de crestas resultantes por milímetro es de 3160, dividiendo

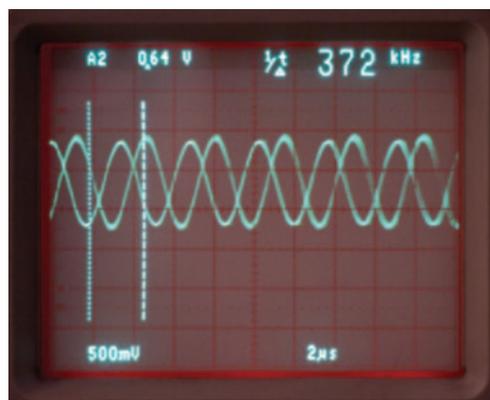


Figura 23. Señales sinusoidales interferométricas

Fuente: González (2012).

este valor entre la frecuencia medida, el resultado será la velocidad en milímetros por segundo, resultando un valor de 93,08 mm/s. Es decir, el motor no alcanzó la velocidad requerida de 100 mm/s que se le pidió.

Si bien en esta prueba el objetivo era lograr medir la velocidad del espejo retrorreflexivo móvil por medio del interferómetro, hay que tener en cuenta que el método de adquisición de la información fue de manera directa en el osciloscopio y registrada con una cámara fotográfica, debido a que no se dispone de un sistema de adquisición de datos en tiempo real, con el cual se podría observar la aceleración, las variaciones de velocidad y vibraciones a las que realmente fue sometido el espejo retrorreflexivo durante la prueba.

Medición de desplazamiento

Mediante el empleo del controlador de marca Aerotech® A3200, se permite hacer la lectura de una señal de encoder por cuadratura y sinusoidal a una frecuencia máxima de 40 MHz; se puede, de igual manera, verificar el desplazamiento manual del retrorreflexivo móvil, para luego ser comparado con medidas manuales (calibrador digital, flexómetro, etc.). La prueba es mostrada en la figura 24.

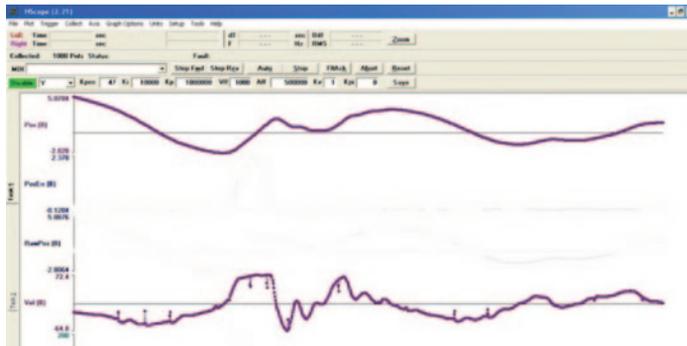
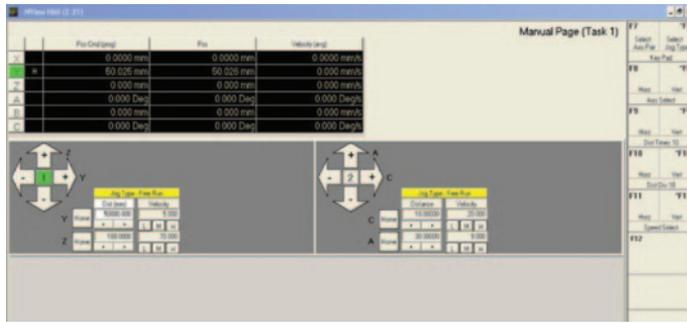


Figura 24. Correspondencia en conteos con las franjas de interferencia

Fuente: González (2012).

Conclusiones

Del presente proyecto se desprenden varias conclusiones, estas se pueden clasificarse según el aspecto al que se atienda: metrológico, de innovación, de ingeniería, de alcance (nacional, internacional), entre otras.

En lo que se refiere a los aspectos metrológicos, con el planteamiento realizado, se aplicaron técnicas que se sustentan en la realización de mediciones sin estar en contacto físico con los objetos que se van a medir, fundamentando principios metrológicos. Asimismo, como en la selección de los elementos idóneos para alcanzar el objetivo general de este proyecto; sin estos no habría valido la pena intentar el desarrollo del presente prototipo, tampoco las modificaciones que ha ido sufriendo a lo largo de este dilatado periodo, todas tendentes a hacerlo más versátil y a mejorar sus capacidades de medición.

Como aspecto innovador este prototipo permite ser utilizado en aplicaciones en las que los desarrollos anteriores conocidos no podían hacerlo, ya que el prototipo creado tiene un rango de medición y frecuencia de 20 MHz que presta para más aplicaciones y montajes, además de permitir integrarlo a sistemas de adquisición de datos comerciales. Asimismo, se muestra que es posible en el país implementar métodos más exactos y directos que aseguren la calidad mediante la calibración de maquinaria industrial, mejorando así las tolerancias de fabricación y disminuyendo el porcentaje de productos no conformes de las empresas que en este momento se encuentran en proceso de certificación bajo lineamiento de las normas ISO 9000 (NTC-ISO 90-00, 2005).

Los aspectos de innovación llevan consigo un *know-how* por cuanto, a diferencia del caso de transferencia de tecnología externa, todo el proceso de desarrollo, desde el diseño hasta la implantación, pasando por la de fabricación e instalación de componentes, es de realización totalmente nacional. Aunque lógicamente algunos de los componentes son equipos e instrumentos adquiridos en el exterior, ello no desvirtúa el hecho señalado, ya que el conocimiento, en sentido amplio, incluye también el saber qué equipos son necesarios y dónde conseguirlos, para lograr los fines y objetivos propuestos.

El desarrollo de este interferómetro es consecuente con el desarrollo tecnológico actual sin limitarse por la tecnología disponible en el país, ya que una herramienta de este tipo no tiene la suficiente importancia en nuestro entorno industrial pero con la llegada de maquinaria más moderna o inclusive si pensamos en el desarrollo de maquinaria nacional que compita con la tecnología importada, se hace necesaria una herramienta de esta naturaleza en sus diferentes aplicaciones.

Por otro lado, a partir de estos resultados, podemos concluir que el interferómetro de dos haces construido permite efectivamente conocer el desplazamiento y la dirección del espejo retroreflectivo. Asimismo, determinar la vibración de un motor lineal, con una certeza que no puede ser alcanzada por un acelerómetro, debido a que se pudo observar la magnitud del desplazamiento mecánico ($4 \mu\text{m}$) (González, 2012), la cual no es fácil de medir con un acelerómetro. El interferómetro permite ser utilizado como herramienta de análisis de estudios aplicados al movimiento de objetos; una aplicación tan versátil que puede ser utilizada para la caracterización del movimiento controlado de motores, como en este caso, un motor lineal Trilogy de marca Parker®.

Para finalizar, el interferómetro fabricado demuestra que es posible desarrollar proyectos con la suficiente robustez que permita su continuidad, tomándolo como base para trabajar en proyectos nuevos o hacer mejoras sin tener que repetir el trabajo ya realizado. Con la metodología utilizada en el desarrollo del proyecto, se concluye que si se tiene un fin específico para este instrumento, debe involucrarse en un proceso de mejoramiento continuo para aumentar las características de desempeño del instrumento, a fin de hacerlo comercial.

Referencias

- AEROTECH Catalog (1994). *Laser Interferometer Linear Displacement Measuring System*, Aerotech, Electro-Optical division. Utah: Aerotech, Inc.
- Donati, S. (2004). *Electro-optical instrumentation*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Edmund Catalog (2011). *Optics, Edmund, Optical division*. Nueva Jersey: Edmund optics, Inc.
- Icontec (2005). Norma Técnica Colombiana, NTC ISO 9000, Primera actualización.
- González, H. (2012). *Diseño de interferómetro láser para mediciones longitudinales*. Bogotá: Pregrado de Ingeniería de Diseño y Automatización Electrónica, Universidad de La Salle.
- Hall, A. (1989). *Diseño de máquinas* (2^{da}. ed.). México: McGraw-Hill.
- Hamamatsu Catalog (2011). *Si₃N₄ photodiode*. Tokio: Hamamatsu, Inc.
- Hariharan, P. (2003). *Optical interferometry* (2^{da}. ed.). Sidney: Elsevier.
- Hariharan, P. (2007). *Basics of interferometry* (2^{da}. ed.). Sidney: Elsevier.
- Martín, J. (1999). *Montaje de un modelo experimental de Michelson*. Bogotá: Pregrado de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia.
- Núñez, A. (1999). Medidor de distancias con referencia interferométrica. *Revista Mexicana de Física*, 56(1), 74-79.
- Prieto, E. (2007). *Desarrollo de un comparador interferométrico universal para la calibración de patrones materializados de longitud* [tesis doctoral en ingeniería]. Madrid: Ingeniería Industrial ICAI, Universidad Politécnica de Madrid.
- Savant, J. (2000). *Diseño electrónico* (2^{da}. ed.). Ciudad de México: Pearson Educación.
- Seto, W. (1989). *Vibraciones mecánicas* (2^{da}. ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill.
- UNE 82009-1 (2000). Norma técnica española. *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición - Parte 1: Principios generales y definiciones*.
- Webster, J. (1999). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook*. Nueva York: CRC Press LLC.
- YojiAsao, A. (1996). *Despliegue de funciones de calidad*. Tokio: Production.