



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA– MECATRÓNICA

INTEGRACIÓN DE UN INTERFERÓMETRO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
MICRODESPLAZAMIENTOS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ CARLOS BARRERA OVIEDO

TUTOR PRINCIPAL
ALBERTO CABALLERO RUÍZ,
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Leopoldo Ruíz Huerta

Secretario: Dr. Alejandro Farah Simón

Vocal: Dr. Alberto Caballero Ruíz

1^{er}. Suplente: Dr. José Sánchez Vizcaíno

2^{d o}. Suplente: M.I. Sergio Padilla Olvera

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO,
C.U.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Caballero Ruíz.

FIRMA

Este trabajo se desarrolló en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Alberto Caballero Ruíz del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica. Este proyecto fue sustentado por los proyectos CONACT-LAB-2014-01-232719, CONACyT-INFR-2014-02-2305199 y UNAM-PAPIME PE103214.

Agradecimientos.

Al Dr. Alberto Caballero R. y al Dr. Leopoldo Ruíz H., por todo su tiempo, paciencia, consejos, bromas y experiencias compartidas.

Al M.I. Sergio Padilla O. y al Dr. José Sánchez V., por las facilidades para usar el laboratorio de metrología y su equipo de interferferometría, por su asesoría y tiempo.

A la Dra. Celia A. Sánchez P., por facilitar la fuente láser con la que se realizó el desarrollo entero de este trabajo.

Al M.C. Mario González, por su tiempo, asesoría y las facilidades para usar el laboratorio de óptica para las pruebas de caracterización de películas polarizadoras.

A mi familia por todo su apoyo.

A Daniela, por tu comprensión, gran cariño y apoyo, gracias por aguantarme.

Índice

Agradecimientos.	4
Introducción.	6
Capítulo 1. Antecedentes.	7
1.1 Medición de desplazamientos.	7
1.2 Desarrollos en interferometría.	12
1.2.1 Sistemas comerciales.	12
1.2.2 Sistemas de interferometría desarrollados para investigación.....	16
1.2.3 Desarrollo del GMM.	19
Capítulo 2. Planteamiento del problema.	21
2.1 Planteamiento del problema.	21
2.2 Hipótesis	24
2.3 Objetivo	24
2.4 Alcances.	25
2.5 Metodología.	25
Capítulo 3. Marco teórico.	26
3.1 Fenómenos ondulatorios, interferencia e interferometría.	28
3.2 El interferómetro de Michelson.	30
3.2.1 Sistema con detección homodina.....	32
3.3 Polarización de la luz.	34
3.4 Efecto fotoeléctrico.	38
Capítulo 4. Diseño, fabricación e integración de un interferómetro tipo Michelson.	40
4.1 Sistema Optomecánico.	42
4.2 Cuadratura de las señales.	62
4.3 Sistema Electrónico.	65
4.3.1 Detección.	65
4.3.2 Acondicionamiento de señales.....	69
4.3.3 Conteo de franjas.....	70
4.3.4 Procesamiento de datos.	73
4.3.5 Integración del sistema electrónico.....	74
4.4 Interfaz de usuario computacional.	75
Capítulo 5. Pruebas de caracterización y resultados.	76
5.1 Ensayos de caracterización.	77
5.2 Conclusiones	100
5.3 Trabajo futuro	102
Bibliografía	103

Introducción.

Medir es una necesidad al estudiar la naturaleza. Conocer la magnitud de las variables involucradas en un fenómeno permite comprender su comportamiento, controlarlo y posiblemente aprovecharlo para obtener algún beneficio.

La manera más sencilla de realizar una medición es mediante la comparación directa del fenómeno con un instrumento *patrón*, para ello se utilizan objetos e instrumentos como un flexómetro, un termómetro, un cronómetro, etc. La medición indirecta consiste en apoyarse de fenómenos asociados a la magnitud de interés, los instrumentos para mediciones indirectas son generalmente de mayor complejidad, más aún cuando se requiere realizar mediciones de alta exactitud y/o velocidad; son de particular interés para este trabajo los instrumentos que usan el principio de la interferencia de la luz para medir distancias y desplazamientos.

Este documento, reporta el trabajo realizado en el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica, del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México en materia de interferometría aplicada a la medición de desplazamientos lineales, el cuál por las características de su diseño, fabricación y costo, representa una opción ideal para la educación comparada con un sistema comercial moderno.

En el primer capítulo se presenta un breve compendio de técnicas para medir desplazamientos destacando la interferometría por su alta resolución y confiabilidad para realizar mediciones, se presentan equipos de interferometría comerciales y no comerciales para establecer un panorama del estado actual de la interferometría finalizando con el desarrollo realizado en 2011 por el GMM.

En el segundo capítulo, se plantea el problema del trabajo basado en la inspección del prototipo 2011, se proponen los objetivos y alcances que se desearon cubrir con este trabajo, así como la metodología empleada.

En el tercer capítulo se presentan los fundamentos teóricos del fenómeno de interferencia, así como del fenómeno fotoeléctrico que han permitido el desarrollo de equipos de medición basados en interferometría.

En el cuarto capítulo se describe el trabajo realizado para el nuevo interferómetro prototipo del GMM que incluye el diseño de un sistema de soportes para los dispositivos ópticos, la búsqueda de cuadratura en las señales de interferencia, el desarrollo de un sistema electrónico y la integración del prototipo.

En el quinto capítulo se describen los ensayos para la caracterización del sistema así como los resultados obtenidos, las conclusiones y el trabajo a futuro.

Capítulo 1. Antecedentes

En este capítulo se presenta una breve revisión de las formas en las que se pueden determinar desplazamientos, enfocándose en las técnicas de interferometría óptica que conciernen a este trabajo; se presenta también un panorama actual con algunos ejemplos de sistemas industriales de alto desempeño diseñados para satisfacer las necesidades de medición de desplazamientos en la industria y algunos más desarrollados en laboratorios, institutos y universidades orientados a la aplicación e investigación de las técnicas de interferometría.

1.1 Medición de desplazamientos.

La medición de desplazamientos lineales y angulares es un requerimiento básico en todos los instrumentos, máquinas e instalaciones donde la posición debe ser monitoreada o controlada. La medición de un desplazamiento consiste en determinar el cambio de posición de una referencia sobre una escala. A través del tiempo se han utilizado instrumentos sencillos como reglas y discos graduados con indicadores, sin embargo éstos no cubrían las necesidades de precisión, exactitud y automatización que la industria requería, por lo que se desarrollaron algunos instrumentos como los transductores electromecánicos que modifican la magnitud de una variable eléctrica de manera análoga a los desplazamientos mediante un acople mecánico, la resistencia eléctrica, la capacitancia y la inductancia son ejemplos de los principios con los que operan estos instrumentos; un transductor de resistencia y uno de capacitancia se muestran en la Figura 1.1 .

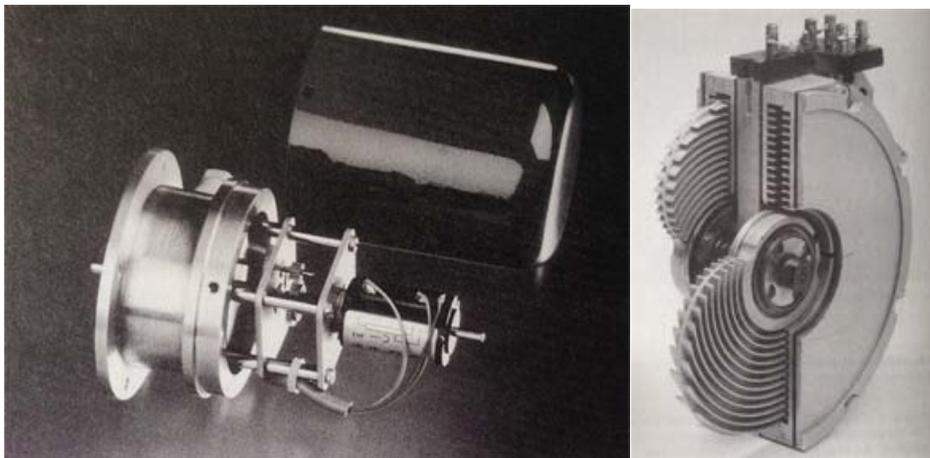


Figura 1 . 1 Potenciómetro y capacitor variable (Walcher, 1994)

Los transductores basados en efectos resistivos tienen el rango de respuesta lineal más amplio mientras que los capacitivos ofrecen flexibilidad en la forma de la señal de respuesta, en todos los casos sin importar la variable eléctrica, los transductores pueden acoplarse directamente a los ejes de transmisión de desplazamiento de las máquinas, lo que los hizo muy populares en el sector industrial.

Hasta la década de los 60 se usaron sistemas electrónicos analógicos para detectar los cambios de las variables eléctricas, procesarlas y traducirlas en información sobre los desplazamientos. Esta técnica supone una resolución infinita y una lectura en tiempo real, sin embargo era poco accesible debido a su alto costo. A partir de los años 70, los sistemas electrónicos digitales comenzaron a sustituir a los analógicos debido a su menor costo, precisión y flexibilidad. El uso de sistemas de procesamiento digital requirió una modificación en las señales de respuesta de los transductores conocida como digitalización. En términos prácticos la digitalización se realiza estimando la intensidad de una señal cada determinado tiempo, esto implica una menor resolución y tiempos de respuesta más largos que sus contrapartes analógicas; la Figura 1.2 muestra el concepto básico de la digitalización de una señal analógica.

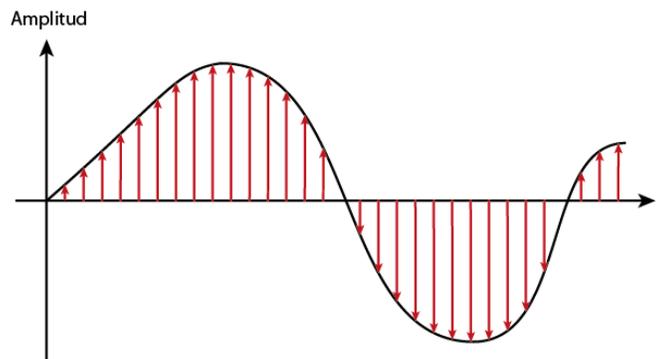


Figura 1 . 2 Concepto de digitalización de una señal analógica.

Una alternativa a la digitalización de las señales analógicas es la implementación de transductores con salidas digitales y la división del espacio de medición en partes iguales, con tal propósito se han utilizado regletas o discos graduados fabricados de manera que pueden representar dos estados diferentes.

Existen dos escuelas de pensamiento para determinar desplazamientos con esta tecnología, por un lado el sistema incremental que utiliza una regleta con estados intercalados como los de la Figura 1.3a, en el cual se realiza un conteo de los cambios de estado, sin embargo es imposible conocer el sentido del desplazamiento hasta que se agrega una segunda regleta desfasada como la que se muestra en la Figura 3b que otorga a cada sentido una secuencia diferente y además duplica la resolución. El sistema absoluto utiliza una regleta codificada como la que se muestra en la Figura 1.3c, la cual otorga a cada posición una

identidad única, la posición se lee directamente y el sentido de desplazamiento está implícito, los códigos más populares son el binario y el Grey, sin embargo existen otros y son seleccionados arbitrariamente.

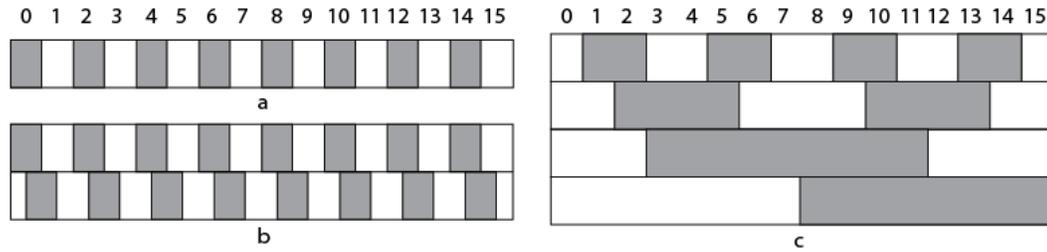


Figura 1 . 3 a) Regleta incremental, b) Regleta incremental con cuadratura, c) Regleta absoluta en código Grey

El sistema absoluto está exento de problemas como conteos en falso y puede determinar la posición aún después de un fallo en el suministro de energía, cosa que el sistema incremental no es capaz de hacer; sin embargo con el incremental es posible establecer el inicio de medición en cualquier posición con una infraestructura más sencilla y económica, esto lo hace el más socorrido en la actualidad.

La relativa simplicidad de la tecnología de regletas codificadas, trajo consigo una variedad de principios de operación para fabricar encoders lineales y angulares que se ajustaran a las condiciones particulares de diversas aplicaciones, el campo magnético, la transparencia y el color son algunos ejemplos, hoy en día los sistemas basados en detección de transparencia usando efectos fotoeléctricos son los dominantes en la industria, debido a que son eficientes, robustos y económicos; en la Figura 1.4 se ilustran ejemplos de estos dispositivos.



Figura 1 . 4 Encoder lineal relativo Renishaw y encoder angular US Digital

Una manera distinta para determinar desplazamientos consiste en medir cuánto tiempo le toma a un pulso de energía recorrer una distancia, conociendo de antemano la velocidad de propagación del pulso es posible determinar la distancia con una sencilla multiplicación; dependiendo de la aplicación es posible utilizar energía electromagnética, acústica o luminosa; algunos ejemplos son el ecosonar, el radar y equipos de medición ultrasónicos, por radio y láser.

En el caso más sencillo, esta técnica necesita un emisor, un receptor y equipo para medir el tiempo; en otros casos, el pulso es rebotado con la ayuda de un reflector o del propio objeto en movimiento mientras que el emisor y receptor se localizan en el mismo dispositivo como se observa en el esquema de la Figura 1.5.

Las limitantes de ésta técnica son el rango de medición y la velocidad de respuesta en el caso de un esquema de reflexión.

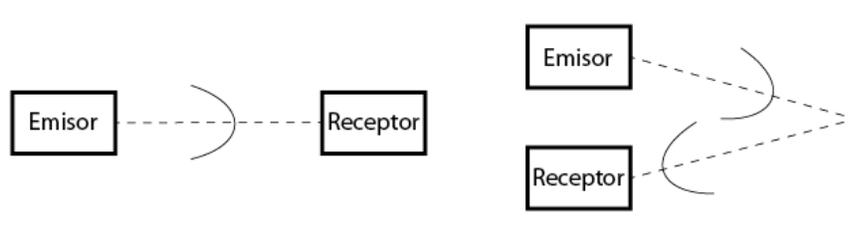


Figura 1 . 5 Medición de distancia por retardo de pulso

La interferometría es una técnica que ofrece una alta exactitud y una gran sensibilidad para la medición de desplazamientos, se aprovecha del principio de interferencia de la luz al dividir un haz de luz monocromático en dos, una de las porciones es dirigida hacia un reflector que se desplaza junto con el objeto en movimiento mientras la otra porción es reflejada a una distancia permanente, ambas reflexiones son recombinadas para crear un patrón de luz y sombra que es posible asociar con una fracción de la longitud de onda del haz de luz utilizada. La interferometría es usada para realizar mediciones e incluso para calibrar otros instrumentos de medición como máquinas herramienta y máquinas de medición por coordenadas; con ella es posible medir desplazamientos lineales, angulares, así como determinar planitud, rectitud y ortogonalidad; en la Figura 1.6 se muestra el arreglo para un interferómetro tipo Michelson, donde se conoce a la trayectoria del espejo fijo como brazo de referencia y a la del espejo móvil como brazo de medición.

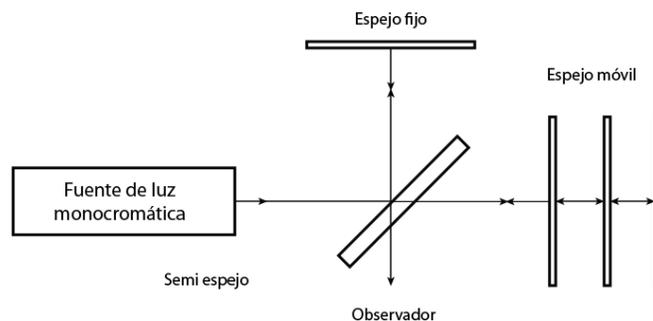


Figura 1 . 6 Interferómetro de Michelson, fuente de luz y espejos para generar interferencia

Existen dos maneras para detectar desplazamientos usando interferometría, la primera es la detección homodina, que está basada en el arreglo utilizado por Albert Michelson en sus experimentos para detectar el éter luminífero; la interferencia de los haces crea un patrón de luz y sombras conocidas como franjas, las cuales se pueden cuantificar como se hace con un encoder incremental, en la configuración básica las franjas equivalen a $\frac{1}{2}$ de la longitud de onda de la luz pero es posible incrementar la resolución con métodos ópticos y electrónicos.

El segunda manera es con la detección heterodina. Ésta requiere una fuente de luz de doble frecuencia y un arreglo tipo Michelson, una vez que los haces se interfieren, equipo electrónico mide la diferencia entre la frecuencia del haz interferido y la frecuencia de referencia atendiendo al efecto Doppler.

En la Tabla 1.1 se observa una comparación de algunas tecnologías utilizadas para la medición de desplazamientos lineales recopiladas en (Uchino & Ginniewicz, 2003), por otra parte, en (Zygo Co., 1999) se menciona que en el año de 1996 la tecnología de interferometría alcanzó una sensibilidad de 3×10^{-10} metros con una respuesta cercana a 1 MHz.

Tabla 1 . 1 Comparación de métodos para la medición de desplazamientos (Uchino & Ginniewicz, 2003)

Principio	Método	Sensibilidad	Respuesta
Resistencia	Celda de carga		
	Metal	$\Delta l/l = 10^{-6}$	10 MHz
	Semiconductor	$\Delta l/l = 10^{-8}$	10 MHz
Potenciómetro	Contacto	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	100 kHz
	No contacto	$\Delta l = 10^{-3} \mu\text{m}$	1 kHz
Inducción Electromagnética	Transformador diferencial	AC	$\Delta l = 10^{-2} \mu\text{m}$
		DC	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$
	Corriente de Eddy	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	50 Hz
Óptica	Comparador óptico	$\Delta l = 10^{-1} \mu\text{m}$	1 kHz
	Fibra óptica	$\Delta l = 10^{-2} \mu\text{m}$	100 kHz

1.2 Desarrollos en interferometría.

En nuestros días, la interferometría se ha visto beneficiada con la calidad de los elementos ópticos y la velocidad de procesamiento de los dispositivos electrónicos y computacionales; pues la resolución se ha incrementado dramáticamente gracias al tratamiento de señales y los algoritmos de interpolación, mientras que la calidad de la fabricación del equipo óptico minimiza las pérdidas de energía.

1.2.1 Sistemas comerciales.

Empresas dedicadas al desarrollo de instrumentos ponen a disposición sistemas de medición de desplazamientos lineales y angulares de alto desempeño basados en interferometría. A continuación se mencionan tres ejemplos, de los cuales el primero se encuentra disponible en el laboratorio de metrología del CCADET.

En el año de 1983 Hewlett Packard puso en el mercado sistemas de interferometría orientados a la caracterización de máquinas herramienta y metrología en general; estos equipos poseen una resolución de $0.1 \mu\text{m}$ en desplazamientos lineales utilizando tecnología de detección heterodina.

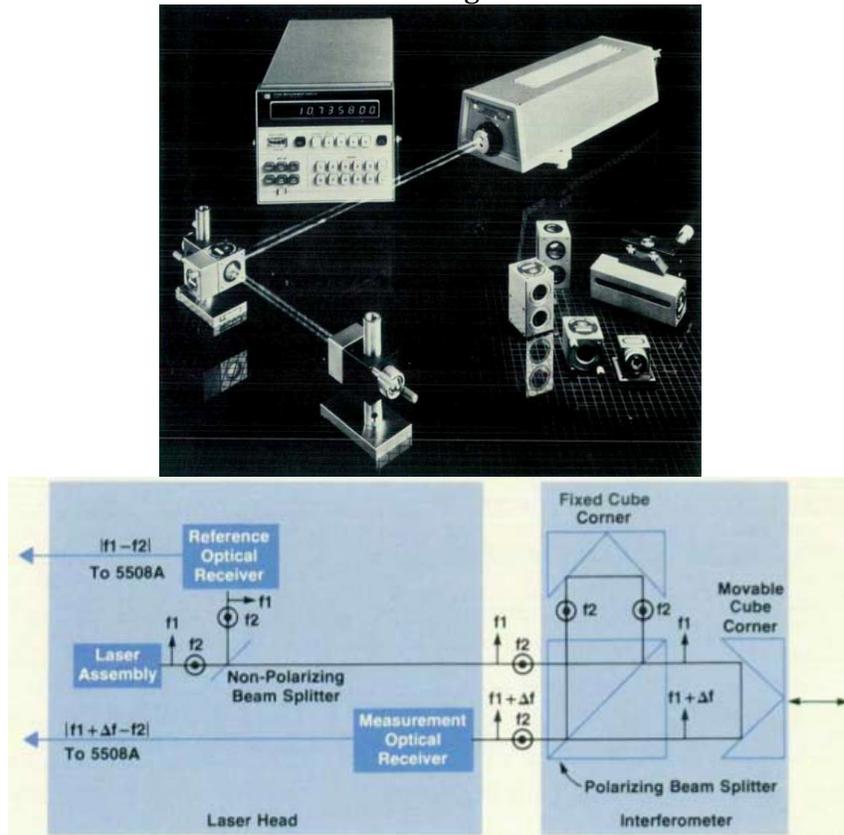


Figura 1 . 7 Interferómetro HP modelo 5508A, componentes y trayectoria óptica (Hewlett-Packard, 1983)

En la Figura 1.7 se observan los elementos que conforman el equipo HP, un cabezal láser, una unidad de control, decodificación, despliegue de información y comunicación así como un set de elementos ópticos como divisores de haz, reflectores y espejos que permiten realizar mediciones lineales y angulares; también en la Figura 1.7 se observa la trayectoria de interferencia, donde el generador láser de doble frecuencia y el detector se encuentran en el cabezal láser como se muestra en la Figura 1.8, este se conecta a la unidad de control junto con un par de sensores de aire y temperatura también mostrados en la Figura 1.8 que recopilan información para realizar correcciones debidas a las condiciones ambientales.

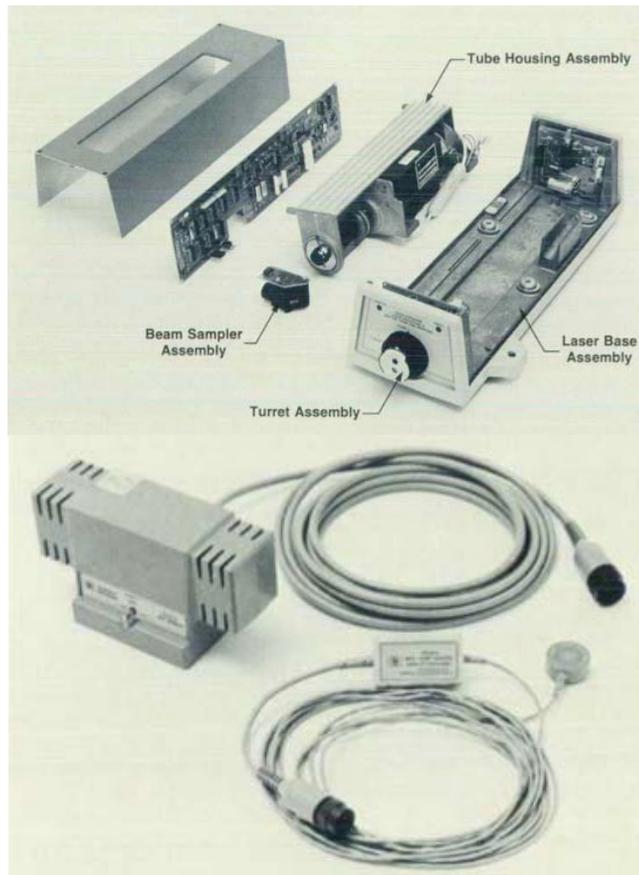


Figura 1 . 8 Generador láser de doble frecuencia, sensores de aire y temperatura (Hewlett-Packard, 1983)

Los interferómetros *HP* permiten la comunicación con computadoras personales *HP* para guardar y procesar los datos obtenidos en las mediciones con software especialmente diseñado para este propósito; hoy en día esta línea de equipos se encuentra discontinuado. (Hewlett-Packard, 1983)

Renishaw ofrece actualmente sistemas de interferometría orientados a la metrología y calibración como el que se muestra en la Figura 1.9, al igual que el ejemplo anterior mantiene por separado el arreglo óptico mientras que el tubo láser y las unidades de procesamiento y comunicación se encuentran incorporadas, sensores de temperatura y presión se conectan a una PC donde toda la información es procesada; ofrece una resolución de hasta 1[nm] en desplazamientos lineales con velocidades de hasta 4 m/s y alcance de hasta 80 m.



Figura 1 . 9 Equipo de calibración *Renishaw* modelo XL-80

Por otro lado para el sector industrial *Renishaw* pone a disposición sistemas diseñados para la retroalimentación de posición, usando interferometría con un esquema de detección homodina que puede alcanzar una resolución de hasta 38.6 picómetros gracias a un sistema electrónico de interpolación, el modelo RLU20 se muestra en la Figura 1.10.



Figura 1 . 10 Sistema de retroalimentación de posición basado en interferometría RLU20 (*Renishaw*, 2012)

En este sistema, la luz láser se transmite por fibra óptica hasta un cabezal donde el sistema óptico se encuentran embebido como se muestra en la Figura 1.11, el cabezal sólo necesita un objetivo para completar la trayectoria de interferencia el cuál puede ser un retro reflector o bien un espejo plano, con estas características la necesidades de alineación son mínimas.



Figura 1 . 11 Trayectoria óptica dentro del cabezal *Renishaw* (Renishaw, 2012)

La fuente láser y la unidad de procesamiento de señales comparten el gabinete, esto hace posible un sistema muy compacto al cuál es posible conectar módulos adicionales que permiten corregir errores de medición debidos al medio ambiente y por supuesto los interpoladores electrónicos; adicionalmente la salida de la unidad de procesamiento puede comunicarse con controladores compatibles con el protocolo RS422; estas configuraciones opcionales se ilustran en la Figura 1.12. (Renishaw, 2012)

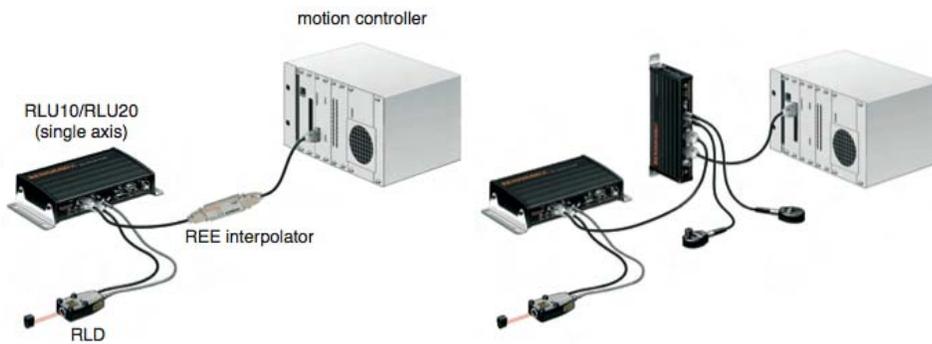


Figura 1 . 12 Sistema de interpolación, sensores de aire, temperatura y conexión a controlador *Renishaw* (Renishaw, 2012)

1.2.2 Sistemas de interferometría desarrollados para investigación.

Alrededor del mundo, universidades, institutos, centros de investigación y laboratorios, han propuesto y probado modificaciones al arreglo óptico de Michelson, así como esquemas de detección, técnicas para la división de franjas, algoritmos de procesamiento, etc. Algunos ejemplos de las publicaciones de trabajos al respecto se muestran a continuación.

En *Quadrature phase-shift error analysis using a homodyne laser interferometer* de 2009, se reporta el desarrollo de un algoritmo offline para el procesamiento de datos de un interferómetro homodino con detección de cuadratura de $\frac{1}{2} \lambda$ de resolución para corregir los efectos de la falta de cuadratura en las señales de interferencia. En la Figura 1.13 se presenta el esquema utilizado, consta de una fuente láser He-Ne, un divisor de haz no polarizado separa los haces de luz y los recombina tras su reflexión, un divisor de haz polarizado separa las señales de desplazamiento y referencia; se utilizó un retardador de $\lambda/8$ para modificar el ángulo entre las señales y probar el algoritmo de corrección. (Gregorcic, Pozar, & Mozina, 2009)

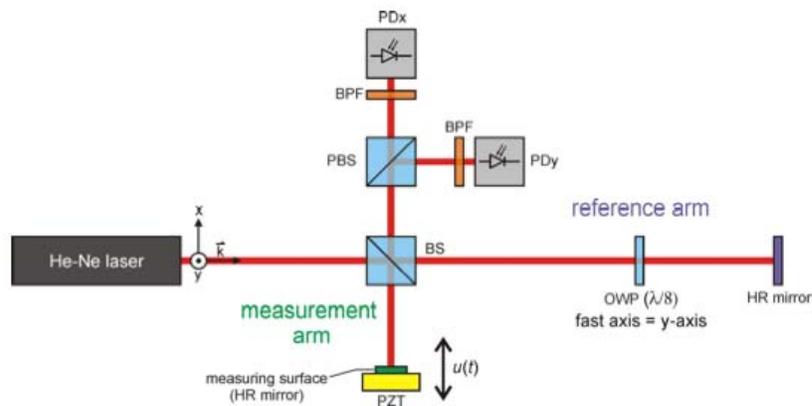


Figura 1.13 Arreglo óptico, fuente láser polarizada, divisores de haz, retardador y filtros (Gregorcic, Pozar, & Mozina, 2009)

En el artículo *Signal Processing method of a laser synthetic wavelength interferometer* de 2009 se desarrolló un algoritmo para la reducción de errores por conteo logrando un error promedio de 2.64 nm y una desviación estándar de 0.47 nm usando un interferómetro que combina las técnicas de conteo de franjas y cambio de fase. (Yan, Chen, Li, Li, & Tang, 2009)

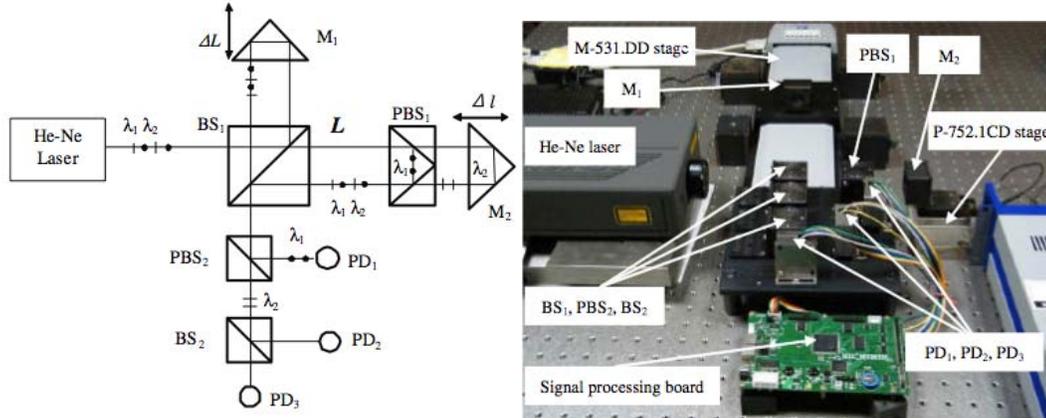


Figura 1.14 Diseño híbrido y arreglo de pruebas (Yan, Chen, Li, Li, & Tang, 2009)

En la Figura 1.14 se muestra el arreglo utilizado que consta de una fuente He-Ne de doble frecuencia, un divisor de haz no polarizado que genera los brazos de medición y referencia, divisores de haz polarizados y no polarizados para separar las señales y reflectores.

En el artículo *Subdivision and direction recognition of $\lambda/16$ of orthogonal fringes for nanometric measurement* de 2009 se propone un sistema electrónico para aumentar la resolución a $1/8$ y $1/16$ de longitud de onda mediante la generación de señales de referencia a partir de las señales de cuadratura. El sistema se probó únicamente con un generador de señales, un sistema ADC de alta velocidad, un FPGA y una PC; las señales generadas por el sistema electrónico se muestran en la Figura 1.15. (Haijiang, Xiaoqian, Wang, & Aison, 2009)

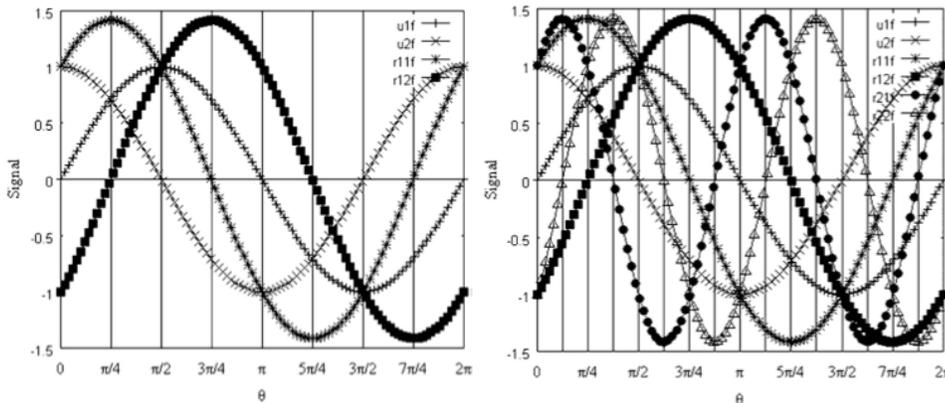


Figura 1.15 Señales de división $1/8$ y $1/16$ (Haijiang, Xiaoqian, Wang, & Aison, 2009)

En *A Monolithic MEMS Michelson interferometer for FTIR spectroscopy* de 2011 se desarrolló un interferómetro tipo Michelson embebido en un chip con el propósito de realizar mediciones de espectroscopia infrarroja con la transformada de Fourier. Obtuvieron adquisiciones de espectro entre 8 y $12 \mu\text{m}$ usando una fuente láser monocromática ajustable, el prototipo se muestra en la Figura 1.16. (Jinhong & Deutsch, 2011)

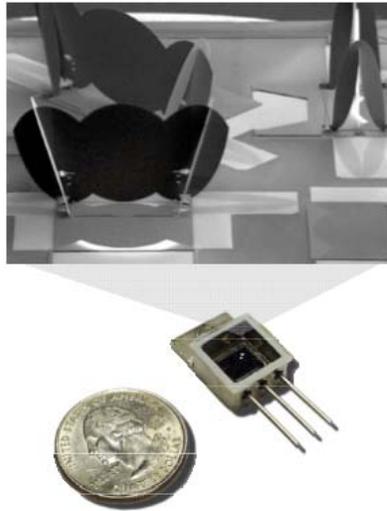


Figura 1 . 16 Interferómetro monolítico, composición interna y escala (Jinhong & Deutsch, 2011)

En *A New Measuring Method for Circular Motion Accuracy of NC Machine Tools Base don Dual-frequency Laser Interferometer* de 2011, se propone un arreglo con el que es posible determinar desplazamientos en dos ejes al mismo tiempo, buscando caracterizar desplazamientos circulares, se utilizó equipo para interferometría con detección heterodina, logran un arreglo con resolución de $\lambda/16$ en dos ejes de manera simultánea. (Tang, Wang, Jiang, Gao, & Guo, 2011)

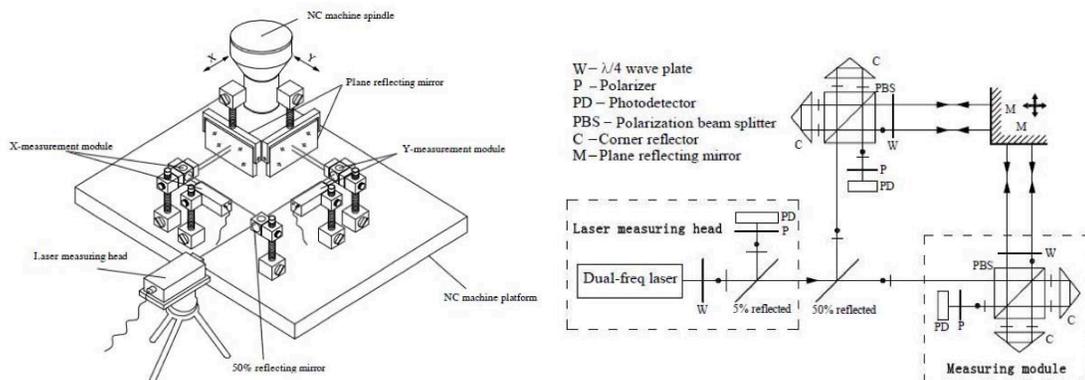


Figura 1 . 17 Arreglo heterodino para la detección de desplazamientos en dos ejes (Tang, Wang, Jiang, Gao, & Guo, 2011)

En la Figura 1.17 se muestra el esquema empleado, consta de una fuente láser de doble frecuencia, un divisor de haz no polarizado que separa el haz para realizar mediciones en dos ejes y un arreglo de interferencia homodina de doble paso conformado por un divisor de haz polarizado, dos retro reflectores, un retardador de un cuarto de longitud de onda, un polarizador lineal, un foto detector y un espejo plano para cada eje.

1.2.3 Desarrollo del GMM.

Desde el año 2000, el Grupo de Micro-mecánica y Mecatrónica *GMM* perteneciente al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico *CCADET*, de la Universidad Nacional Autónoma de México *UNAM*, ha desarrollado cuatro generaciones de máquinas herramienta con la capacidad de realizar desplazamientos micrométricos; cada generación de estas MicroMáquinas Herramienta *MMH* fue desarrollada con los conocimientos y la tecnología adquirida en las generaciones anteriores; en la Figura 1.18 se muestran las *MMHs* desarrolladas entre los años 2007 y 2010.



Figura 1 . 18 *MMH* del *GMM* 2007 y 2010 (Herrera, 2010)

Con el propósito de caracterizar sus *MMHs*, en el año 2011 el *GMM* desarrolló un sistema de interferometría homodino basado en el arreglo original de Michelson con una resolución óptica teórica de un cuarto de longitud de onda, la trayectoria se muestra en el esquema de la Figura 1.19 .

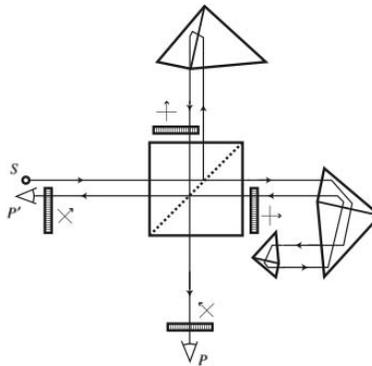


Figura 1 . 19 Trayectoria óptica del interferómetro 2011 (Alagón, 2011)

El sistema fue construido para montarse sobre una mesa óptica como se muestra en la Figura 1.20, una tarjeta electrónica realiza el conteo de franjas aumentando la resolución a un dieciseisavo de longitud de onda y envía el resultado a una computadora personal a través de una tarjeta de adquisición de datos y una interfaz programada en *LabView* de *National Instruments*. (Alagón, 2011)

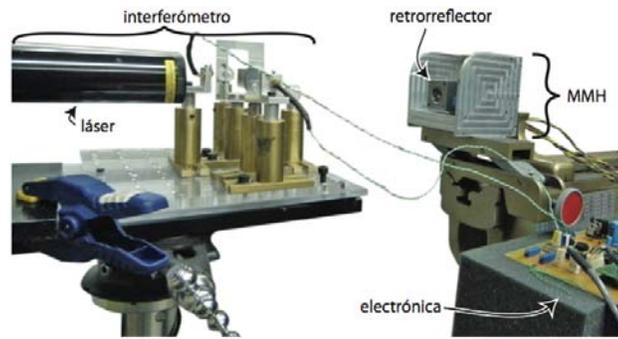


Figura 1 . 20 Interferómetro del GMM 2011 montado y alineado con la 2010 (Alagón, 2011)

El resultado fue un sistema de interferometría con una resolución teórica de 39.55 nm, el cuál fue caracterizado en el laboratorio de metrología del CCADET y puesto a prueba con las MMH del GMM.

Capítulo 2. Planteamiento del problema.

2.1 Planteamiento del problema.

El presente trabajo retoma los esfuerzos del GMM en materia de interferometría, partiendo del resultado de la caracterización del sistema desarrollado en 2011 donde se observó que la sensibilidad del interferómetro era menor a la resolución teórica, se realizó un análisis no presencial del prototipo 2011 basado en la documentación y las experiencias de quienes lo utilizaron para plantear la problemática, el rediseño y la implementación de mejoras que permitieran explotar el potencial de la trayectoria óptica propuesta en (Alagón, 2011).

El arreglo óptico empleado en el interferómetro 2011 utilizó una trayectoria basada en Michelson con detección homodina y una resolución óptica de un cuarto de longitud de onda; el arreglo de los componentes de esta trayectoria se muestra en la Figura 2.1, está conformado por una fuente láser (*LT*) que emite un haz de luz hacia un divisor de haz *BS*, la porción reflejada del haz, crea el brazo de referencia conformado por un retro reflector (*RR1*), un polarizador a 90° (*P1*), un polarizador lineal a -45° (*P2*) y un fotodiodo detector (*PD1*). La porción del haz transmitida, traza el brazo de medición; este consta un retro reflector (*RR2*) que es el objetivo móvil, el retro reflector (*RR3*), un polarizador lineal a 0° (*P3*), un polarizador lineal a 45° (*P4*) y un fotodiodo detector *PD2*.

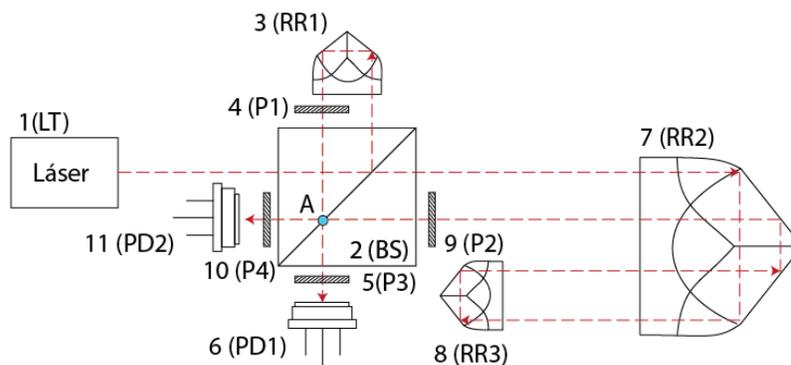


Figura 2 . 1 Trayectoria óptica propuesta en 2011

El uso de los retro reflectores *RR1* y *RR3* provocan que la trayectoria de interferencia sea paralela pero no colineal a la fuente de luz, esto permite una segunda división en el punto *A* y ello la posibilidad de colocar dos detectores sin utilizar un divisor de haz adicional, la reflexión adicional producida por *RR3* genera un doble paso en la interferencia del haz, esto se traduce en una resolución de un cuarto de longitud de onda, finalmente el juego de polarizadores ajustan el retardo de una de las señales a un cuarto de ciclo para obtener señales en cuadratura.

La configuración del interferómetro se orientó para su uso en laboratorio, los componentes ópticos fueron sujetos con soportes diseñados a la medida para ser montados sobre una mesa óptica, fueron fabricados en acrílico que a su vez se apoyan en monturas de latón y aluminio, el montaje experimental se muestra en la Figura 2.2 .



Figura 2 . 2 Soportes del sistema de interferometría montados sobre una mesa óptica

Para lograr la alineación de los componentes en el montaje experimental sobre una mesa óptica, se realizaron modificaciones como la posición del láser y la incorporación de un espejo plano para dirigir el haz hacia el BS así como el cambio en la posición de los brazos de referencia y medición respecto a la entrada del haz de luz; en la Figura 2.3 se muestra una imagen del montaje experimental así como un esquema de su trayectoria.

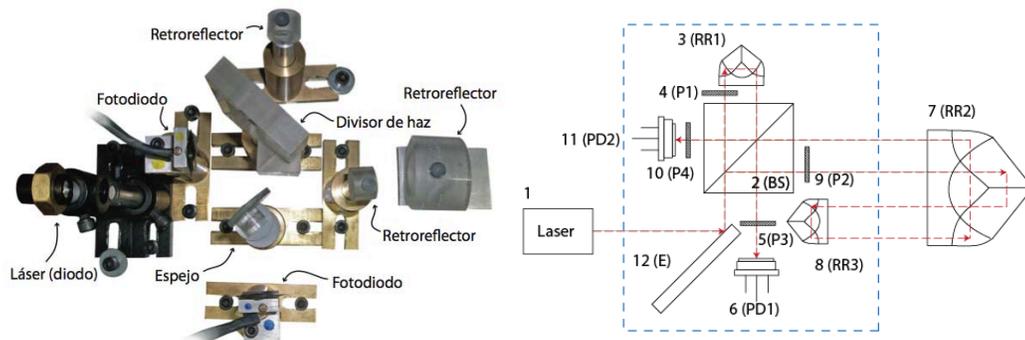


Figura 2 . 3 Montaje experimental del 2011 y su trayectoria óptica. (Alagón, 2011)

En la Figura 2.4 se observa como el interferómetro fue colocado junto con un tubo láser sobre un trípode que permite ajustar la posición lateral y angular para ser alineados con el retro reflector móvil que fue colocado sobre un carro de las MMHs como se observa en la Figuras 2.5. Las señales de interferencia fueron procesadas con la ayuda de una tarjeta de circuitos y finalmente la información fue transmitida a una computadora personal con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos y un programa desarrollado en *LabView*, ambos de la marca *National Instruments*.



Figura 2 . 4 Interferómetro GMM 2011 alineado con la fuente láser en un trípode (Alagón, 2011)

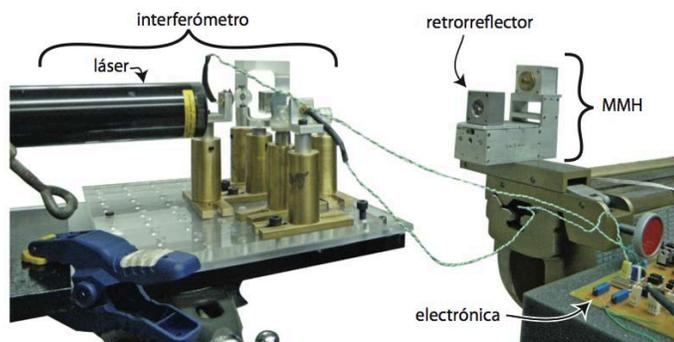


Figura 2 . 5 Interferómetro GMM 2011 alineado con la MMH 2007 y conectado a la tarjeta de procesamiento de señales (Alagón, 2011)

La tarjeta electrónica contiene un sistema electrónico de acondicionamiento de señales consistente en una etapa de conversión de corriente a voltaje, amplificación, filtrado, detección de cruce por ceros y conteo de flancos para señales en cuadratura, al contar los flancos ascendentes y descendentes de las señales de cuadratura se logró que la resolución se incrementara hasta un dieciseisavo de longitud de onda.

Los resultados de las pruebas de caracterización señalaron que el sistema poseía una sensibilidad de 300 nm, este rendimiento inferior al teórico fue atribuido a fuentes de ruido identificadas como ambientales, inherentes al sistema y geométricas. El ruido ambiental se refiere a los factores como temperatura, humedad, corrientes de aire y partículas suspendidas que pueden modificar la estabilidad la luz láser, el ruido debido al propio sistema abarca la calidad y

eficiencia de los materiales empleados mientras que los factores geométricos engloban todos los posibles desalineamientos del arreglo óptico.

La recolección de información sobre el interferómetro de 2011 permitió identificar los dos factores principales que pudieron limitar la capacidad del sistema, el primero es el error provocado por problemas de alineación y el segundo es el ruido electrónico, los factores menos controlables como la estabilidad del haz de luz debida a variaciones ambientales quedan fuera de los alcances de este trabajo.

Se notó que tanto los problemas de alineación como el ruido electrónico podrían tener como común origen las monturas metálicas, ya que por un lado las monturas y soportes no restringieron de forma total a los elementos del arreglo óptico y son susceptibles a vibraciones mecánicas de manera independiente, al mismo tiempo las monturas y soportes en conjunto con el cableado de los foto detectores pudieron propiciar el efecto de antena aumentando la posibilidad de introducir ruido de origen electromagnético directamente en las señales de interferencia. Por otro lado se constató que el arreglo de polarizadores propuesto entonces, no es capaz de producir un retardo entre los haces de luz, necesario para alcanzar la máxima resolución; por lo que en manera puntual, la problemática de este trabajo radica en el diseño e implementación un sistema mecánico y uno electrónico que capaces de controlar los efectos indeseados y permitan alcanzar la resolución teórica del instrumento y realizar mediciones confiables, dejando como objetivo adicional la búsqueda del retardo entre los haces luminosos.

2.2 Hipótesis

Es posible alcanzar la resolución teórica de la trayectoria óptica propuesta en 2011 utilizando un sistema de soportes opto mecánicos que minimice los errores de origen geométrico y un sistema de procesamiento electrónico que controle el ruido de origen electromagnético.

2.3 Objetivo.

- Integrar un sistema de interferometría funcional con una resolución teórica de un dieciseisavo de longitud de onda.

Especificaciones:

- Resolución óptica de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda.
- Resolución total de 39.55 nm, compuesta por la resolución aumentada con métodos electrónicos.
- Medición en recorridos de hasta 300 mm.

Requerimientos:

- Sistema de interferometría con detección homodina.
- Reconocimiento de sentido de desplazamiento.
- Configuración compacta.
- Alineación sencilla.
- Mostrar la información de desplazamiento.
- Comunicación con una PC para el registro de la información de desplazamiento.

2.4 Alcances.

- Diseñar e implementar un sistema mecánico que permita mantener alineados los componentes ópticos del interferómetro desarrollado en 2011 por el GMM.
- Diseñar e implementar un sistema de procesamiento de señales que permita un conteo de franjas eficiente.
- Integrar los sistemas óptico, mecánico y electrónico en una forma compacta.
- Minimizar las necesidades de alineación para la puesta en marcha del sistema.
- Caracterizar el instrumento.
- Proponer trabajo a futuro y mejoras.

2.5 Metodología.

El desarrollo de un trabajo experimental rara vez es un proceso lineal, con regularidad se evalúan los avances para determinar si el camino que se ha seguido es el más adecuado, buscar información, hacer deducciones e interpretaciones, realizar correcciones, modificar diseños o incluso cambiar el rumbo del trabajo son acciones que suelen tomarse durante el desarrollo de un trabajo de esta índole. La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo está basada en el método científico: investigación, observación sobre los fenómenos involucrados, propuestas de solución, pruebas de manera iterativa durante el tiempo establecido para este trabajo.



Figura 2 . 6 Metodología de trabajo

Capítulo 3. Marco teórico.

En este capítulo se presentan las bases teóricas que fundamentan el trabajo realizado, comenzando con un breve recuento del desarrollo de la óptica hasta principios del siglo XX con la llegada de la mecánica cuántica.

Se puede considerar el primer periodo de la óptica está comprendido hasta el renacimiento, donde los primeros testimonios de tecnología óptica se asocian a las culturas Egipcia y Griega, pues se han encontrado espejos de metales pulidos y *vidrios quemadores*, más notorio aún, es que Aristóteles escribió sobre el comportamiento de la luz de manera similar a como lo hace la teoría del éter lumínico del siglo XIX. Durante la edad media, la ciencia en general se vio adormecida en Europa, sin embargo en el imperio Persa, Alhazen realizó trabajos sobre la reflexión, espejos esféricos y parabólicos así como una detallada descripción del ojo humano; los cuales fueron traducidos al latín y llegaron a Europa donde Roger Bacon inició la idea de usar lentes para corregir la vista. Aparecieron los espejos que junto con las proposiciones de Leonardo y Giovanni Battista de usar múltiples espejos y combinaciones de lentes positivas y negativas acercaban a la construcción del telescopio. Nombres como Galileo Galilei y Johannes Kepler son conocidos por sus grandes deducciones en el campo de la astronomía con el uso de sus versiones de telescopio que perfeccionaron con el paso de los años.

En el siglo XVII, Willebord Snell descubre empíricamente la ley de refracción abriendo las puertas a la óptica moderna; Descartes la formula en función de senos y cosenos y Fermat la redefine; Francisco Grimaldi observa el fenómeno de difracción al igual que Robert Hooke para la *Royal Society* de Londres, además propuso la idea de que la luz era un movimiento vibratorio que se propagaba en un medio a gran velocidad. Los experimentos de dispersión de Isaac Newton le permitieron concluir que la luz blanca estaba compuesta de un rango completo de colores independientes que excitaban al éter de manera diferente, propuso que la luz se comporta como un movimiento rectilíneo en su teoría corpuscular. En el resto del continente, la teoría ondulatoria fue difundida ampliamente, Huygens pudo deducir las leyes de reflexión y refracción usando su teoría ondulatoria a finales del siglo XVIII.

El doctor Thomas Young retoma la teoría ondulatoria de la luz, presentando a principios del siglo XIX el principio de interferencia, la cuál no fue bien recibida, sin embargo, Agustín Fresnel sintetizó los conceptos de Huygens y Young, pudiendo calcular los patrones de difracción y explicar la propagación rectilínea en medios isotrópicos homogéneos con su nueva teoría ondulatoria. Fresnel, Young y Dominique Arago se convirtieron en colaboradores y juntos realizaron experimentos sobre los efectos de la polarización en la interferencia con

resultados inexplicables, hasta que el propio Young sugirió que el efecto que Newton había llamado los *dos lados de la luz* eran una manifestación de dos vibraciones ortogonales del éter transversales a la dirección del rayo. Mientras tanto Louis Fizeau, Bernard Foucault y Charles Wheatstone habían diseñado experimentos para determinar la velocidad de la luz con resultados que se aproximaban a los 315 mil km/s.

Por su parte, el estudio de electricidad y el magnetismo daba frutos de manera independiente, Michael Faraday estableció una interrelación entre el electromagnetismo y la luz cuando encontró que la dirección de polarización de un haz puede alterarse con un campo magnético fuerte aplicado al medio y James Clerk Maxwell condensó y amplió el conocimiento empírico hasta el momento con un conjunto de ecuaciones matemáticas con las cuales pudo demostrar de forma teórica que la luz era una perturbación electromagnética en forma de ondas propagadas a través del éter.

La aceptación de esta nueva teoría requería no sólo entender la naturaleza física del éter, sino que este tuviera cualidades particulares, pues para explicar la aberración espacial observada por James Bradley con la teoría ondulatoria hacía falta que el éter se mantuviera inerte mientras los cuerpos se desplazaban en él; a finales del siglo XIX, el propio Maxwell sugirió una forma para medir la velocidad con la que el sistema solar se movía respecto al éter, la idea fue tomada por Albert Michelson quien realizó el experimento sin detectar movimiento de la tierra respecto al éter.

En 1905 Albert Einstein introdujo su teoría especial de la relatividad en la que rechazaba la existencia del éter y postula que la luz se propaga en el espacio con una velocidad independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor, Max Planck introdujo los conceptos de la mecánica cuántica donde con la colaboración de Einstein, Bohr, Born, Heisenberg, Schrödinger, De Broglie, Pauli, Dirac entre otros la estructuraron dejando evidente que los conceptos de partícula y onda, que en mundo macroscópico parecen mutuamente excluyentes, deben unirse en la escala submicroscópica. (Hecht, 1986)

3.1 Fenómenos ondulatorios, interferencia e interferometría.

Una onda es una perturbación auto propagante que debe su existencia a una causa o fuente que, independientemente de su naturaleza, posee una dirección de propagación, una amplitud A , una longitud de onda λ y un periodo T ; con los cuales se pueden determinar también una frecuencia f y una velocidad de propagación v , estos elementos se muestran a continuación en la figura 3.1 .

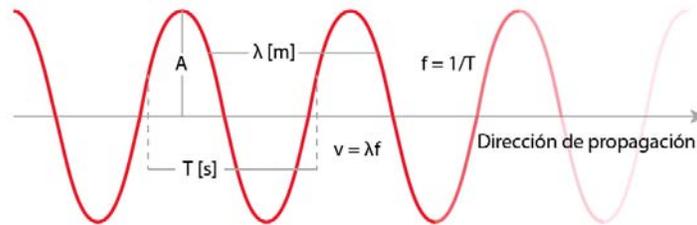


Figura 3.1 Componentes de una onda transversal

Las ondas se pueden clasificar en *materiales*, que viajan a través de un medio elástico, y *electromagnéticas* que pueden transportarse aún en la ausencia de uno; las ondas *transversales* son aquellas donde la oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación; mientras que en las ondas *longitudinales*, la oscilación es paralela a la dirección de propagación. Los fenómenos ondulatorios atienden al principio de superposición, es decir que dos o más ondas pueden viajar por la misma región del espacio en forma completamente independiente, y que el efecto resultante de su interacción es igual a la adición directa de los efectos que produciría cada una de las ondas en ausencia de las demás. (McKelvey & Grotch, 1978)

La interferencia es el fenómeno producido por la superposición de ondas, donde la resultante podrá presentar una amplitud máxima cuándo las ondas interferidas se encuentren en fase y tendrá una amplitud mínima cuándo las ondas interferidas estén desfasadas medio ciclo, estos casos reciben el nombre de interferencia constructiva y destructiva respectivamente. (ADGCH, 2011); en la Figura 3.2 se muestra un esquema de ambos casos de interferencia.

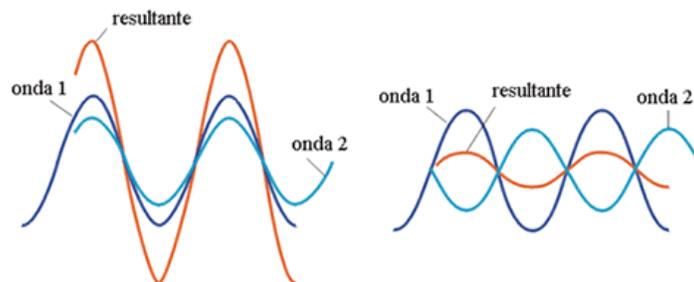


Figura 3.2 Interferencia constructiva y destructiva

Los efectos de la interferencia constructiva y destructiva se pueden observar en el experimento de Young, donde luz difusa proveniente de una fuente puntual a , se divide en otras dos fuentes puntuales b y c , las emisiones de luz de estas fuentes impactan contra una pantalla donde se observa una secuencia de franjas de luz y sombra conocidas como patrón de interferencia como se presenta en la Figura 3.3.

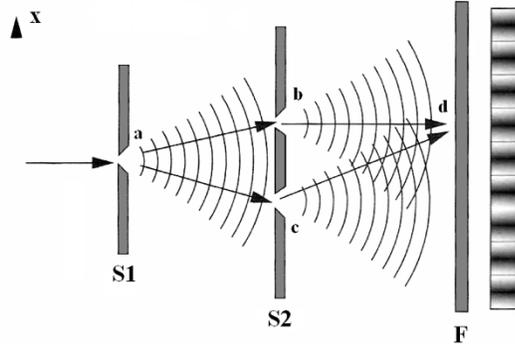


Figura 3 . 3 El experimento de Young

Es posible aprovechar el fenómeno de interferencia de la luz para determinar desplazamientos lineales y angulares, velocidad lineal y angular, así como la forma de objetos y superficies a partir del análisis del patrón de interferencia con un conjunto de técnicas conocidas como *interferometría*.

Durante la segunda mitad del siglo XIX se realizaron experimentos para explicar el comportamiento y naturaleza de la luz, Louis Fizeau, Georges Sagnac y Albert Michelson encabezaron algunos de estos experimentos utilizando el principio de interferencia de la luz como herramienta; además de sus aportaciones a la física, los arreglos experimentales que utilizaron evolucionaron en instrumentos con la capacidad de realizar mediciones de alta precisión. Hoy en día el interferómetro de Fizeau es utilizado para determinar la planitud de superficies, el interferómetro de Sagnac se utiliza para detectar cambios de ángulo y orientación por lo que se le conoce como “giroscopio láser”, y el interferómetro de Michelson es utilizado principalmente para medir desplazamientos y velocidades lineales.

3.2 El interferómetro de Michelson.

El trabajo experimental de Michelson y Morley buscaba determinar la velocidad relativa de la tierra respecto al éter luminífero, para así explicar la aberración en los telescopios con la teoría ondulatoria de la luz. En el primer experimento realizado únicamente por Michelson se montó un arreglo para dividir un haz de luz en dos porciones ortogonales con trayectorias de la misma longitud, reflejarlas y recombinarlas para obtener un patrón de interferencia; la idea era orientar una de las trayectorias de manera que la velocidad de la luz se viera afectada por la velocidad de translación de la tierra, esto permitiría relacionar los cambios en el patrón de interferencia con la aberración observada. La Figura 3.4 (1) muestra el concepto del primer arreglo de Michelson donde un haz de luz sigue la trayectoria sa , es dividido para recorrer los segmentos ab y ac , entonces los haces son reflejados y recombinados, el patrón de interferencia se observa al final de la trayectoria ad ; la Figura 3.4 (2) muestra la implementación del experimento utilizando un telescopio.

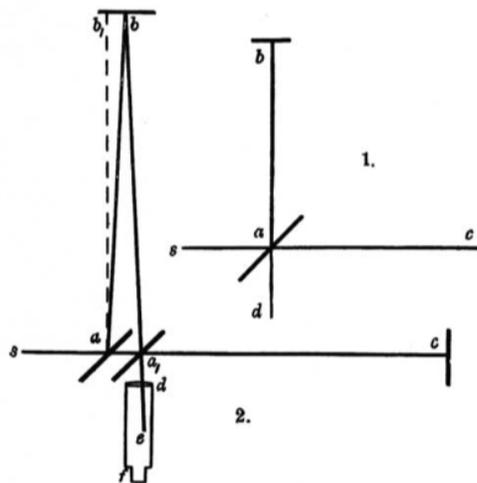


Figura 3.4 Arreglo conceptual del experimento de Michelson (Michelson & Morley, 1887)

Un interferómetro tipo Michelson para la medición de desplazamientos consta de una fuente de luz monocromática, un semiespejo donde se divide el haz en dos porciones ortogonales; tanto la porción reflejada como la transmitida son reflejadas con espejos, finalmente éstas porciones regresan al semiespejo para ser recombinadas. Cuando se modifica la longitud de una de las trayectorias sin perder la alineación, el patrón de interferencia se verá modificado por los efectos de la interferencia constructiva y destructiva de manera alternada, dando origen a una secuencia de luz y sombra que puede ser detectada con algún dispositivo fotoeléctrico. A la trayectoria que concierne al espejo que permanece fijo se le conoce como brazo de referencia, mientras que a la trayectoria del espejo que se desplaza se le conoce como brazo de medición; en la Figura 3.5 se observa el arreglo tipo Michelson para medir desplazamientos y el patrón de interferencia observado.

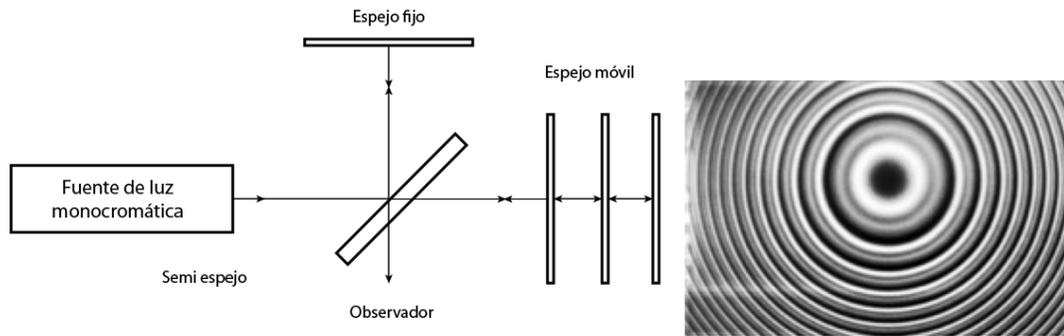


Figura 3 . 5 Configuración de Michelson para la medición de desplazamientos y anillos de interferencia

Una franja es un ciclo completo entre la variación de intensidad luminosa entre luz y sombra y equivale a los 360 grados de la fase de una onda, estas franjas aparecen de forma concéntrica mientras el espejo del brazo de medición se desplaza, en un principio los interferómetros contaron franjas para determinar el desplazamiento, posteriormente gracias a los avances en materiales ópticos y electrónica, incrementaron su resolución a fracciones de franja utilizando el efecto Doppler con los sistemas con detección heterodina; en la Tabla 3.1 se muestra el aumento en la resolución de acuerdo a la tecnología utilizada. (Zygo Co., 1999).

Tabla 3 . 1 Resolución de los sistemas de interferometría (Zygo Co., 1999)

Resolución.	Año.	Descripción.
$\lambda/8$	1965	Sistemas comerciales DC
$\lambda/16$	1970	Sistemas comerciales AC
$\lambda/512^*$	1987	Sistema Heterodino a 20 MHz
$\lambda/2048^*$	1996	Estado del arte en electrónica.

3.2.1 Sistema con detección homodina.

Un sistema de interferometría con detección homodina, que use el arreglo de Michelson se muestra en la Figura 3.6, está compuesto de una fuente de luz láser típicamente He-Ne de frecuencia sencilla, un divisor de haz polarizado y dos retro reflectores para los brazos de referencia y medición, además de un polarizador lineal a 45 grados y un transductor opto-electrónico para detectar el patrón de interferencia y transformarlo en una señal eléctrica. (Zygo Co., 1999)

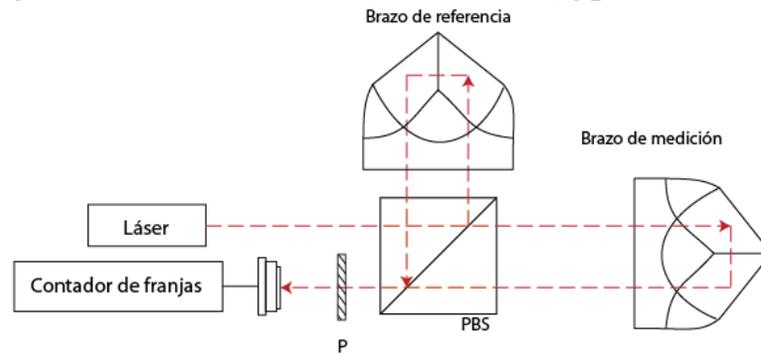


Figura 3.6 Interferómetro con detección homodina (Zygo Co., 1999)

Un sistema electrónico procesa la señal de interferencia para realizar un conteo de cruces por cero. Como los haces interferidos tienen la misma longitud de onda, cada cruce equivale a un desplazamiento de $\frac{1}{2} \lambda$. Un inconveniente de este procedimiento, es que solamente se detectan incrementos en el desplazamiento sin importar su sentido; al incluir un divisor de haz no polarizado y un retardador de $\frac{1}{4} \lambda$ se obtendrán dos nuevos haces con un desfase de 90° , los detectores procesarán señales en cuadratura que permiten diferenciar el sentido del desplazamiento además de duplicar la resolución si se cuentan los flancos de ambas señales de manera intercalada (Zygo Co., 1999), el arreglo se muestra a continuación en la Figura 3.7.

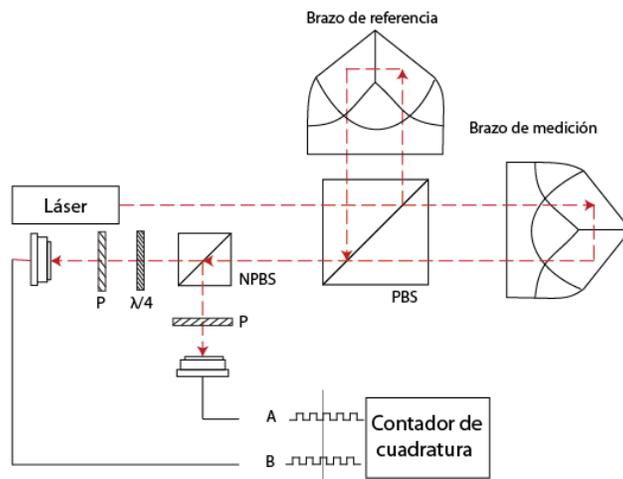


Figura 3.7 Detección de sentido en un sistema homodino (Zygo Co., 1999)

Una desventaja de los sistemas con detección homodina es la sensibilidad a los cambios de potencia, estos pueden ser ocasionados por fuentes de error como:

- Incorrecta alineación en cualquiera de los elementos.
- Variaciones en la potencia lumínica durante los desplazamientos.
- Características no ideales de los foto-detectores.

Para minimizar los efectos de la variación en la intensidad de las señales de interferencia, es posible añadir una referencia y compensar las fluctuaciones mediante procesamiento electrónico; cabe mencionar que para que ésta alternativa funcione de manera adecuada, es necesaria una buena relación señal/ruido en cada detector; en la Figura 3.8 se observa que el haz de referencia se obtiene con un semiespejo o divisor de haz antes de la generación de cuadratura.

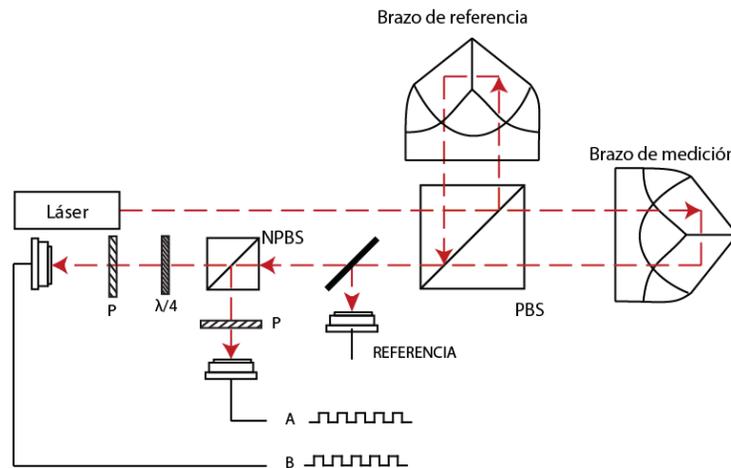


Figura 3.8 Arreglo homodino con detección de sentido y normalización de potencia (Zygo Co., 1999)

Los interferómetros con detección homodina son ampliamente usados por su relativamente sencillo principio de operación y la amplia disponibilidad de elementos para conformarlos, sin embargo las soluciones que a pesar de estar ampliamente documentadas, generalmente incrementan la complejidad del sistema al aumentar la cantidad de elementos a posicionar y alinear.

En el apartado siguiente se revisa el fenómeno de polarización de la luz debido a importante que es retardar uno de los haces interferidos para generar la cuadratura en un interferómetro con detección homodina con la capacidad de diferenciar el sentido de desplazamiento. Por otro lado, los dispositivos que detectan y transforman el frente de onda de los haces interferidos en señales eléctricas, están fabricados siguiendo el efecto fotoeléctrico; por lo que también se ha incluido una revisión del fenómeno fotoeléctrico.

3.3 Polarización de la luz.

El trabajo de Maxwell propuso una naturaleza electromagnética para la luz y la unificó con la teoría ondulatoria de Huygens, pudiendo al mismo tiempo describir los fenómenos de reflexión, refracción, polarización y aberración de la luz con sus ecuaciones. Para describir el fenómeno de polarización de la luz es esencial comprender el comportamiento de una onda electromagnética, en la cuál un campo eléctrico y un campo magnético oscilan de manera perpendicular a la dirección de propagación de la onda en un espacio conocido como plano de vibración; el esquema de una onda electromagnética se muestra en la Figura 3.9 .

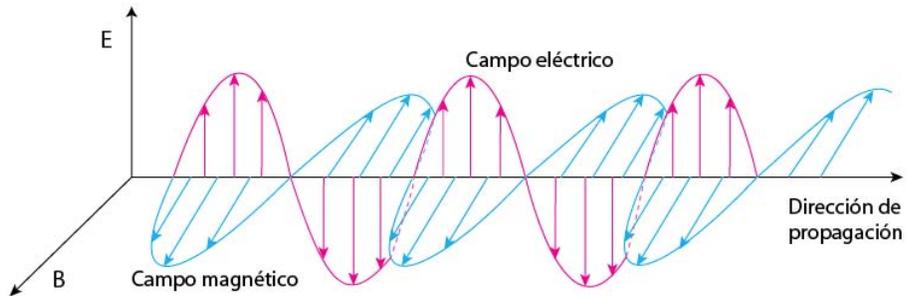


Figura 3.9 Componentes de campo eléctrico y magnético de una onda electromagnética (Tipler & Mosca, 2008)

El estado de polarización se define en función de la orientación del vector de campo eléctrico en el plano de vibración, por ejemplo cuándo el campo eléctrico de una onda electromagnética varía su orientación de manera aleatoria, se dice que la onda no está polarizada, la luz emitida por bombillas incandescentes y fluorescentes, LED y el Sol son ejemplos de luz no polarizada; se entiende por polarización lineal cuándo el campo eléctrico vibra únicamente en un plano perpendicular a la dirección de propagación como se observa en la Figura 3.10 . (Hecht, 1986), (Tipler & Mosca, 2008)

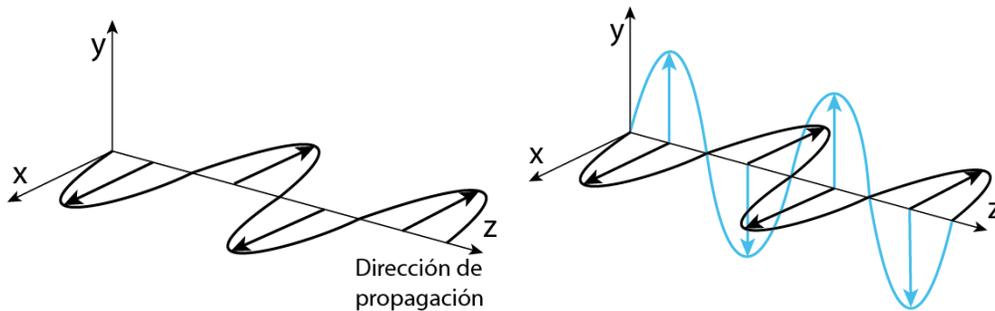


Figura 3.10 Oscilación del campo eléctrico en estado de polarización lineal a 0° y componentes de campo eléctrico en estado de polarización lineal a 45°

La polarización elíptica ocurre cuándo las componentes x y y del campo eléctrico se encuentran fuera de fase; la polarización circular es un caso particular de la elíptica, ocurre cuándo las componentes x y y del campo eléctrico tienen una diferencia de fase de un cuarto de ciclo y sus amplitudes son iguales como se observa en la Figura 3.11 .

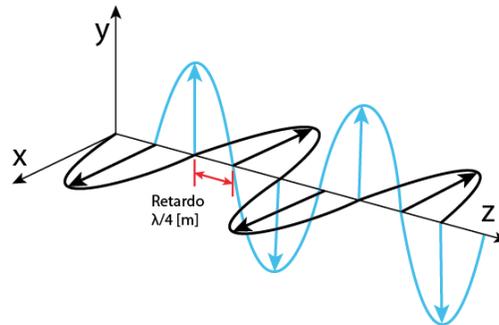


Figura 3 . 11 Polarización circular

Existen cuatro fenómenos que producen el efecto de polarización de la luz, absorción, reflexión, dispersión y birrefracción. La polarización por absorción se presenta cuándo una onda electromagnética incide en una rejilla fabricada con algún material conductor, la energía del campo eléctrico será absorbida si su orientación es paralela a los hilos de la rejilla.

La polarización por reflexión ocurre cuándo luz no polarizada es reflejada desde una superficie plana límite entre dos medios transparentes como aire y vidrio o aire y agua, la luz reflejada estará polarizada para un cierto ángulo de incidencia como se muestra en la Figura 3.12 . (Tipler & Mosca, 2008)

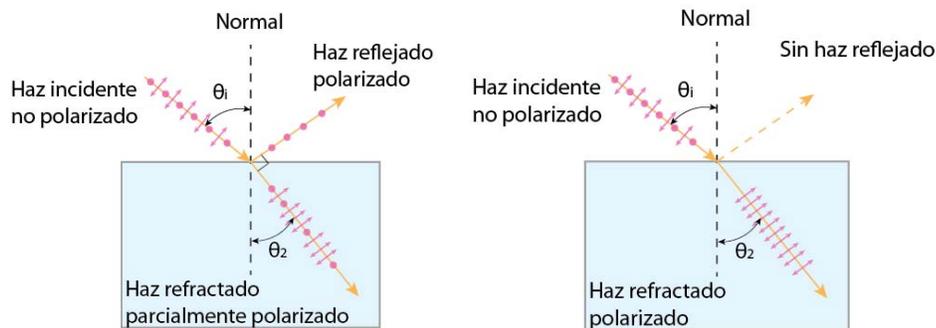


Figura 3 . 12 Polarización parcial y completa por reflexión (Tipler & Mosca, 2008)

El efecto de dispersión es una combinación de la absorción¹ y la rerrradiación. Se presenta cuándo una onda de luz impacta con las partículas presentes en el medio donde se propaga; un ejemplo muy familiar de dispersión sucede con las moléculas de aire que dispersan preferentemente a las longitudes de onda cortas dando al cielo su color azul. (Tipler & Mosca, 2008)

Cuándo un haz de luz no polarizado impacta a una partícula, el campo eléctrico del haz generará oscilaciones en las cargas de la partícula de manera transversal a la dirección de propagación, dicha oscilación producirá nuevas radiaciones con campos eléctricos ortogonales tanto a la dirección de propagación del haz original como a la del nuevo haz emitido como se ilustra en la Figura 3.13 .

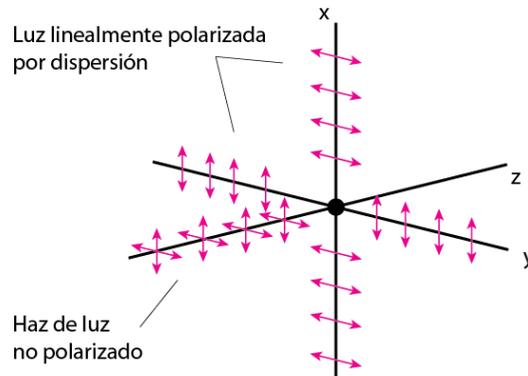


Figura 3 . 13 Polarización por dispersión (Tipler & Mosca, 2008)

La birrefringencia es un fenómeno que ocurre en materiales anisotrópicos como los cristales no cúbicos, en ellos la velocidad de la luz depende de la polarización y de la dirección de propagación, cuándo la luz pasa por estos materiales es separada en dos haces conocidos como rayo ordinario y rayo extraordinario, estos se encuentran polarizados en direcciones perpendiculares y pueden viajar en diferentes direcciones a diferentes velocidades dependiendo de la orientación del material con la luz incidente, este efecto se ilustra en el esquema de la Figura 3.14. (Tipler & Mosca, 2008)

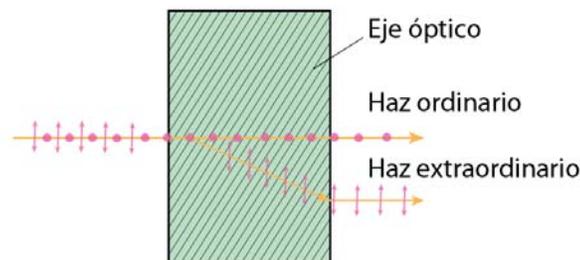


Figura 3 . 14 Polarización por birrefracción (Tipler & Mosca, 2008)

¹ Referente a los fenómenos de radiación de energía, no confundir con polarización por absorción

Existe una dirección particular en un material birrefringente conocida como eje óptico, en la cuál ambos rayos se propagan con la misma velocidad y nada inusual ocurre; si la luz incide en una placa birrefringente de manera perpendicular al eje óptico, los dos haces viajan en la misma dirección pero a diferentes velocidades, el resultado es un haz emergente con una fase diferente que depende del espesor de la placa y de la longitud de onda de la luz incidente. (Tipler & Mosca, 2008)

Hoy en día existen varios tipos de polarizadores en la industria óptica, dicroicos, cristalinos, de malla de alambre y retardadores, cada uno tiene su propio método de fabricación y beneficios potenciales.

Los polarizadores de dicroico transmiten únicamente un estado de polarización específico mientras bloquean todos los demás. Su fabricación típicamente consiste en una película de polímero o sustrato recubierto entre dos placas de cristal. Los polarizadores de dicroico se encuentran disponibles en una gran variedad de formas y presentaciones, desde películas laminadas de bajo costo hasta polarizadores de precisión con alto contraste.

Los polarizadores cristalinos utilizan las propiedades refractivas de los materiales cristalinos para alterar el estado de polarización de la luz. Ofreciendo altas tasas de extinción y umbrales de transmisión; los polarizadores cristalinos son ideales para aplicaciones con luz láser.

Los polarizadores de malla de alambre ofrecen un arreglo de hilos conductores microscópicos sobre un sustrato de vidrio el cuál selectivamente deja pasar luz polarizada P y refleja la luz polarizada S. Los polarizadores de malla de alambre ofrecen una banda de longitudes de onda limitada solo por el sustrato lo que las hace adecuadas para aplicaciones de banda ancha.

Los retardadores, transmiten luz y modifican su estado de polarización sin atenuar, derivar o desplazar el haz. Lo logran retardando un componente de la polarización respecto de su componente ortogonal.

3.4 Efecto fotoeléctrico.

En 1887, Hertz descubre que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que cuando se deja en la oscuridad, un año después Hallwachs observó que al incidir sobre un cuerpo con carga negativa con luz ultravioleta, esta causaba la pérdida de su carga pero no afectaba a un cuerpo con carga positiva, una década más tarde Thompson y Lenard demostraron de forma independiente que la acción de la luz causaba emisiones de cargas libres por la superficie de los metales (Flores & Figueroa, 2007). En 1905, mediante conceptos de mecánica cuántica, Einstein desarrolló la teoría del efecto fotoeléctrico, así pues cuando los fotones caen sobre una superficie metálica, pueden ocurrir dos cosas:

1. Los fotones son reflejados de acuerdo con las leyes de la óptica.
2. Los fotones desaparecen, cediendo su energía para excitar electrones.

El comportamiento fotoeléctrico también se presenta en los materiales semiconductores, lo que ha permitido el desarrollo de dispositivos como fotoresistencias, celdas fotovoltaicas, fotodiodos y fototransistores.

Los fotodiodos son dispositivos electrónicos fabricados principalmente de Silicio, Galio, Germanio y otros semiconductores, funcionan bajo un esquema de polarización inversa, al incidir luz en la unión NP se permite el paso de corriente eléctrica cuya intensidad está relacionada de manera casi lineal con la iluminancia de acuerdo al efecto fotoeléctrico; esto permite usar los fotodiodos como detectores de luz. Los diodos convencionales polarizados inversamente presentan una débil corriente inversa de saturación que es el resultado de los portadores eléctricos minoritarios inherentes a los materiales y condiciones térmicas del dispositivo; en los fotodiodos se observa el mismo comportamiento aún cuando no se encuentre iluminado, la corriente inversa se denomina para estos dispositivos *corriente oscura o corriente de oscuridad*. (Bastian, 1996)

Los fototransistores están constituidos de manera similar a los BJT convencionales, si bien no suelen tener conexión exterior a la base, su funcionamiento se basa en un fotodiodo que existe en la unión colector-base. La configuración más común de un fototransistor es de silicio NPN. Usualmente el fototransistor se construye mediante el proceso de difusión, con una ventana transparente o una lente en la cubierta. La luz incide sobre la unión colector-base crea portadores de carga adicionales. El fototransistor se hace funcionar con el emisor tipo N negativo respecto al colector tipo N. Con ello, la unión base-emisor queda polarizada directamente, mientras que la unión colector-base lo está en sentido inverso. Si incide luz sobre la unión colector-base y los fotones tienen energía suficiente para crear portadores de carga libres adicionales, la polarización inversa en la unión hace que los electrones pasen a la zona del colector. Los huecos restantes de la zona de la base al ser positivos, eleva el

potencial de ésta respecto al emisor. Algunos de ellos se pierden por recombinación en la base, si bien la mayoría llegan al colector. Estos salen por el terminal de colector y constituyen la corriente de salida. En un fototransistor, la corriente en oscuridad es más intensa que en un fotodiodo. Su intensidad es esencialmente igual a I_{ce0} y suele estar comprendida entre el nano y el micro Ampere. Sin embargo la intensidad de colector de un fototransistor iluminado es unas β veces mayor que la de un fotodiodo similar. (Cirovic, 2003)

Los fototransistores son transistores de silicio con un orificio de entrada para la luz de unos pocos milímetros cuadrados. La luz llega al trayecto base-colector. Por su funcionamiento, el fototransistor tiene una sensibilidad a la luz de 100 a 500 veces superior a la de un fotodiodo comparable. Cuando no incide la luz, el fototransistor se comporta como un transistor común y pasa sólo una pequeña corriente residual de colector-emisor en el orden de los nano Amperes. Cuando la luz penetra, se liberan portadores de carga en la transición PN que incrementan la conductividad de la capa de barrera, el fototransistor se convierte entonces en un mejor conductor, logrando una sensibilidad elevada trabajando con base abierta. (Bastian, 1996)

Capítulo 4. Diseño, fabricación e integración de un interferómetro tipo Michelson.

En este capítulo se describe el diseño, fabricación e integración de un sistema de medición de desplazamientos lineales basado en interferometría láser; este interferómetro consta de tres sistemas que son: el sistema *óptico* que está conformado por una fuente de luz láser, un divisor de haz y tres retro reflectores encargados de generar la interferencia usando una configuración tipo Michelson, el sistema *mecánico* es un juego de soportes encargado de mantener alineado y protegido al sistema óptico mientras que el *electrónico* detecta los haces de luz interferidos y los transforma en señales eléctricas que son procesadas y traducidas en información sobre los desplazamientos; además una interfaz computacional envía la información a una P.C. para su captura y posterior análisis.

Los tres sistemas se encuentran estrechamente relacionados y son de igual importancia para el funcionamiento del interferómetro como lo ilustra la Figura 4.1; por otro lado la metodología de diseño no es un proceso lineal y considera las necesidades de los tres sistemas simultáneamente, a continuación se describe en un breve resumen el proceso seguido durante el desarrollo del trabajo dejando en las secciones siguientes la descripción detallada de cada sistema.

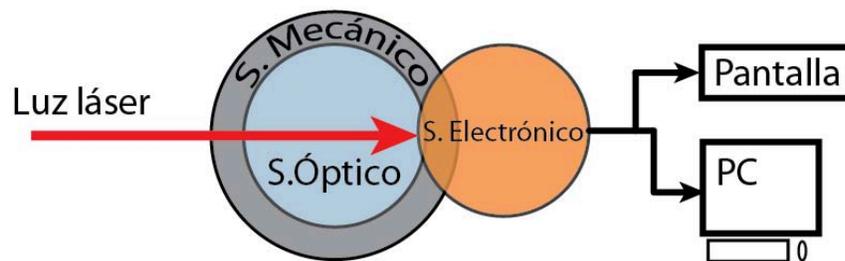


Figura 4. 1 Relación de los sistemas del interferómetro para la medición de desplazamientos

El sistema óptico está conformado por un grupo de elementos como divisores de haz, reflectores y polarizadores que siguen la trayectoria óptica propuesta por el GMM en 2011, sobre este arreglo óptico se diseñó un conjunto de soportes para agrupar, alinear y proteger la mayor cantidad de elementos posible, se realizaron tres propuestas basadas en la trayectoria experimental y una cuarta donde se replanteó la posición de varios elementos para facilitar la alineación durante la puesta en marcha sin alterar la trayectoria de interferencia dando origen a un sistema optomecánico semintegrado.

Se realizó una investigación sobre el fenómeno de polarización de la luz junto con una serie de pruebas de caracterización para películas polarizadoras con el propósito de obtener la cuadratura de las señales de interferencia y la detección de sentido de desplazamiento así como el aumento en la resolución del sistema.

Respecto al sistema electrónico, se diseñó un nuevo circuito de acondicionamiento de señales que controla los efectos indeseados de ruido electrónico y corriente oscura, se acopló a un circuito integrado para contar los cruces por cero, el procesamiento de la información del conteo se programó en un micro controlador el cuál muestra la información decodificada en una pantalla y la envía a una P.C. con la ayuda de una interfaz computacional que administra la transferencia de datos y los almacena en hojas de cálculo.

Finalmente, las pruebas de caracterización del sistema se realizaron en el laboratorio de metrología del CCADET donde las lecturas del prototipo se compararon directamente con las mediciones realizadas con el equipo de interferometría *HP 5508A*.

4.1 Sistema Optomecánico.

En un interferómetro, la interferencia de la luz se logra gracias a la trayectoria que generan los dispositivos del sistema óptico, para mantener su posición y no perder la alineación se utiliza un sistema de soportes mecánicos; existen dos vertientes en el modo en que los dispositivos ópticos de un interferómetro son alineados, por un lado los sistemas orientados al estudio y desarrollo lo hacen con monturas especialmente diseñadas para ajustar la posición de hasta tres ejes, estas monturas a su vez son instaladas en mesas ópticas con suspensión neumática; por otro lado, los sistemas comerciales procuran agrupar los componentes de la manera más compacta posible para ahorrar espacio y mantenerlos alineados y seguros.

En este trabajo se decidió dar un paso hacia la integración mediante el diseño y fabricación de un juego de soportes que mantuviera al sistema óptico alineado de manera semipermanente, el diseño del sistema mecánico conlleva la consideración del sistema óptico en todo momento, por lo que debido a tal cercanía se le llamó sistema optomecánico. La trayectoria óptica seleccionada es la del arreglo experimental propuesto en 2011 por el GMM que se observa en la Figura 4.2, los elementos que lo conforman se enlistan en la Tabla 4.1 .

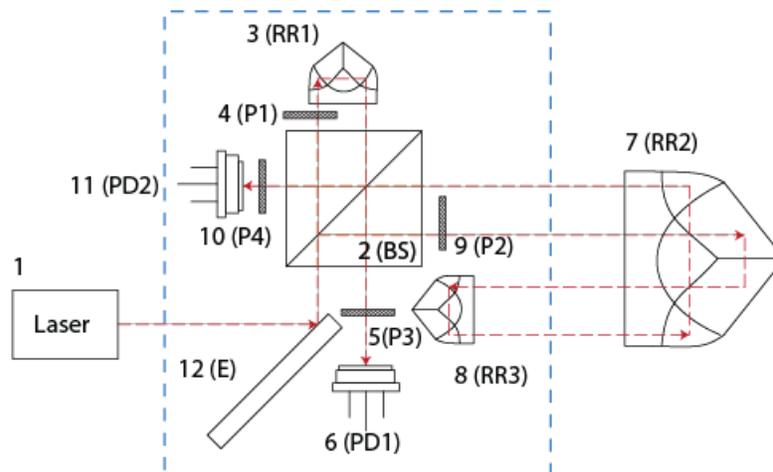


Figura 4 . 2 Trayectoria experimental usada en 2011

Tabla 4 . 1 Elementos que conforman el sistema óptico

No	Código	Descripción
1	LT	Tubo láser <i>Melles Griot</i> "05-LHR-151" He-Ne de 15 mW, $\lambda = 632.8$ nm no polarizado con puntero de 0.8 mm de diámetro.
2	BS	Divisor de haz <i>Thorlabs</i> "BS016" no polarizado de 20x20x20 mm fabricado con vidrio NBK7.
3	RR1	Retro reflector <i>Thorlabs</i> "PS970" de 10 mm de diámetro fabricado con vidrio NBK7.
4	P1	Polarizador lineal a 90°.
5	P3	Polarizador lineal a -45°.
6	PD1	Foto detector <i>Thorlabs</i> "FDS100" con 13 mm ² de superficie de detección.
7	RR2	Retro reflector <i>Thorlabs</i> "PS71" de 24.5 mm de diámetro fabricado con vidrio NBK7.
8	RR3	Retro reflector <i>Thorlabs</i> "PS970" de 10 mm de diámetro fabricado con vidrio NBK7.
9	P2	Polarizador lineal a 0°.
10	P4	Polarizador lineal a 45°.
11	PD2	Foto detector <i>Thorlabs</i> "FDS100" con 13 mm ² de superficie de detección.
12	E	Espejo plano <i>Thorlabs</i> "ME1-G01" de 24.5 mm de diámetro.

Las consideraciones del sistema óptico para el diseño del sistema mecánico se reconocieron como la trayectoria de interferencia, las dimensiones de cada elemento del sistema óptico, sus zonas operativas así como el diámetro del puntero láser. Las zonas operativas de los dispositivos se identifican como la porción de su geometría con la que realizan su función, en el caso del divisor de haz son las cuatro caras laterales de 20 mm por arista, para los reflectores es la cara circular de 10 mm y 25.4 mm de diámetro respectivamente, para los foto detectores es la superficie de detección de 3.6 mm por lado y para el espejo la cara circular reflejante de 25.4 mm de diámetro; el haz de luz láser recorre la trayectoria de interferencia en el plano de operación que se definió a la mitad de la altura del divisor de haz BS como se muestra en la Figura 4.3, por lo que el resto de los dispositivos debían alcanzar este nivel.

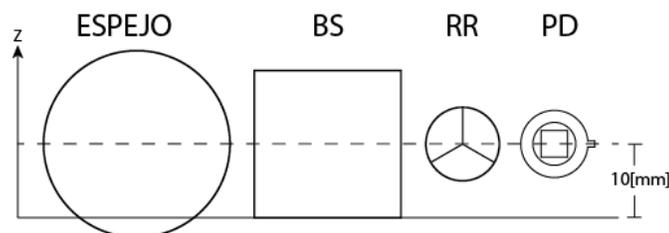


Figura 4 . 3 Plano de operación de la trayectoria óptica

Los soportes además de ubicar las zonas operativas de cada dispositivo del sistema óptico en el plano de operación, los sujetan, protegen y restringen; en el

caso de los RR y PD se decidió usar soportes con cajas circulares como se muestra en la Figura 4.4 a, los cuales disminuyen el área operativa de RR1 y RR3 de 10 a 9 mm y de 25.4 a 23.4 en RR2, mientras que para los PD la superficie de detección no se ve alterada por el soporte como se observa en la Figura 4.4 b.

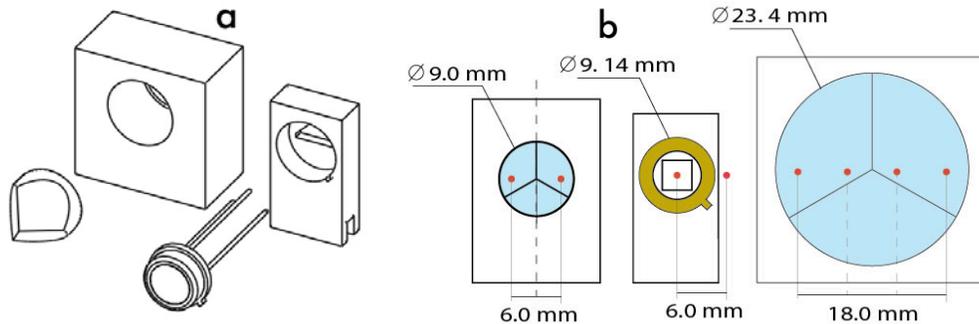


Figura 4.4 a. Soportes circulares para los RR y PD, b. Zonas operativa de los dispositivos y reflexión del haz en zonas operativas

En RR1 y RR3 hay un haz incidente y uno reflejado, mientras que en RR2 hay dos haces incidentes y dos reflejados, considerando que el diámetro del puntero láser es de 0.8 mm, las reflexiones debieron ser distribuidas para que los haces interferidos incidieran sobre el área de detección de los PD que se encuentra a una en el centro de su empaque, se propuso entonces una separación de 6 mm entre el haz incidente y el reflejado como se observa en la Figura 4.4 b.

Con la ayuda del software modelador de sólidos *Solid Works* de *Dassault Systemes*, se dibujó y ordenó cada elemento del sistema óptico de acuerdo a su posición en la trayectoria de interferencia, Figura 4.5; la referencia visual del sistema completo alineado virtualmente, facilitó el diseño de los soportes al poder prever y corregir obstrucciones y desalineamientos ocasionados por algún elemento. Se realizaron cuatro propuestas de diseño para el sistema mecánico, cada una de éstas buscó cubrir las consideraciones geométricas mencionadas anteriormente, las propuestas fueron evaluadas de manera cualitativa directamente sobre los modelos virtuales debido a la limitación de tiempo para fabricar, probar y evaluar prototipos.

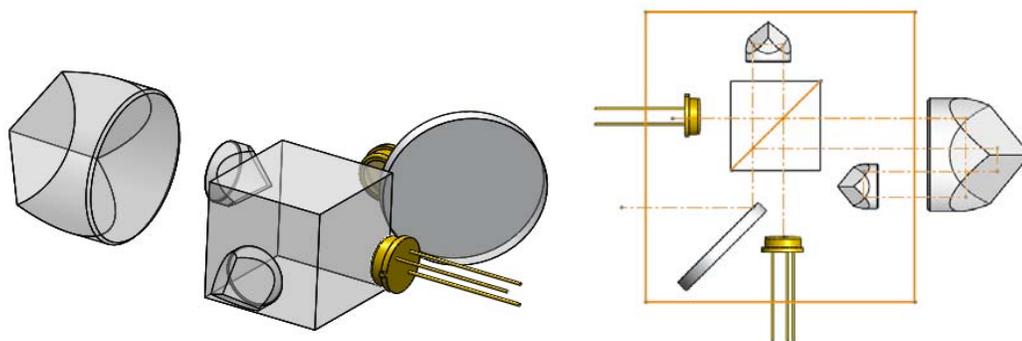


Figura 4.5 Componentes digitalizados del sistema óptico y alineación virtual

El primer diseño Figura 4.6 a, propuso restringir el BS con dos topes maquinados en una base y una prensa como se observa en la Figura 4.6 b, asegurar con prisioneros los RR y PD a sus soportes los cuales pueden ser ajustados lateralmente usando guías prismáticas también maquinadas en la base Figura 4.6 c, un soporte de tipo comercial para sujetar el espejo, el soporte está cortado debido a que la porción utilizada del espejo se encuentra en el extremo, Figura 4.6 d. Este diseño consta de doce piezas unidas por diez tornillos, su apariencia es similar a la de los arreglos experimentales, la fabricación de las piezas no presenta complicaciones pudiéndose realizar completamente en un centro de maquinado vertical.

El punto favorable de este diseño se encontró en la integración de cinco de los elementos del sistema óptico mediante una mesa que da referencia a sus soportes. Las desventajas son el grado de libertad otorgado a los soportes de los RR y PD, el soporte del espejo es inadecuado para sujetarse a la base su forma no es adecuada para utilizar un extremo del espejo, finalmente el método para posicionar y sujetar al BS lo deja propenso a daños y desalineamientos; se decidió entonces hacer correcciones a los problemas encontrados.

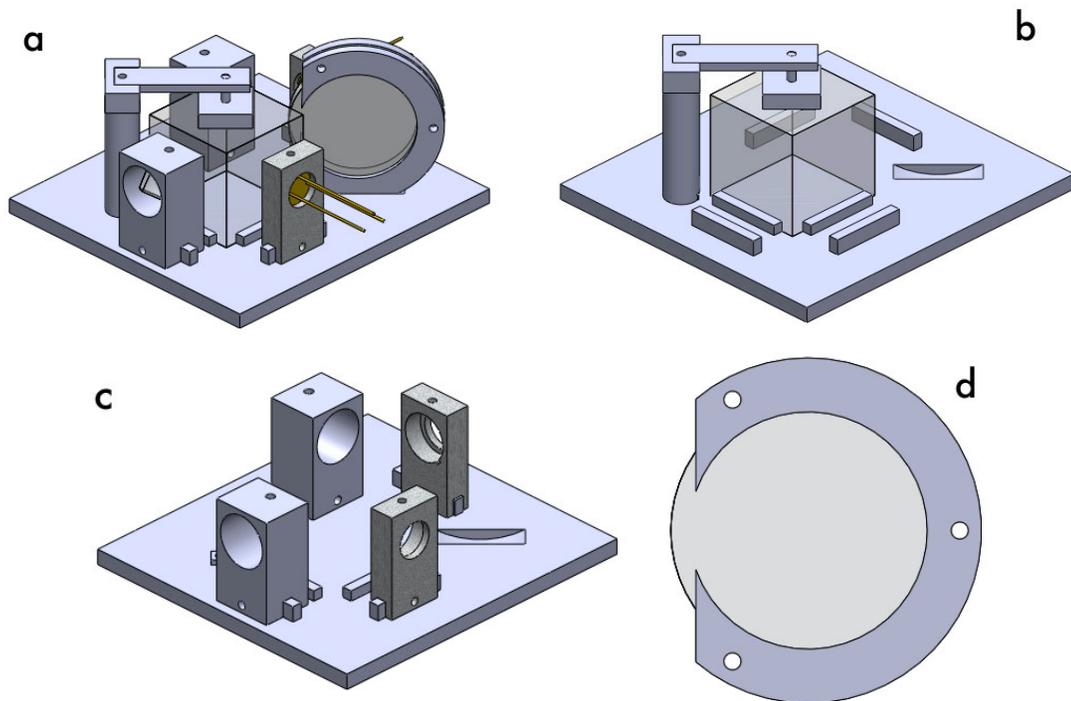


Figura 4 . 6 Propuesta 1, a. Vista isométrica, b. Sujeción del BS, c. Sujeción de RR y PD con ajuste lateral, d. Soporte del espejo

Las modificaciones a la primer propuesta que se muestran en la Figura 4.7 a, incluyen el rediseño del soporte para el espejo, el cual permite integración a la base y el completo uso del diámetro del espejo como se observa en la Figura 4.7 b, en la base se sustituyeron las guías para el ajuste lateral de los soportes de los RR y PD por maquinados que los restrinjan completamente, se añadieron canales para conducir el cableado de los PD y una línea de referencia para facilitar la alineación, estos maquinados se observan en la Figura 4.7 c, por otro lado se mantuvo el uso de prisioneros para sujetar los RR y PD a sus soportes así como el mecanismo de sujeción para el BS lado la sujeción del BS. El número de piezas es de trece y requiere 12 tornillos para ensamblarse.

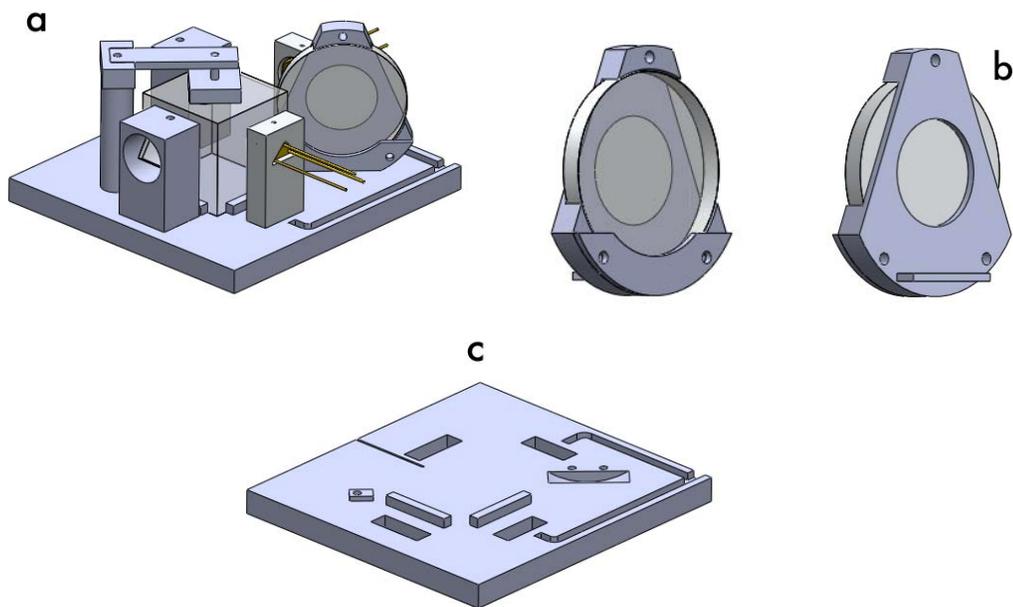


Figura 4 . 7 Modificaciones de la primer propuesta, a. Vista isométrica, b. Nuevo diseño del soporte del espejo, c. Modificaciones en la base

El principal inconveniente de ésta propuesta es la fabricación del soporte para el espejo y los cortes en ángulo recto de la base, si bien sería posible realizar una modificación para usar un cortador de radio pequeño y solucionar este inconveniente, los problemas detectados anteriormente en torno a BS persisten y la integración del sistema no presenta mejoras significativas, por lo que la propuesta fue rechazada.

El esquema isométrico del segundo diseño se muestra en la Figura 4.8 a. Este diseño elimina el espejo sin modificar la trayectoria de interferencia, por lo que la posición del tubo láser se encuentra a noventa grados del brazo de medición, Figura 4.8 b; se propone un soporte de una sola pieza para restringir el BS resaltado en color rojo en las Figuras 4.8 a y b; los soportes de RR1 y PD1 se ensamblan con el nuevo soporte del BS; la base mantiene las características del diseño anterior y añade tres barrenos que se aprecian en las Figuras 4.8 b y c para usar tornillos niveladores que le otorgan la capacidad de colocarse en cualquier superficie aunque ésta no sea perfectamente horizontal. El diseño consta de seis piezas y requiere ocho tornillos para ensamblarse.

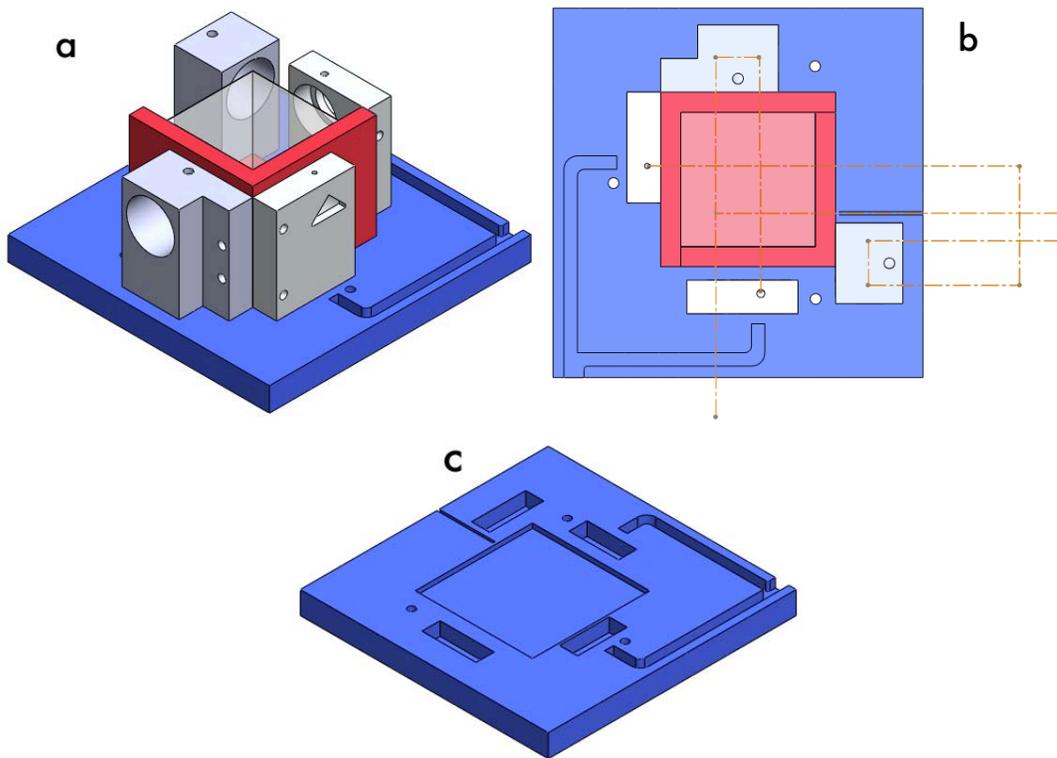


Figura 4 . 8 Tercer propuesta de soportes, a. Isométrico, b. Trayectoria de interferencia sin espejo c. restricciones para soportes y nivelación en la base

En este diseño propone una mayor integración entre las piezas del sistema, sin embargo los ángulos rectos interiores del soporte para el BS son un inconveniente de manufactura, se plantearon modificaciones al diseño para hacerlo viable desde el punto de vista de la manufactura.

La modificación realizada consiste en la división del soporte del BS en partes ensamblables, se añadió una pared con la que puede integrarse el soporte de PD2, las piezas se observan en la Figura 4.9 a y b resaltadas en color verde, rojo y lila; la base se mantuvo prácticamente sin cambios. Ésta modificación deja el diseño con ocho piezas y doce tornillos para el ensamble.

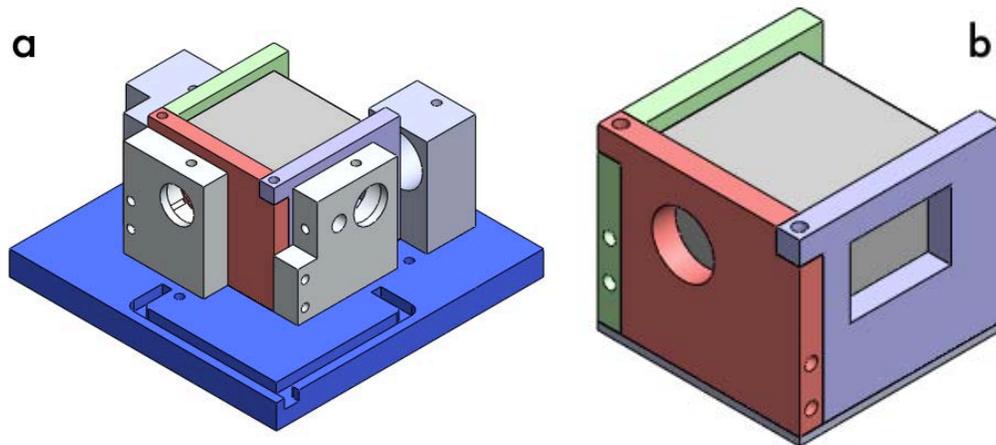


Figura 4 . 9 Modificaciones de la segunda propuesta, a. Vista isométrica, b. División del soporte del BS

Las modificaciones a la segunda propuesta de diseño incrementaron la integración de los soportes mecánicos y facilitaron su fabricación, sin embargo a pesar de lo aspectos favorables conseguidos, se decidió continuar con las propuestas con el fin de evaluar más de una solución viable.

El tercer diseño está pensado para ser fabricado con manufactura aditiva, se propone un único soporte para el BS, RR1, PD1 y PD2, este puede atornillarse a una base plana, Figura 4.10 a y b; se prescindió del uso de prisioneros para sujetar los RR, en su lugar se da soporte a las aristas de las esquinas de cubo desde la parte posterior que se observan en los puntos rojos de las Figuras 4.10 c y d con una tapa cónica que se muestra en la Figura 4.10 e .

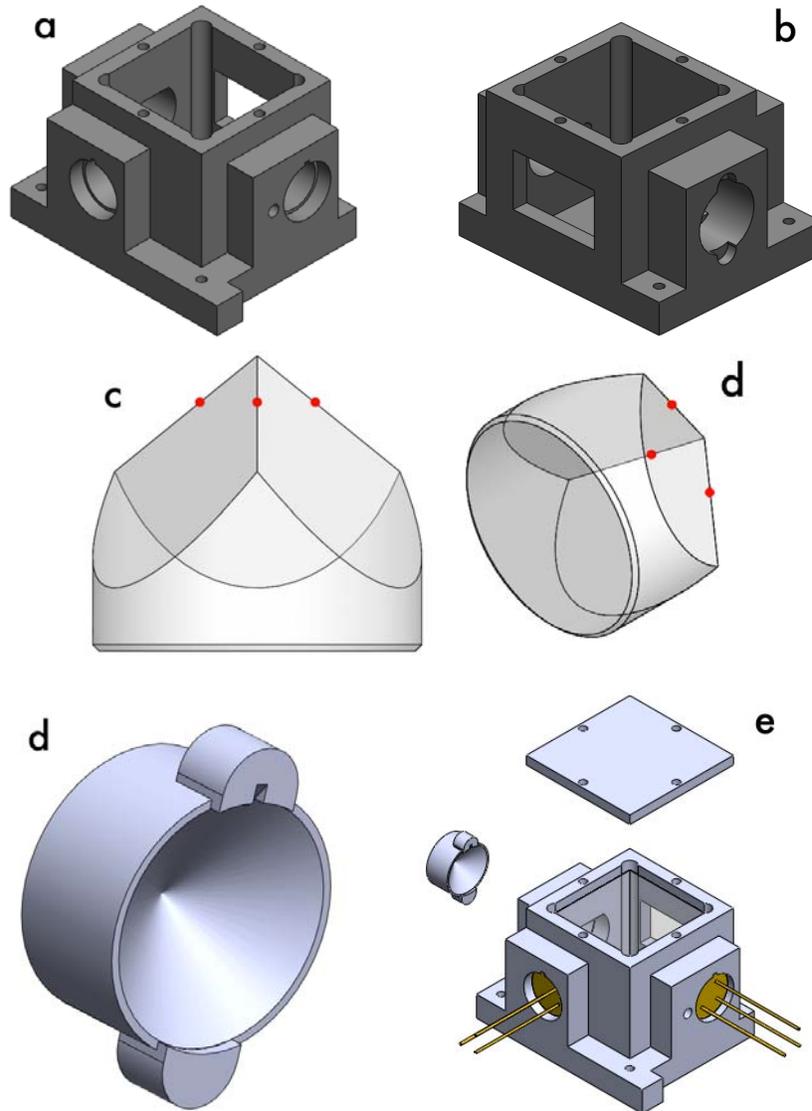


Figura 4 . 10 Tercer diseño para el sistema mecánico, a. Isométrico frontal, b. Isométrico posterior, c. Puntos de apoyo sobre las aristas del reflector, d. Tapa con apoyo cónico para los reflectores, e. Tapas y ensamble

Ésta propuesta de diseño logró la mayor integración de componentes hasta el momento, la manufactura aditiva ofrece la posibilidad de obtener los ángulos y geometrías requeridos para lograr un soporte que integra cuatro elementos al mismo tiempo, sin embargo como la construcción de las piezas se realiza

mediante adición de material en capas horizontales, una pieza fabricada mediante manufactura aditiva puede presentar variaciones dimensionales en alguna de sus longitudes.

Antes de hacer modificaciones al tercer diseño, generar nuevas propuestas o replantear el método de manufactura, se evidenció que alinear el tubo láser con el reflector del brazo de medición a noventa grados no es una tarea trivial, por lo que se propuso adoptar el método de alineación que utilizan algunos sistemas comerciales, este consiste en colocar el reflector frente al tubo láser y alinearlos a lo largo del recorrido de medición con la ayuda de una referencia, posteriormente se introduce el arreglo óptico para producir interferencia como lo ilustra la Figura 4.11 .

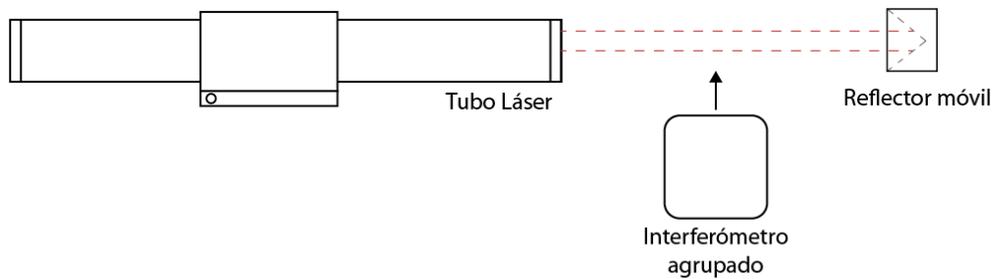


Figura 4 . 11 Procedimiento de alineación utilizado en sistemas comerciales HP y Renishaw

El arreglo óptico fue rediseñado para permitir el procedimiento de alineación, el centro de RR2 se desplazó 3 mm lateralmente de la salida del tubo láser teniendo como consecuencia una reflexión a 6 mm, el resto de los componentes modificaron sus posiciones y orientaciones para respetar la trayectoria de interferencia original; BS fue girado 90°, RR1 y PD1 invirtieron sus posiciones y RR3 fue localizado para completar la segunda reflexión en conjunto con RR2, los polarizadores fueron ubicados de acuerdo a su posiciones en el brazo de medición y referencia respectivamente; el resultado de éstos cambios se muestran en la Figura 4.12 .

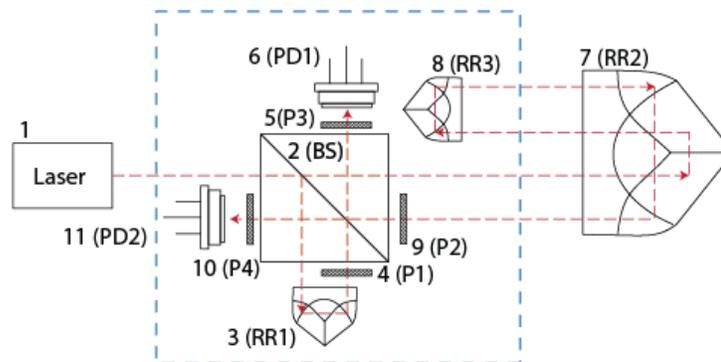


Figura 4 . 12 Arreglo óptico pensado para la alineación

Con la actualización en la disposición de los elementos ópticos se presentó una nueva propuesta para el sistema de soportes, este diseño retoma los aspectos favorables de las propuestas anteriores. En la Figura 4.13 a, se muestra la vista isométrica de la propuesta; en la Figura 4.13 b se muestra una base que sirve como referencia para el ensamble y alineación del resto de los soportes mediante un maquinado así como los canales para conducir el cableado de los foto detectores, los barrenos para nivelación fueron eliminados. El juego de soportes guarda similitud con la tercer propuesta pero está conformada con piezas ensamblables, la tapa cónica para dar soporte a los reflectores se separó en un empaque cónico y una tapa, Figura 4.13c; en la Figura 4.13 d, se observa el trazado óptico que corresponde a la nueva posición de los elementos del sistema óptico; en total la propuesta consta de catorce piezas y se ensambla con veintiún tornillos, la fabricación de los soportes está pensada para un centro de maquinado vertical, mientras que las tapas y empaques con manufactura aditiva.

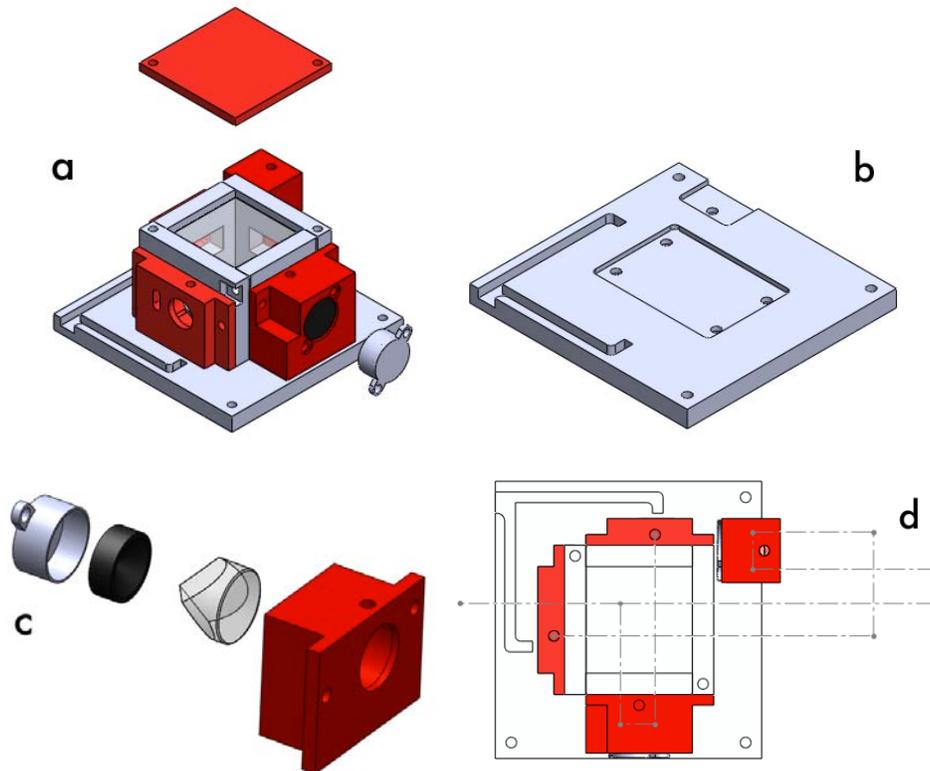


Figura 4 . 13 Cuarta propuesta de diseño para el sistema mecánico, a. Vista isométrica, b. Base con restricciones, c. Soporte para los reflectores tapa-empaque, d. Trayectoria óptica

Las características de la cuarta propuesta se consideraron adecuadas para llevarla a un prototipo funcional, en la Figura 4.14 se muestra una vista explosionada del diseño mientras que en la Tabla 4.2 se enlistan las piezas del diseño, donde se puede notar que las piezas que llevan en su nombre la letra W forman la estructura que protege al BS, mientras que las piezas que llevan la letra S son los soportes para los reflectores RR y los foto detectores PD, por otra parte la letra L se utilizó para designar las tapas y la letra G para los empaques.

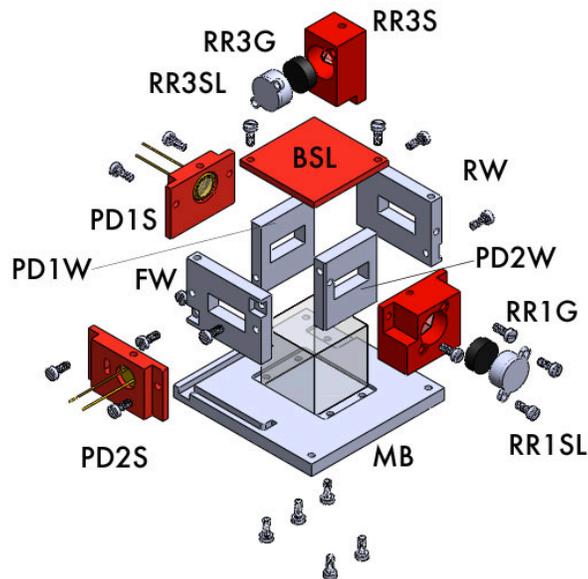


Figura 4 . 14 Vista explosionada de la cuarta propuesta de sistema optomecánico

Tabla 4 . 2 Listado de piezas del prototipo de sistema mecánico

Nombre	Función
<i>MB</i>	Sirve de referencia a todas las otras piezas y las restringe mecánicamente.
<i>FW</i>	Restringe y protege la cara frontal de BS.
<i>PD1W</i>	Restringe y protege una cara lateral de BS.
<i>PD2W</i>	Restringe y protege una cara lateral de BS.
<i>RW</i>	Restringe y protege la cara posterior de BS.
<i>BSL</i>	Protege la cara superior de BS.
<i>PD2S</i>	Permite la entrada del haz de luz y sujeta el fotodiodo del brazo móvil.
<i>RR1S</i>	Sujeta el retro reflector del brazo de referencia.
<i>PD1S</i>	Sujeta el diodo receptor del brazo de referencia.
<i>RR3S</i>	Sujeta el retro reflector del brazo móvil.
<i>RR1G,RR3G</i>	Empaque cónico, asegura la posición de los RR.
<i>RR1SL, RR3SL</i>	Ejerce presión sobre el empaque y retro reflector además de protegerlo.

Asumiendo que los componentes ópticos son perfectos, la capacidad de los soportes para mantener alineado al sistema óptico estará dada por las tolerancias dimensionales y los acabados de los procesos de manufactura utilizados, de manera puntual el paralelismo entre las superficies de contacto de los dispositivos ópticos con las superficies de los soportes es determinante para un correcto funcionamiento; se establecieron desviaciones máximas de 50 μm lateralmente y 0.5° angularmente.

Por otro lado, debido a que el material óptico se encuentra bajo el constante ataque de un haz de luz de alta energía, se consideró el comportamiento térmico del sistema optomecánico; por ejemplo atacar el BS durante una hora tendría

como consecuencia una expansión de 22.3 nm y alcanzaría en ese momento una disipación de 0.3 mW de acuerdo con el siguiente desarrollo.
La energía absorbida por el BS durante una hora es igual a la potencia del haz durante el tiempo que incida considerando la eficiencia óptica del elemento.

$$E_{absorbida} = P_{laser} t (1 - \eta) = (15 \times 10^{-3})(3600)(1 - 0.95) = 2.7 J$$

El BS experimentará entonces un aumento en su temperatura proporcional a la energía absorbida e inversamente proporcional a su masa y al coeficiente de calor específico de 0.858 J/g°C y a la densidad es de 2.51 g/cm³.

$$\Delta T = \frac{E_{absorbida}}{m c_{N-BK7}} = \frac{2.7}{(2^3)(2.51)(0.858)} = 0.1567 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Finalmente el BS se expandirá en consecuencia del aumento de la temperatura, como el BS es un cubo se tomó como la longitud inicial a una de sus aristas de 20 mm; el coeficiente de expansión térmica del vidrio es de 7.1 μm/m-°C .

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T = (7.1)(20 \times 10^{-3})(0.1567) = 0.0223 \text{ } \mu\text{m}$$

Al mismo tiempo el BS transmitirá calor a sus alrededores por conducción y convección, considerando que la conductividad térmica del vidrio es de 1.114 W/m²-K y que en total hay una superficie de contacto de 16.76 x 10⁻⁴ m², el calor transferido por conducción será.

$$Q_{conducción} = \lambda \Delta T = (16.76 \times 10^{-4})(0.1567) = 0.2926 \text{ } \text{mW}$$

El calor disipado por convección no pudo ser calculado, pues el coeficiente de convección natural se obtiene con una relación entre lo números de Prandtl y Grashof que a su vez están en función de las condiciones del aire alrededor del BS, sin embargo se sabe que los coeficientes de convección tienden a ser más pequeños que los de conducción así que considerando que la superficie donde se presenta la convección es de 7.24 x 10⁻⁴ m², se espera que la disipación total de calor no sobrepase los 0.5 mW.

La complejidad de un análisis térmico completo del sistema optomecánico se hace evidente al entender que mientras el haz láser esté incidiendo en los dispositivos ópticos, estos estarán ganando energía y disipándola a sus alrededores por conducción y convección hacia los soportes y los demás elementos del sistema, por lo que se supuso una condición extrema en el cambio de temperatura de 10°C para realizar cálculos de expansión lineal sobre la longitud crítica de cada elemento que se muestran en la Tabla 4.3 .

Tabla 4 . 3 Proyección de la expansión térmica lineal en los dispositivos ópticos

Elemento	α [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$]	L crítica	ΔT [$^\circ\text{C}$]	ΔL [μm]
BS (arista)	7.1	20	10	1.44
RR1 (diámetro)	7.1	10	10	0.72
RR3 (diámetro)	7.1	10	10	0.72
RR2 (diámetro)	7.1	25.4	10	1.83

Para evitar la presencia de esfuerzos y deformaciones con la expansión y contracción de los elementos ópticos, los soportes tendrán que ser fabricados con un material que pueda expandirse y contraerse de manera similar al vidrio N-BK7 con una capacidad igual o mayor para desalojar el calor; los materiales candidatos y sus propiedades térmicas se muestran en la Tabla 4.4 .

Tabla 4 . 4 Propiedades térmicas de los materiales candidatos (Matweb)

Material	α [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$]	λ [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]	c [$\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$]
Vidrio (Schott N-BK7)	7.1	1.114	0.858
Acero (AISI 1018)	11.5	51.9	0.486
Latón (UNS C27000)	20.3	116	0.380
Aluminio (6061-T6)	23.6	167	0.869
Acrílico (PMMA Extrudido)	72	0.19	1.47

Los valores de conductividad térmica de los materiales candidatos y los resultados del análisis térmico realizado para el BS indican que cualquiera podría desalojar apropiadamente el calor producido por la incidencia de luz; por otro lado se observa que el acero tiene el coeficiente de expansión térmica más cercano al del vidrio a pesar de lo cual se realizó un cálculo de expansión lineal considerando el mayor espesor de los soportes que es de 4 mm para estimar su expansión al fabricarse con los materiales candidatos, los resultados se muestran en la Tabla 4.5 .

Tabla 4 . 5 Proyección de expansión térmica de los materiales candidatos

Material	α [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$]	L crítica [mm]	ΔT [$^\circ\text{C}$]	ΔL [μm]
Acero	11.5	4	10	0.464
Latón	20.3	4	10	0.816
Aluminio	23.6	4	10	0.948
Acrílico	72	4	10	2.884

El cálculo de la mayor expansión para el espesor de los soportes fue de 2.884 μm usando acrílico, al combinarlo con la expansión de RR2 de 1.83 μm suman una reducción de 4.7 μm , por lo que una holgura de 50 μm en el maquinado de los soportes es suficiente para evitar esfuerzos y deformaciones en los elementos ópticos debido los efectos térmicos para cualquiera de los materiales candidatos.

De acuerdo con los cálculos realizados, cualquiera de los materiales candidatos es viable para fabricar el juego de soportes desde el punto de vista térmico, el acero destaca por presentar el menor índice de expansión sin embargo al ser propenso a la corrosión tendría que usarse alguna aleación inoxidable, darle algún tratamiento o recubrimiento que inevitablemente impactaría en aumentar el costo, disminuir la maquinabilidad y tener dificultades para asegurar las dimensiones finales de las piezas; por otro lado el aluminio no presenta los problemas asociados a la corrosión y a pesar de ser el segundo con mayor expansión tiene la mayor capacidad para disipar calor, estas cualidades lo convirtieron en el material seleccionado para fabricar el sistema mecánico.

Se decidió evaluar la funcionalidad del diseño con un prototipo de acrílico, los soportes fueron fabricados en un centro de maquinado vertical como se observa en la Figura 4.15, mientras que las tapas y empaques se fabricaron mediante manufactura aditiva de tecnología polyjet con material *Verowhite*.



Figura 4 . 15 Fabricación de los soportes del prototipo de sistema mecánico

Cada pieza fabricada del sistema mecánico fue medida con un calibrador *Mitutoyo* modelo 505-680 para asegurar que las dimensiones críticas estuvieran dentro de las tolerancias establecidas. En la Tabla 4.6 se observa que la diferencia de longitud en todas las piezas no supera los 50 μm .

Tabla 4 . 6 Lecturas de longitud “L” de las piezas manufacturadas

Pieza	Dimensión Nominal mm	Lectura 1 mm	Lectura 2 mm	Lectura 3 mm	Diferencia μm
MB	52	51.98	51.96	51.98	40
FW	28	27.95	27.95	27.95	50
PD1W	20	19.99	19.98	19.98	20
RR1W	20	19.95	19.95	19.96	50
RW	28	27.99	27.99	28	10
PD1S	24	24.03	24.01	24.03	30
PD2S	28	27.99	27.98	27.98	20
RR1S	24	24.03	24.05	24.05	50
RR3S	12	12.01	12.02	12.05	50

En la Tabla 4.7 se observan variaciones en la altura de FW y RR1W siendo hasta 60 μm más cortas, dicho error podría afectar únicamente el nivel de la tapa BSL sin consecuencias para el alineamiento del material óptico, pues las ventanas de ambas piezas son suficientemente amplias para permitir el paso del láser a pesar de la variación.

Tabla 4 . 7 Lecturas de altura “A” de las piezas manufacturadas

Pieza	Dimensión Nominal mm	Lectura 1 mm	Lectura 2 mm	Lectura 3 mm	Diferencia máxima μm
MB	50	50.04	50.02	50.02	40
FW	21	20.95	20.94	20.97	60
PD1W	22	21.97	21.96	21.96	40
RR1W	22	21.94	21.95	21.95	60
RW	21	20.98	20.97	20.98	30
PD1S	16.5	16.51	16.48	16.46	40
PD2S	16.5	16.46	16.45	16.48	50
RR1S	17.5	17.5	17.48	17.5	20
RR3S	19	19.03	19.04	19.04	40

En la tabla 4.8 se muestran las lecturas del espesor, donde las piezas designadas con la letra W dan estructura y referencia a los soportes, en ellas el espesor tiene la mayor relevancia por lo que la variación de 80 μm en RW podría ocasionar algún desalineamiento, por otro lado la variación de espesor en las piezas reconocidas con la letra S no es de gran impacto, pues los reflectores son capaces de absorber el desalineamiento angular; la diferencia respecto a la dimensión nominal de espesor en PD2S es de 90 μm , sin embargo la variación entre las lecturas no supera los 20 μm , por lo que se utilizó sin inconveniente.

Tabla 4 . 8 Lecturas de “E” espesor de las piezas manufacturadas

Pieza	Dimensión Nominal mm	Lectura 1 mm	Lectura 2 mm	Lectura 3 mm	Diferencia máxima μm
MB	5	4.98	5.01	4.99	20
FW	4	4.05	4.05	4.05	50
PD1W	3.5	3.55	3.52	3.51	50
RR1W	3.5	3.52	3.52	3.5	20
RW	4	4.08	4.06	4.06	80
PD1S	5	5.05	5.05	5.04	50
PD2S	5	5.07	5.08	5.09	90
RR1S	11	11.005	11.005	11.005	5
RR3S	11	10.99	10.98	11	20

En la Tabla 4.9 se presentan las lecturas de los maquinados internos que en el caso de MB sirve de referencia para el resto de las piezas, y en los soportes se utilizan para albergar a los reflectores y foto detectores como se muestra en color verde en la Figura 4.16; la base y los soportes de los reflectores están dentro de la tolerancia de 50 μm , mientras que los soportes de los detectores la exceden en 10 μm , sin embargo la superficie de detección podría tolerar desviaciones cien veces mayores sin problema alguno.

Tabla 4 . 9 Lecturas cavidades para los soportes de los reflectores y foto detectores

Pieza	Dimensión Nominal mm	Lectura 1 mm	Lectura 2 mm	Lectura 3 mm	Diferencia μm
MB	1	1.02	1.02	1.02	20
PD1S	9.24	9.3	9.3	9.3	60
PD2S	9.24	9.3	9.3	9.3	60
RR1S	10.1	10.15	10.15	10.15	50
RR3S	10.1	10.15	10.15	10.15	50

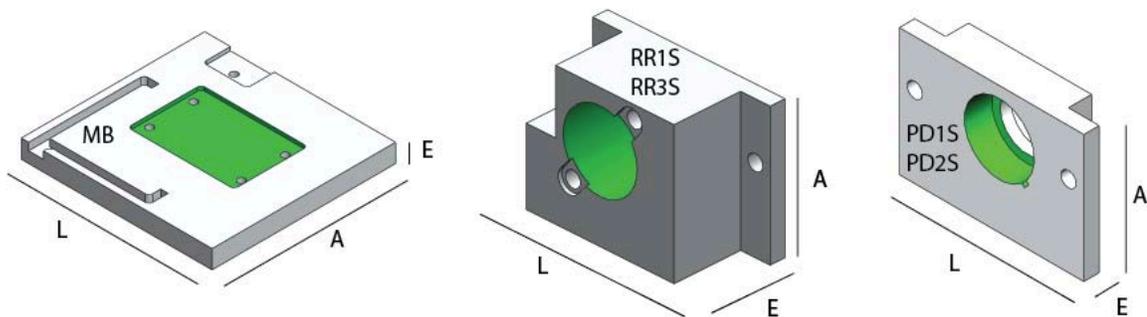


Figura 4 . 16 Dimensiones consideradas para la medición de las piezas del sistema mecánico, en color verde resaltan los maquinados internos

Una vez que se contó con todas las piezas, el prototipo optomecánico fue ensamblado como se muestra en la Figura 4.17, se procedió a realizar una prueba de funcionalidad que consistió en confirmar la capacidad del sistema para producir interferencia, ésta se realizó en las instalaciones del GMM con la ayuda de una mesa neumática, un soporte para el tubo láser, la MMH 2007 que funcionó únicamente como un accesorio para la evaluación del sistema de interferometría, un circuito electrónico y un osciloscopio.

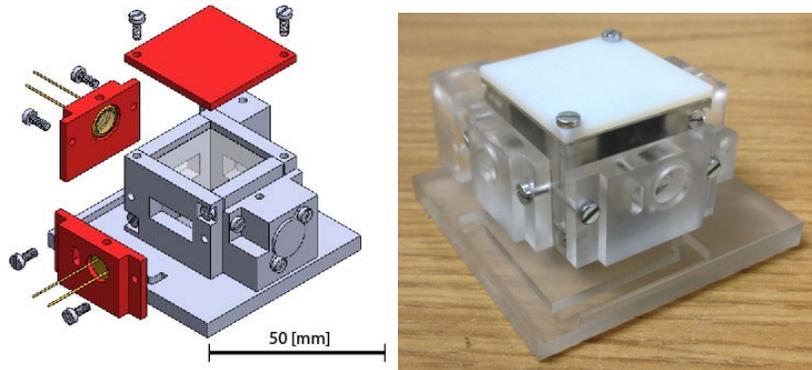


Figura 4 . 17 Ensamble del prototipo de sistema mecánico

Sobre la mesa neumática se montaron la MMH y un soporte con el tubo láser, el reflector móvil RR2 se alineó con el láser una vez que fue colocado sobre el carro del eje Z de la MMH, finalmente con la ayuda de una mesa magnética, barras paralelas y algunas calzas se llevó el sistema optomecánico hasta el nivel donde se encontraba el haz la luz como se muestra en el esquema de la Figura 4.18 a, el sistema alineado se observa en la Figura 4.18 b.

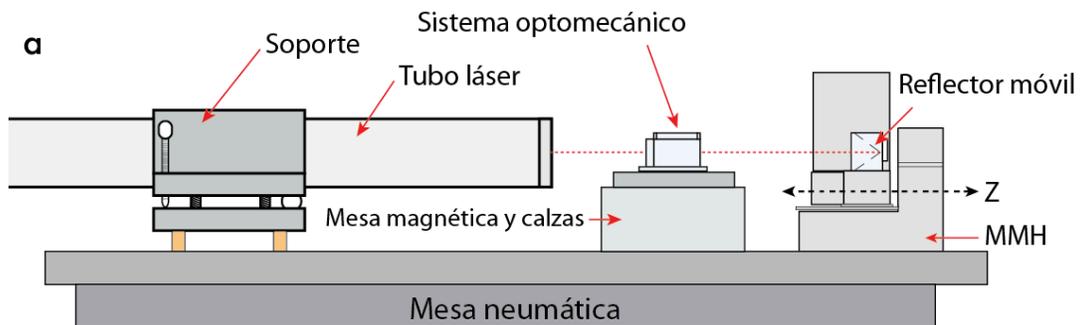


Figura 4 . 18 a. Esquema del montaje del sistema de interferometría, b. Fotografía del sistema alineado.

Para visualizar los efectos de la interferencia, a cada foto detector conectado en polarización inversa se le colocó un resistor de carga como se muestra en la Figura 4.19, la corriente que circula a través de los detectores producirá una diferencia de potencial proporcional a la resistencia eléctrica la cuál se observó en la pantalla del osciloscopio Tektronics modelo “MSO 2024B”.

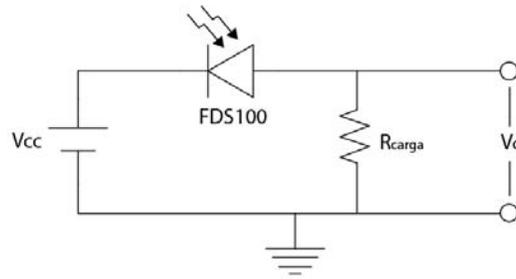


Figura 4 . 19 Circuito convertor de corriente a voltaje para la prueba de operación del prototipo de interferómetro

Cuándo el reflector del brazo de medición se encuentra estático, las señales de tensión mantienen su magnitud, sin embargo al desplazarse los efectos de la interferencia generan un par de señales oscilatorias como las que se observa en la Figura 4.20, donde en color azul se distingue la respuesta del brazo de referencia y en amarillo la del brazo de medición durante tres cambios de sentido en el desplazamiento encerrados en rojo; cabe mencionar que en la captura de pantalla puede observarse también que las señales se encuentran desfasadas medio ciclo pues hasta ese momento no se habían incluido las películas polarizadores para ajustar la fase de las señales.

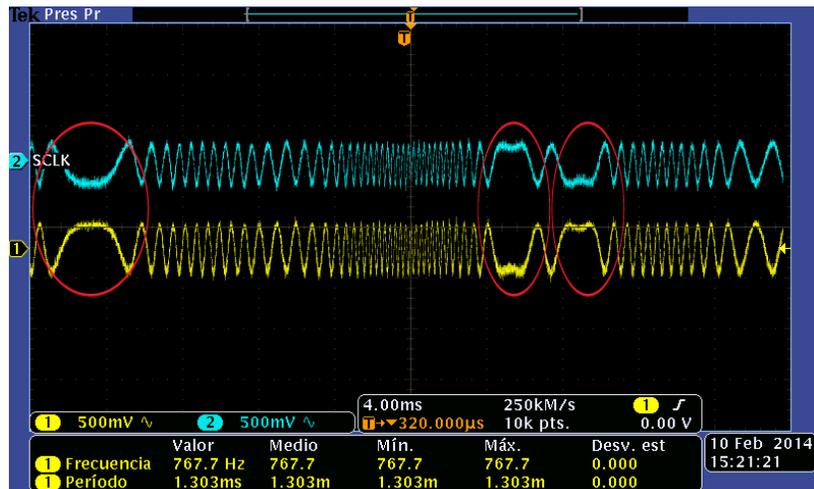


Figura 4 . 20 Señales de tensión producidas por la interferencia en los brazos de referencia durante tres cambios de sentido

Para alinear el sistema por primera vez se ocuparon ocho horas repartidas en dos días de trabajo, se identificó que la tarea de llevar el sistema optomecánico hasta la trayectoria del haz consume la mayor cantidad de tiempo y seguido por el procedimiento de alinear el tubo láser con el reflector móvil; entonces se propusieron herramientas que facilitarían las dos etapas del procedimiento de alineación y permitirían disminuir el tiempo de la puesta en marcha del sistema.

Recordando que el prototipo optomecánico no cuenta con un sistema de nivelación integrado, se diseñó y fabricó una base de acero con cuatro patas de apoyo que permiten regular la altura del sistema y nivelarlo en dos ejes, además la masa de la base aumenta la estabilidad del prototipo. En la Figura 4.21 a se observa el diseño de la base, esta posee un maquinado para restringir al prototipo optomecánico, en la Figura 4.21 b c y d aprecia la base niveladora en operación con el resto del sistema.

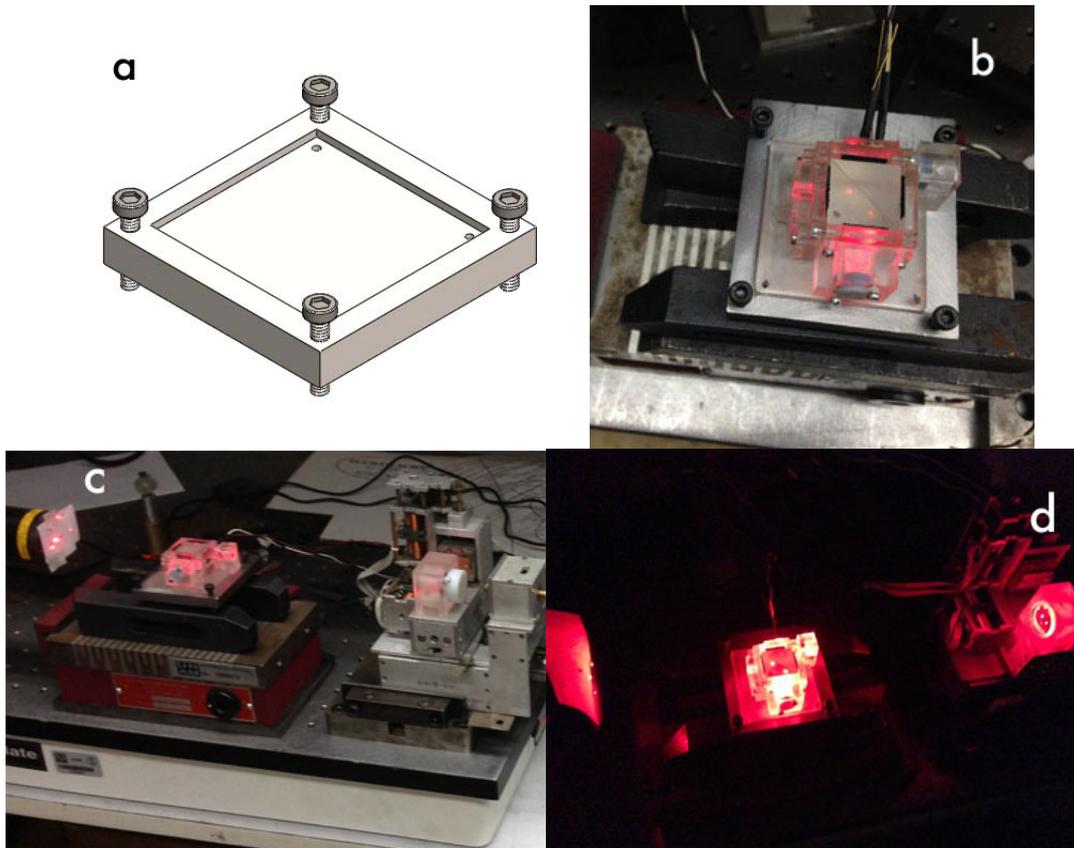


Figura 4 . 21 a. Diseño de la mesa de alineación para el prototipo optomecánico, b. Sistema optomecánico alineado, c. Interferómetro alineado, d. Interferómetro alineado en condiciones de baja iluminación.

Para facilitar la etapa de alineación del tubo láser con el reflector móvil se diseñó y fabricó el accesorio para el tubo láser que se muestra en la Figura 4.21 a, está compuesto por una superficie con dos orificios que se aprecian en las figuras 4.21 b y c, el primero es concéntrico con la salida del haz, mientras que el segundo localizado 6 mm a la derecha sirve como referencia, lograr que el haz reflejado por RR2 incida dentro del orificio de referencia durante todo el recorrido de medición indica que el tubo láser está alineado con el reflector; un aro sujeta el dispositivo al tubo láser con un broche de presión que se regula con un tornillo; tres brazos se apoyan en la cara transversal del tubo láser con las superficies resaltadas en verde la Figura 4.22 c, buscando mantener el paralelismo con la

superficie de los orificios, uno de los brazos tiene una cavidad pensada para un nivel de burbuja como se observa en la Figura 4.22 a.

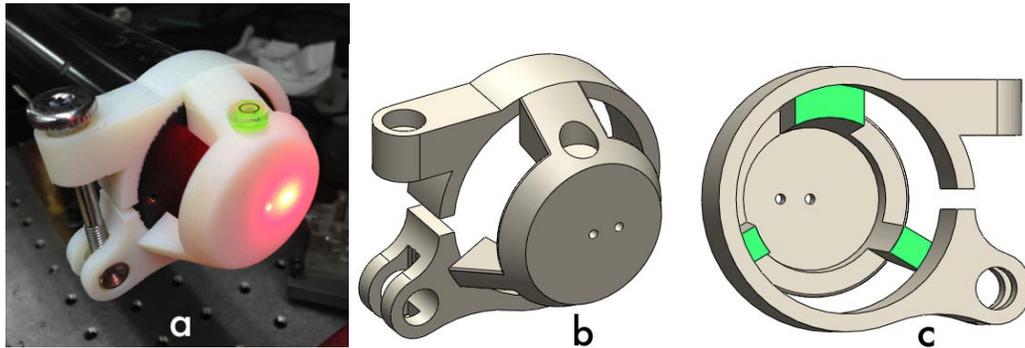


Figura 4 . 22 Accesorio para la alineación del tubo láser y el reflector móvil

La implementación de la base niveladora y el dispositivo de referencia para el tubo láser permitieron disminuir el tiempo de alineación a menos de treinta minutos, adicionalmente la calidad de las señales eléctricas mejoró como consecuencia de una mayor incidencia de luz en los detectores. Para determinar si el sistema podía mantener la alineación, los componentes del sistema de interferometría fueron alineados y dejados en reposo con el tubo láser apagado durante un periodo de tres días, tras los cuales al reactivar la fuente de luz, la calidad de las señales se mantuvo sin cambios.

En este punto el prototipo se consideró capaz de cumplir su propósito de mantener la interferencia de un haz de luz láser utilizando un sistema optomecánico semintegrado y herramientas que facilitan su alineación durante la puesta en marcha, el siguiente paso en el desarrollo fue la búsqueda de la cuadratura de las señales para determinar el sentido de desplazamiento del reflector móvil.

4.2 Cuadratura de las señales.

Para determinar el sentido de desplazamiento del reflector móvil es necesario que las señales de los brazos de referencia y medición se encuentren en cuadratura, es decir desfasadas un cuarto de ciclo; debido a la naturaleza del arreglo óptico el desfase entre las señales es de 180° o medio ciclo, por lo que se procedió a retrasar el haz del brazo de referencia con las películas polarizadoras lineales de acuerdo al arreglo original, como resultado se observaron modificaciones en la intensidad de las señales pero no en sus fases.

Un primer acercamiento al comportamiento electromagnético de la luz, en particular la relacionada con el efecto de polarización, reveló que un arreglo con polarizadores lineales no modificaría la orientación del campo eléctrico de un haz de luz y que por otro lado, una onda luminosa retardada un cuarto de ciclo presenta un estado de polarización circular, por lo que se pretendió obtener el retardo deseado a partir de un haz de luz polarizado circularmente.

Se planteó la combinación de un polarizador lineal con uno circular para obtener el efecto deseado, sin embargo para asegurar que el haz resultante estuviera circularmente polarizado, se planteó utilizar un arreglo “polarizador-analizador” sabiendo que la componente de campo eléctrico de un haz polarizado circularmente no sufrirá alteración alguna si atraviesa un polarizador lineal, el arreglo se ilustra en la Figura 4.23 .

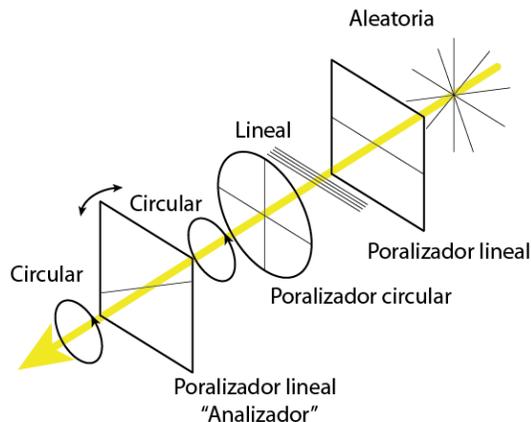


Figura 4. 23 Experimento de caracterización de polarizadores

En la figura 4.24 a, se muestra el diseño del dispositivo utilizado para montar las dos películas polarizadoras que al mismo tiempo permite ajustar y mantener un ángulo entre ellas, este dispositivo fue fabricado con poliamida en un centro de maquinado vertical; el arreglo se montó con una fuente de luz blanca, una platina giratoria graduada para montar el polarizador analizador y un detector de potencia lumínica PM1000 de Thorlabs como se observa en la Figura 4.24 b.

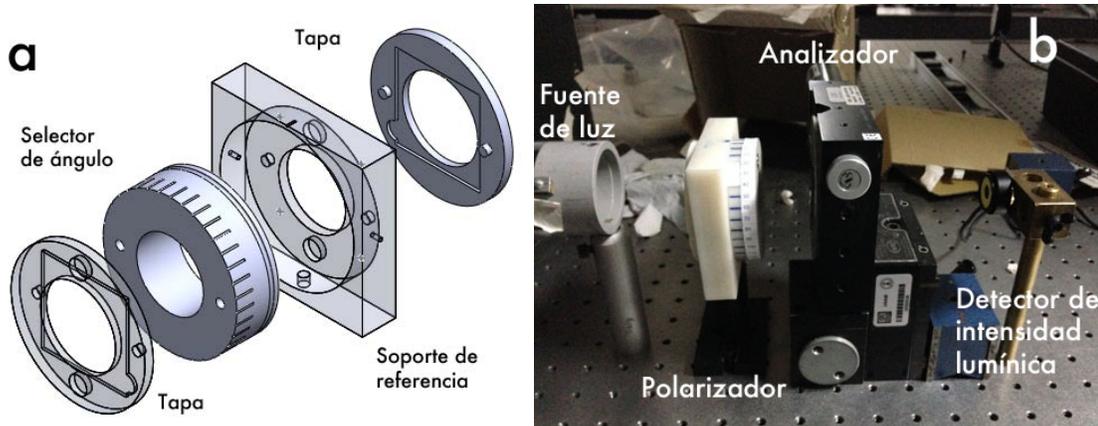


Figura 4 . 24 a. Dispositivo de pruebas polarizador-analizador, b. montaje experimental para la caracterización de polarizadores

Como primer polarizador lineal se utilizó uno de la marca *Thorlabs* modelo *LPVISE2X2*; como polarizadores circulares se adquirieron los modelos *CP100R* y *CP100L* comercializados por *3DLens* así como una película de la marca *Edmund Optics* con número de stock *88-085*; como analizador se utilizó un polarizador lineal de la marca *Polaroid*². Se encontró el ángulo con menor distorsión respecto a la media de potencia para cada polarizador circular, la película *CP100R* fue seleccionada por presentar el mejor comportamiento con un ángulo físico de 19°; los resultados se muestra a continuación en la Talba 4.10

Tabla 4 . 10 Resultados de la caracterización de películas polarizadoras

Película	Orientación del eje óptico	Potencia promedio	Error máximo	Desviación estándar
<i>CP100R</i>	19°	338.18 [μ W]	20.5 [μ W]	5.68
<i>CP100L</i>	57°	724.1 [μ W]	22 [μ W]	6.62
<i>88-085</i>	0°	749.68 [μ W]	44 [μ W]	15.37

Se montó el arreglo con el polarizador lineal *LPVISE2X2* y el polarizador circular *P100R* nuevo sin obtener el desfase deseado, demostrando que un haz de luz retardado $\frac{1}{4} \lambda$ tiene un estado de polarización circular, pero un haz polarizado circularmente no necesariamente tiene un retardo asociado.

Una investigación apenas superficial indicó que las “gafas 3D” que hacen posible el efecto de visión tridimensional en las salas de cine funcionan con una combinación de polarizadores y retardadores, esto llevó a probar un arreglo usando la película de éstas gafas consiguiendo un retardo de aproximadamente 80°. Debido a las variaciones en las tecnologías utilizadas para generar el efecto de visión tridimensional, no fue posible caracterizar ni corregir el error en el retardo hasta conseguir los 90°.

² Sin modelo o número de serie disponible

Como se mencionó en el capítulo anterior, un interferómetro homodino determina los desplazamientos contando los cambios de signo o “cruces por cero” de la señal eléctrica generada por los detectores debida a la interferencia de la luz; si además es un interferómetro con capacidad de diferenciar el sentido de desplazamiento, contará con un par de señales desfasadas 90° entre si, que generarán dos secuencias distintas dependiendo del sentido de desplazamiento además de duplicar la resolución ya que el número de cruces por cero también se duplica. La Figura 4.25 muestra el esquema de un par de señales desfasadas 80° entre ellas, teniendo en cuenta que en una señal periódica λ equivale a 360° , una diferencia de -10° en el desfase equivale a un error de $-\lambda/36$ en la información de un desplazamiento; sin embargo el siguiente cruce por cero ocurrirá con un desfase de 100° , es decir que tendrá un diferencia de $+10^\circ$ equivalentes a un error de $+\lambda/36$ compensando el error anterior, estos eventos se repetirán en los siguientes dos cruces por cero para completar los 360° de la fase. Considerando que la longitud de onda empleada es de 632.8 nm , el desfase de 80° generará una incertidumbre en la medición de $\pm 17.58 \text{ nm}$ con el 50% de probabilidad dependiendo si el conteo terminó en el primer o tercer cuarto de ciclo y de la dirección de desplazamiento del reflector móvil

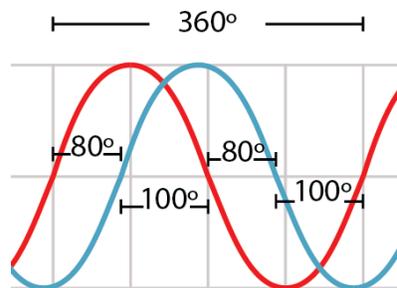


Figura 4 . 25 Desfasamiento de 80° en las señales de interferencia

A pesar de que la incertidumbre está presente en todas las mediciones, el error es no acumulativo; además se consideró aceptable para la caracterización de las MMH teniendo en cuenta que la resolución teórica es del modelo 2007 es de 140 nm por paso de motor, por lo que se prosiguió con el desarrollo del sistema electrónico.

4.3 Sistema Electrónico.

El sistema electrónico es el encargado de transformar los haces de luz interferidos en señales eléctricas para procesarlas y traducirlas en información sobre el desplazamiento del reflector móvil, de acuerdo a su función, el sistema electrónico se dividió en cuatro etapas como se muestran en la Figura 4.26; la etapa de detección transforma la luz en señales eléctricas, el acondicionamiento de señales filtra el ruido externo y adecua las señales para la etapa de conteo de franjas, donde se realiza un electrónico equivalente al proceso “a ojo” de contar los cambios de luz a sombra en el patrón de interferencia, finalmente en la etapa de procesamiento de datos se asocia el resultado del conteo de franjas con la longitud de onda de la luz utilizada para obtener el desplazamiento estimado del reflector móvil, finalmente este cálculo se muestra en una pantalla y es enviado a una P.C donde es posible almacenar la información.

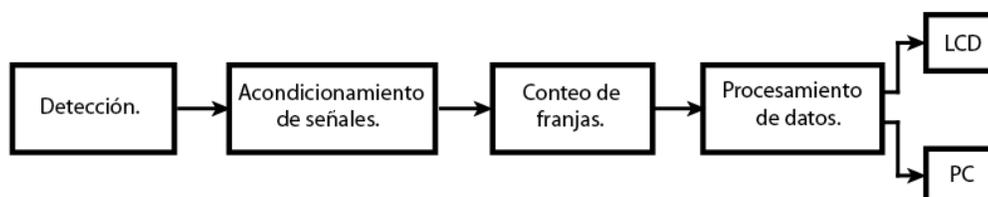


Figura 4 . 26 Etapas del sistema electrónico

4.3.1 Detección.

La detección es la etapa que conecta al sistema óptico con el electrónico, los elementos clave son los fotodiodos PD1 y PD2 al final de las trayectorias ópticas, los fotodiodos son transductores capaces de convertir la potencia lumínica de los haces interferidos en señales de corriente eléctrica de acuerdo al efecto foto eléctrico en semiconductores, los dispositivos seleccionados son los FDS100 de *Thorlabs* debido a su rango de operación, área de detección y precio como se observa en la comparación de la Tabla 4.11 .

Tabla 4 . 11 Detectores candidatos fabricados por *Thorlabs*

Dispositivo	FDS10	FDS100	FDS025	FDS02
Rango de operación	200-1100 [nm]	350-1100	400-1100	400-1100
Área activa	0.82 [mm ²]	13 [mm ²]	0.049 [mm ²]	0.049 [mm ²]
Empaque	TO-5	TO-5	TO-46	TO-46, FC/PC
Tiempo de levantamiento/caída	1 /1[ns] a 10V	10 /10[ns] a 20 V	47/246 [ps] a 5 V	47 /246[ns] a 20 V
Corriente Oscura	0.3 [nA] a 10V	1 [nA] a 20 V	35 [pA] a 5V	1 [nA] a20 V
Capacitancia de unión	6[pF] a 10V	24 [pF] a 20V	0.94 pF a 5V	24 [pF] a 20V
Precio	\$42.10 USD	\$13.10 USD	\$30.00 USD	\$146.60 USD

Existen alternativas para obtener una señal de tensión proporcional a la corriente eléctrica generada en los PD, sin embargo los efectos inherentes de capacitancia de unión y corriente oscura son indeseados por ser probables causas de conteos en falso. Se probaron dos circuitos propuestos por *Texas Instruments* en un breviario de aplicaciones, el primero con retroalimentación de corriente que se observa en el esquema de la Figura 4.27 y el segundo con retroalimentación de voltaje mostrado en la Figura 4.28; los amplificadores propuestos se encontraron fuera de producción por lo que fueron sustituidos por unos equivalentes, las respuestas no fueron satisfactorias pues los circuitos comenzaban a oscilar, se cree que este resultado se debió a las variaciones con la idealización de los PD y la sustitución de amplificadores.

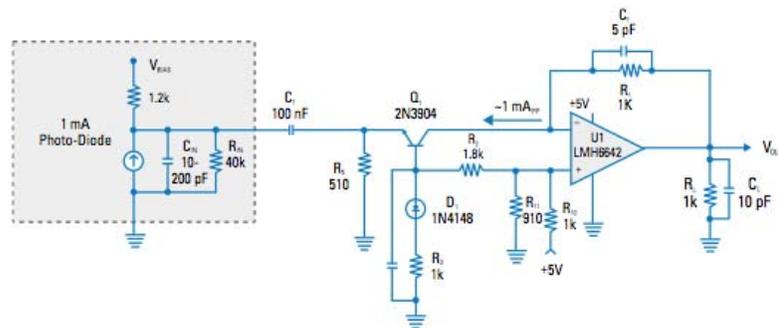


Figura 4.27 Circuito de conversión de corriente a voltaje con retroalimentación de corriente (Texas Instruments, 2011)

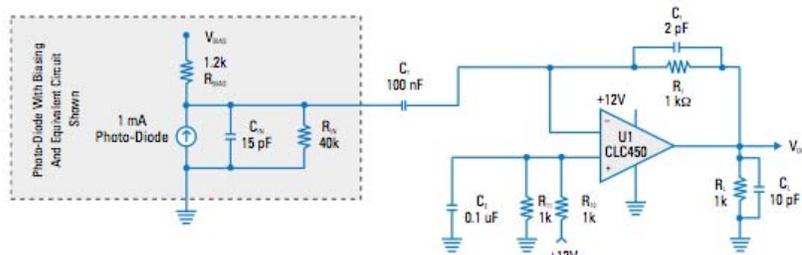


Figura 4.28 Circuito de conversión de corriente a voltaje con retroalimentación de voltaje (Texas Instruments, 2011)

Se analizó una opción desarrollada específicamente para el fotodiodo FDS100 basada en un amplificador de trans-impedancia propuesta por el *Ultracold Atoms Group* de la Universidad de Toronto, el esquema del circuito se observa en la Figura 4.29; sin embargo, se encontraron discrepancias entre los valores reportados, las mediciones realizadas en el GMM y los datos del fabricante para la capacitancia de unión de los fotodiodos, además de que el amplificador propuesto no se encontró disponible, por lo que no se probó esta opción.

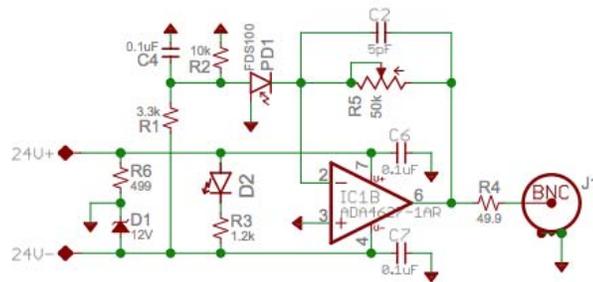


Figura 4 . 29 Circuito del UAG Toronto (Thywissen & Amy, 2012)

Thorlabs sugiere en la hoja de especificaciones del fotodiodo FDS100 un circuito con voltaje de polarización inversa y una resistencia de carga para generar una tensión equivalente a la corriente en el fotodiodo, con este arreglo se obtiene una respuesta de alta velocidad y buena linealidad al minimizar los efectos de la capacitancia de unión, sin embargo se advierte que el ruido y la corriente oscura se verán incrementados; el circuito se muestra en la Figura 4.30 .

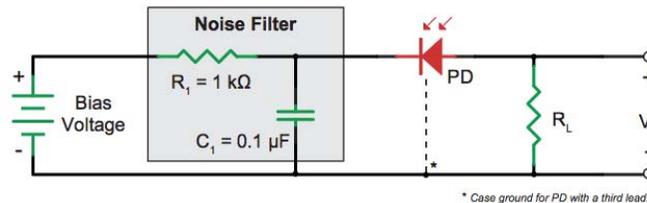


Figura 4 . 30 Circuito recomendado (Thorlabs, 2012)

En este circuito, los fotodiodos dejarán circular una corriente eléctrica proporcional a la potencia lumínica incidente de acuerdo a la responsividad R_λ de los fotodiodos operando bajo una longitud de onda determinada, por la ley de Ohm dicha corriente generará una tensión entre las terminales del resistor de carga R_L proporcional a su resistencia eléctrica de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$V_O = IR_L = P R_\lambda R_L$$

De acuerdo con la curva en color rojo de la Figura 4.31 tomada de (Thorlabs, 2012), la responsividad de los fotodiodos FDS100 a 632.8 nm es de aproximadamente 0.42 A/W; para el resistor de carga se estableció un valor de 10 kΩ y por otro lado las respuestas observadas en el osciloscopio mostraron máximos de 500 mV durante varias pruebas de alineación, entonces se estimó que la corriente máxima que circula por el circuito es de aproximadamente 50 μA equivalentes a unos 119 μW de potencia lumínica incidente sobre los fotodiodos.

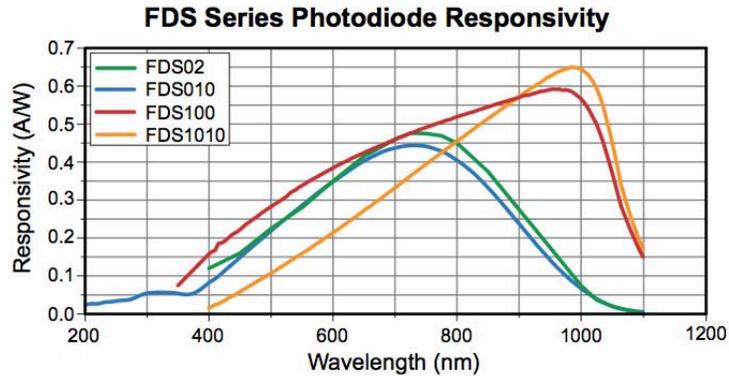


Figura 4 . 31 Responsividad de los fotodiodos ThorLabs FDS100 respecto a la longitud de onda (Thorlabs, 2012)

Se optó por utilizar este circuito debido a su buena respuesta, a pesar de que no posee elementos para controlar los efectos indeseados de la corriente oscura y la capacitancia de unión, el valor típico de la de la corriente oscura en los fotodiodos FDS100 es de 1 nA que representa solo un 0.002% del máximo estimado, por lo que no se esperó que existieran señales en falso o deriva provocada por la corriente oscura, por otro lado el efecto de retardo causado por la capacitancia de unión existe tanto en el circuito del brazo de medición como en el de referencia, lo que implica que no existe retardo relativo entre las señales.

Una característica trascendente para todo el sistema electrónico es su capacidad para procesar las señales, ya que esta define la velocidad a la que el reflector móvil puede desplazarse sin perder información; recordando que la longitud de onda de la luz empleada es de 632.8 nm, cuándo el reflector se desplaza a un ritmo de 1 mm/s se tienen señales eléctricas a una frecuencia de 1.58 kHz; en el circuito de detección el tiempo de respuesta de los fotodiodos es de 10 ns, esto implica que los circuitos de detección pueden transformar señales luminosas con una frecuencia no mayor a 12.5 MHz, que equivale a una velocidad de desplazamiento de 15 822.78 mm/s. Con esta consideración en mente, se prosiguió con la etapa de acondicionamiento de señales.

4.3.2 Acondicionamiento de señales.

Esta etapa tiene el propósito de adecuar las señales eléctricas para el conteo de franjas al mismo tiempo que complementa las medidas para evitar posibles conteos en falso ocasionados por la corriente oscura y el ruido electrónico proveniente de perturbaciones externas.

Para no consumir la corriente de los fotodiodos y alterar la señales, la etapa comienza con un circuito de desacople de impedancia; a continuación un filtro paso banda entre 1 Hz y 20 kHz minimiza el efecto del ruido de alta frecuencia transportado en las señales; después una etapa de amplificación con ganancia igual a dos precede a un detector de cruce por cero con una ventana de histéresis definida en ± 200 mV, la salida de este circuito comparador será de 9V si la señal tiene un potencial menor a -200 mV y de -9V si la señal supera los 200 mV, de este modo el fenómeno de histéresis actúa como un filtro de amplitud para evitar que corrientes en el circuito de detección menores a $10 \mu\text{A}$ generen algún pulso en falso; el resto de la etapa consiste en circuitos para ajustar las señales cuadradas a los niveles de tensión digital. En la Figura 4.32 se muestran los pasos de la etapa y su efecto sobre las señales.

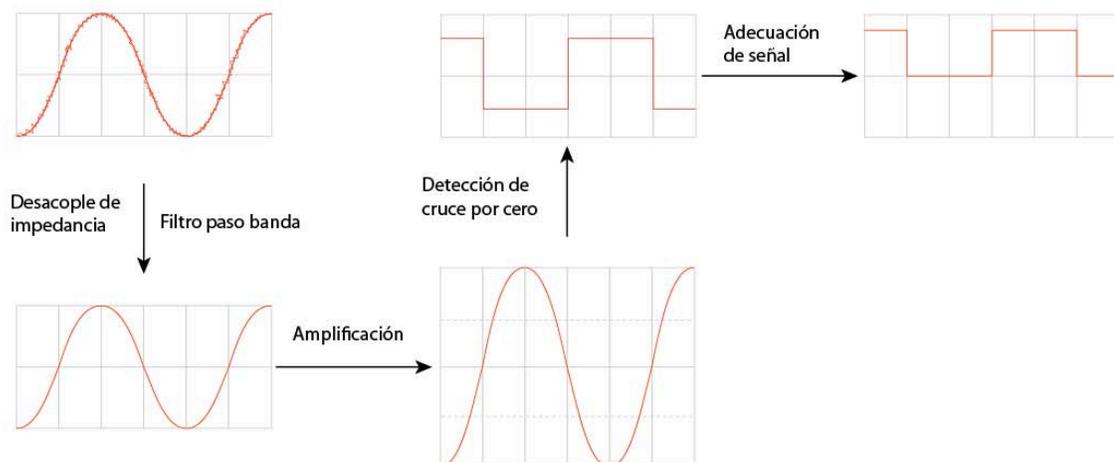


Figura 4 . 32 de Pasos de la etapa de acondicionamiento de señales, efectos en la señal eléctrica de interferencia

La implementación de los circuitos de la etapa se realizó con el amplificador operacional TL071, que a pesar de ser un amplificador de propósito general posee un slew rate de $13 \text{ V}/\mu\text{s}$ y una relación de ruido de $18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ operando a 1 kHz, suficientes para procesar de manera adecuada señales de hasta 812.5 kHz, equivalentes a desplazamientos de 514.24 mm/s; sin embargo el filtro paso banda es quien limita la velocidad de desplazamiento a 12.65 mm/s. Con el tren de pulsos en niveles de tensión adecuados para el procesamiento digital, se prosiguió con la etapa de conteo de franjas.

4.3.3 Conteo de franjas.

La etapa de conteo de franjas se encarga de obtener la información sobre los desplazamientos del reflector móvil, aquí un sistema electrónico digital reconoce y cuenta los cambios de flanco de las señales cuadradas generadas en la etapa anterior, para implementar este sistema de conteo se planteó como opción usar circuitos integrados programables como los micro controladores μC , los cuales gracias a la versatilidad de sus periféricos y a la flexibilidad de su programación permitirían implementar esta etapa y la siguiente con un solo circuito integrado; los micro controladores conocidos como *DSP* “procesador digital de señales” por sus siglas en inglés, incluyen entre sus periféricos contadores de cuadratura con capacidad de detectar señales con un periodo de hasta 12 ns, es decir unos 83.33 MHz; esta capacidad de procesamiento supera por más de cuatro mil veces el límite de frecuencia establecido por el filtro paso banda de la etapa anterior como 20 kHz; tal magnitud llevó a la búsqueda de una alternativa más adecuada para el procesamiento del ancho de banda utilizado; se planteó entonces la opción de implementar la etapa con un circuito integrado diseñado específicamente para el conteo de señales en cuadratura, los candidatos y sus características más importantes se muestran en la Tabla 4.12 .

Tabla 4 . 12

Dispositivo	LS7266R1	LS7366R	HCTL2022	HCTL2032
Fabricante	LSI Computer Systems	LSI Computer Systems	Avago Technologies	Avago Technologies
Tipo y velocidad de reloj	Interno configurable 17 MHz 35 MHz	Interno configurable 20 MHz 40 MHz	Externo Hasta 33 MHz	Externo Hasta 33 MHz
Velocidad de conteo	2.2 MHz 4.3 MHz	4.5 MHz 9.6MHz	Hasta 11 MHz	Hasta 11 MHz
Tamaño del contador	24 bits	32 bits	32 bits	32 bits
Canales de entrada	2	2	1	2
Modo de conteo	1x,2x,4x	1x,2x,4x	1x,2x,4x	1x,2x,4x
Protocolos de comunicación	Paralelo	SPI	Paralelo	Paralelo
Configuración	Programación paralela	Programación por SPI	Pines de control	Pines de control
Precio	\$14.7 USD	\$5.7 USD	\$11.5 USD	\$12 USD

La capacidad de estos dispositivos está definida por la velocidad de conteo, el tamaño del registro contador y el modo de conteo, el cuál es posible configurar como 1x, 2x ó 4x, estos modos indican la cantidad de incrementos o decrementos que se realizan en el registro de conteo de acuerdo al estado actual y anterior de a de las señales A y B, como se ilustra en la Figura 4.33 el modo 1x hace un incremento cada periodo, el modo 2x realiza dos cambios en un periodo mientras que el modo 4x lo hace cuatro veces, es decir que se realiza un incremento o decremento cada cambio de flanco en alguna de las señales, esta característica

permite aumentar cuatro veces la resolución teórica del instrumento para alcanzar $\lambda/16$ por lo que es indispensable utilizar la configuración 4x para cubrir las especificaciones del sistema de interferometría.

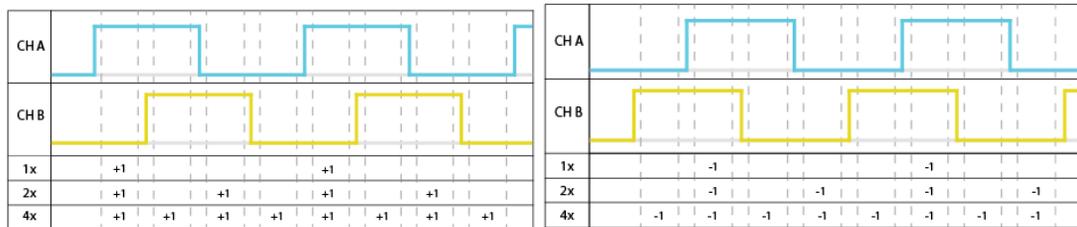


Figura 4.33 Incrementos y decrementos del registro de conteo en modos 1x, 2x y 4x

Por otro lado, recordando que la longitud de onda de la luz láser empleada es de 632.8 nm, un contador de 16 bits configurado en modo 4x tiene la capacidad de almacenar información de desplazamientos de hasta 10.36 mm, insuficiente para cubrir los requerimientos del sistema, mientras que uno de 24 bits tiene un alcance de hasta 2.65 metros y uno de 32 bits logra cubrir recorridos de hasta 679.46 metros de acuerdo a las siguientes relaciones.

$$Alcance = \frac{(\text{Tamaño del contador}) \lambda}{\text{Modo de conteo}}$$

$$Alcance \text{ 16 bits} = \frac{(2^{16})(632.8 \times 10^{-9})}{4} = 10.36 \text{ mm}$$

$$Alcance \text{ 24 bits} = \frac{(2^{24})(632.8 \times 10^{-9})}{4} = 2.65 \text{ m}$$

$$Alcance \text{ 32 bits} = \frac{(2^{32})(632.8 \times 10^{-9})}{4} = 679.46 \text{ m}$$

Respecto a la velocidad de conteo, ésta es la frecuencia máxima que pueden tener las señales de cuadratura para ser contadas adecuadamente y está relacionada con la frecuencia de reloj a la que opera cada dispositivo, el modelo LS7266R1 ofrece una relación conteo/reloj de 1/8 en sus opciones de reloj interno, el LS7366R tiene la misma relación en 1/4, mientras que los dispositivos de Avago tienen la relación en 1/3 sin importar de la velocidad del oscilador externo utilizado.

Hasta el momento, la etapa podría implementarse con cualquiera de los circuitos candidatos debido a sus capacidades principales, sin embargo se eligió el HCTL2032 gracias a sus características secundarias, pensando en la expansión del sistema a la medición de dos ejes de manera simultánea, practicidad de su configuración mediante pines de control y transferencia por un puerto paralelo de ocho bits sobre la comunicación SPI.

Como se muestra en la Figura 4.34, el circuito integrado HCTL2032 se configuró con un oscilador externo a 20 MHz conectado al pin CLK, este permite procesar señales de cuadratura con una frecuencia de hasta 6.67 MHz, que equivale a detectar desplazamientos del reflector móvil con una velocidad de hasta 4200 mm/s, se seleccionó el modo de conteo 4x con los pines EN1 y EN2, en los pines de entrada CHAx y CHABy se conectaron las señales en cuadratura provenientes de la etapa de acondicionamiento de señales, SEL1 y SEL2 permiten solicitar la información del registro de conteo a través del puerto paralelo de comunicación ubicado en los pines D0-D7, finalmente RST - x es el pin para devolver a cero el contador del eje x.

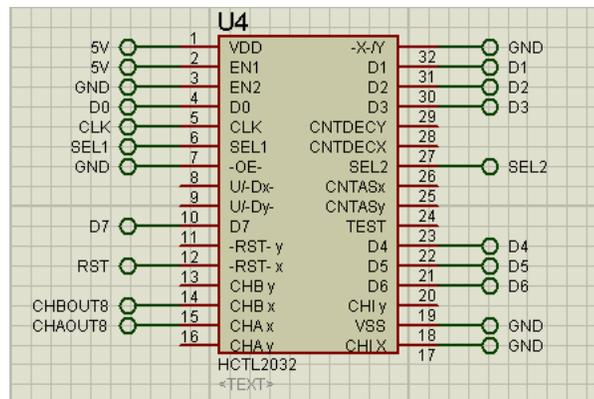


Figura 4.34 Conexión eléctrica del HCTL2032

Al final de esta etapa, el conteo de flancos de las señales de cuadratura han sido contados y guardados en un registro digital dentro del circuito integrado seleccionado, las etapas siguientes están enfocadas en procesar esta información para presentarla de manera legible y útil al usuario del sistema.

4.3.4 Procesamiento de datos.

En esta etapa el conteo de flancos se transforma en información sobre los desplazamientos del reflector móvil, se decidió utilizar un micro controlador debido a su flexibilidad pues gracias a sus periféricos y programación, le es posible comunicarse con el circuito de conteo, decodifica los datos de un registro binario a base decimal, los muestra y transmite a una computadora personal para almacenarlos.

Se programó un micro controlador PIC16F887 de *Microchip* que administra una interfaz de usuario que permite iniciar y reiniciar una prueba usando dos botones, solicita el registro de conteo de flancos, calcula el desplazamiento asociado al conteo y lo muestra en una pantalla LCD, además transmite la información a una PC utilizando el protocolo serie RS232, el programa sigue el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 4. 35 .

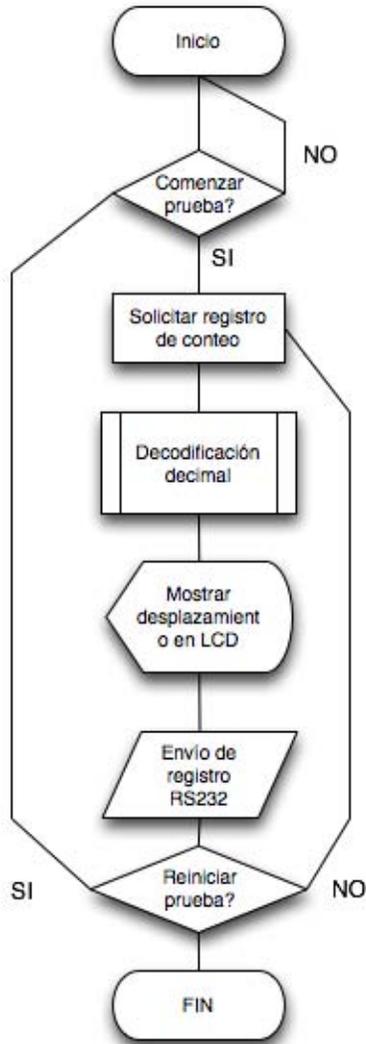


Figura 4. 36 Diagrama de flujo del micro controlador para el procesamiento de datos

El subproceso de decodificación decimal está programado para seleccionar la escala en nanómetros, micrómetros o milímetros de manera automática y así mostrar la información sobre el desplazamiento del reflector móvil en centenas de unidades con fracciones de hasta una centésima como se observa en la Figura 4.36 .



Figura 4. 35 Muestra de información en la pantalla LCD

4.3.5 Integración del sistema electrónico.

El desarrollo de las etapas del sistema electrónico se llevó a cabo en tablas de pruebas para circuitos como se observa en la Figura 4.37, las etapas fueron probadas directamente con señales reales de interferencia hasta obtener el resultado deseado en cada una de ellas; por lo que al ser completadas, el sistema electrónico se consideró en estado operativo.

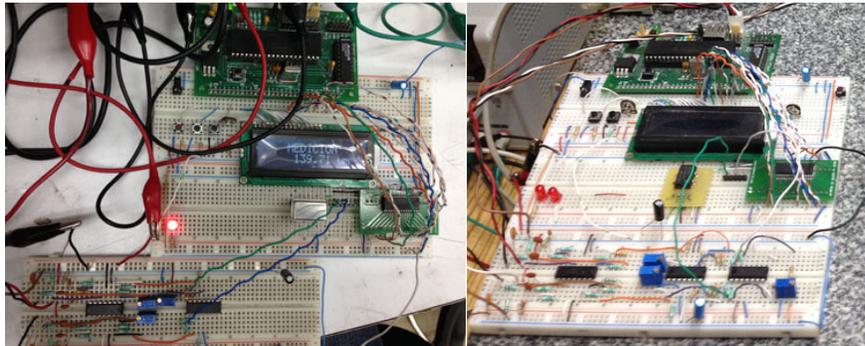


Figura 4.37 Desarrollo del sistema electrónico

Las tablas de pruebas son prácticas para diseñar y probar circuitos eléctricos, sin embargo suelen presentar ruido electrónico y falsos contactos, por tales motivos se diseñó un circuito que albergara todos los dispositivos del sistema electrónico, el resultado fue una tarjeta doble cara con dimensiones de 106 x 58 cm, la cuál fue manufacturada por el departamento de electrónica del CCADET, el diseño del circuito y una fotografía de la placa se muestran a continuación en la Figura 4.38.

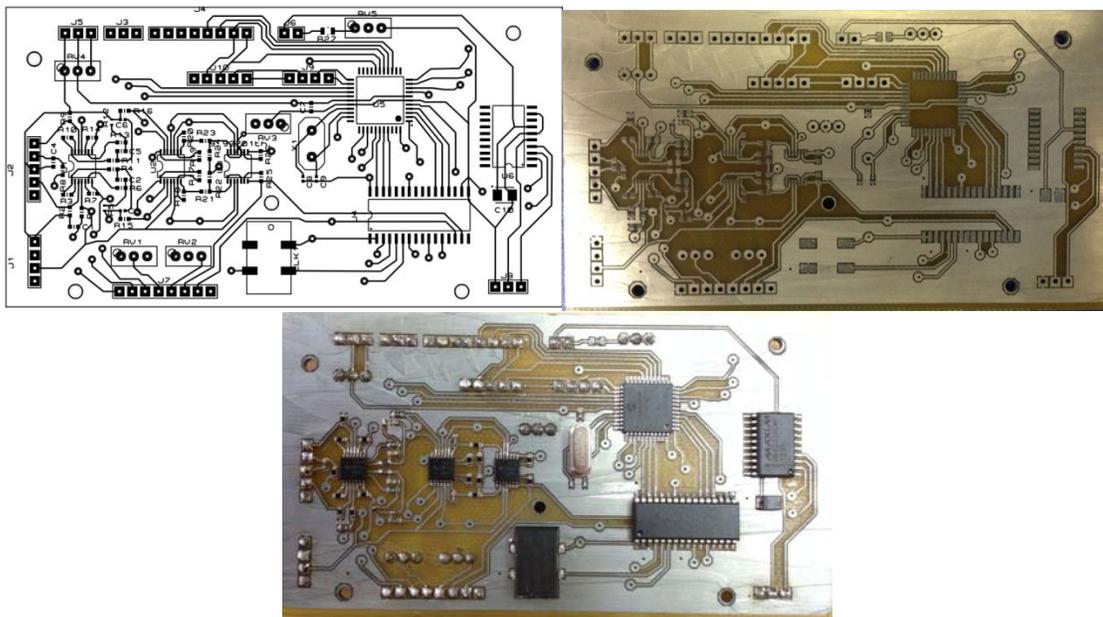


Figura 4.38 Diseño de circuitos, tarjeta fabricada y componentes colocados

4.4 Interfaz de usuario computacional.

La interfaz computacional es un software diseñado para el sistema operativo *Microsoft Windows*, tiene el propósito de facilitar la captura de información enviada por el interferómetro ordenándola en una hoja de cálculo *Microsoft Excel*. En la Figura 4.39 se muestra la ventana del software, con la letra A se identifica un selector de puerto para establecer la comunicación con el sistema electrónico, por default el software opera en modo automático capturando información cada determinado tiempo establecido con el temporizador B, al oprimir el botón reset en la tarjeta electrónica del interferómetro se crea otra columna para almacenar datos de una nueva prueba; el selector C permite cambiar entre modo automático y modo manual, donde los botones “Registro” y “Guardar columna” guardan un evento y una serie de eventos de manera asíncrona respectivamente; todos los datos guardados se visualizan panel D.

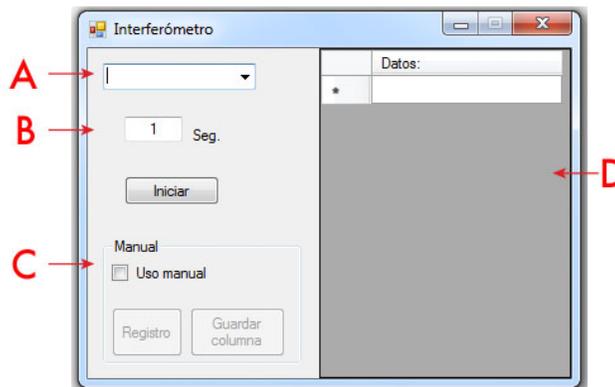


Figura 4 . 39 Interfaz de usuario para PC

Esta interfaz fue desarrollada en el entorno orientado a objetos *Microsoft Visual Studio 2010* con el lenguaje de programación C#, es compatible con las versiones de *Windows, Vista, 7 y 8* con .Net Framework 4.0 o superior. Los ciclos de depuración del software en conjunto con el sistema electrónico del interferómetro avalan su funcionamiento, sin embargo no está exento de caer en alguna excepción no controlada que lo lleve a un cierre inesperado o un ciclo sin salida.

Los procesos de diseño y fabricación de los sistemas del interferómetro, en conjunto con las pruebas de funcionamiento permitieron obtener un prototipo funcional al poco tiempo de su integración. En el capítulo siguiente se presentan los ensayos de caracterización de este nuevo interferómetro prototipo del GMM.

Capítulo 5. Pruebas de caracterización y resultados

Las pruebas de funcionamiento de los sistemas del interferómetro se realizaron a la par de su desarrollo en las instalaciones del GMM con el apoyo de la MMH desarrollada en 2007, esta MMH tiene una resolución de 140 nm por paso de motor con un juego mecánico máximo de 2,24 μm y una la relación de desplazamiento de 500 $\mu\text{m}/\text{rev}$ (Herrera, 2010); las observaciones realizadas durante el desarrollo resultaron alentadoras, sin embargo se realizaron ensayos que permitieran caracterizar el interferómetro prototipo.

Debido a que los interferómetros son utilizados para calibrar máquinas e incluso a otros instrumentos de medición, se decidió usar como patrón las mediciones del equipo 5508A de *HP* y compararlas directamente con las del nuevo prototipo del GMM; el equipo *HP* es un interferómetro con detección heterodina que posee una resolución de 0.00001 mm, es decir 0.01 μm ó 100 nm. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Metrología del CCADET el cuál está acreditado por *PERRY JOHNSON LABORATORY ACREDITATION, INC.* bajo la norma ISO/IEC 17025:2005 para realizar diversas pruebas de calibración dimensional.

Se ideó un arreglo experimental para alinear el interferómetro *HP* y el prototipo del GMM sobre la misma línea de desplazamiento, con la que sus respectivos retro reflectores móviles modificaran su posición en la misma magnitud en carreras de hasta 300 mm. En los apartados siguientes se presenta la descripción de los arreglos experimentales, los ensayos realizados así como los resultados obtenidos y su discusión, las conclusiones particulares y generales, además del trabajo futuro que se consideró apropiado para mejorar el prototipo.

5.1 Ensayos de caracterización.

Los ensayos requerían que ambos equipos midieran los desplazamientos de manera simultánea, por lo que se ideó un arreglo para desplazar los reflectores de ambos interferómetros en el mismo movimiento; sobre una mesa de granito *ROCK of AGES* se montaron un par de rieles de acero que sirvieran como guías para los desplazamientos y referencia para el montaje de los interferómetros, el cabezal láser HP se alineó de manera perpendicular a las guías utilizando un espejo a 45 grados como se observa en la Figura 5.1.

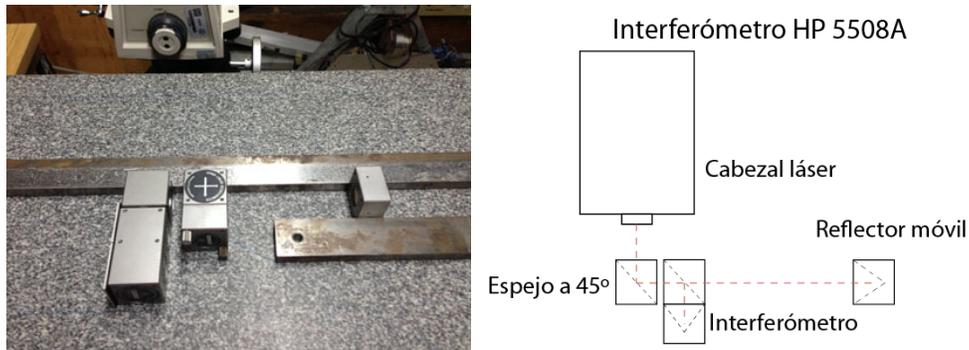


Figura 5. 1 Alineación del equipo HP.

El reflector del interferómetro del GMM se pegó sobre el HP, por lo que el resto del prototipo se alineó por encima de la trayectoria de su contraparte comercial como se muestra en la Figura 5.2, con este arreglo se planearon ensayos para carreras de 100, 200 y 300 mm con 20 muestras a lo largo de los recorridos.

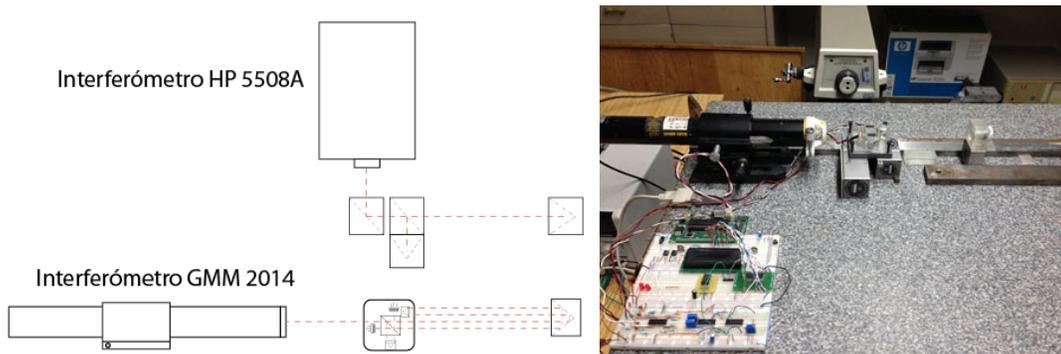


Figura 5. 2 Primer arreglo experimental con los equipos de interferometría HP y GMM

Se siguió el procedimiento de alineación usual en el equipo *HP*, corrigiendo la posición del cabezal láser con desplazamientos lineales cuándo el retro reflector móvil se encuentra en la posición más cercana del recorrido y con ajuste angular cuándo el retro reflector móvil está en la posición más alejada del recorrido. En el prototipo del *GMM*, la montura del láser no permite desplazamientos laterales por lo que estas correcciones se realizaron directamente en la posición del retro reflector.

Con este primer montaje se planteó la primer ronda de ensayos conocida como R1 para futuras referencias, la recopilación de datos permitió la comparación directa entre las lecturas de ambos equipos tomando como referencia las mediciones del equipo HP; en la Figura 5.3 se muestran las lecturas de ambos instrumentos en forma de gráfica, en esta es posible notar que la variación entre ellas es muy pequeña en comparación de la escala, por lo que se decidió trabajar con el error de medición definido en la norma DIN1319 como el valor leído menos el valor de referencia, en este caso: Lectura del prototipo GMM menos lectura del equipo HP.

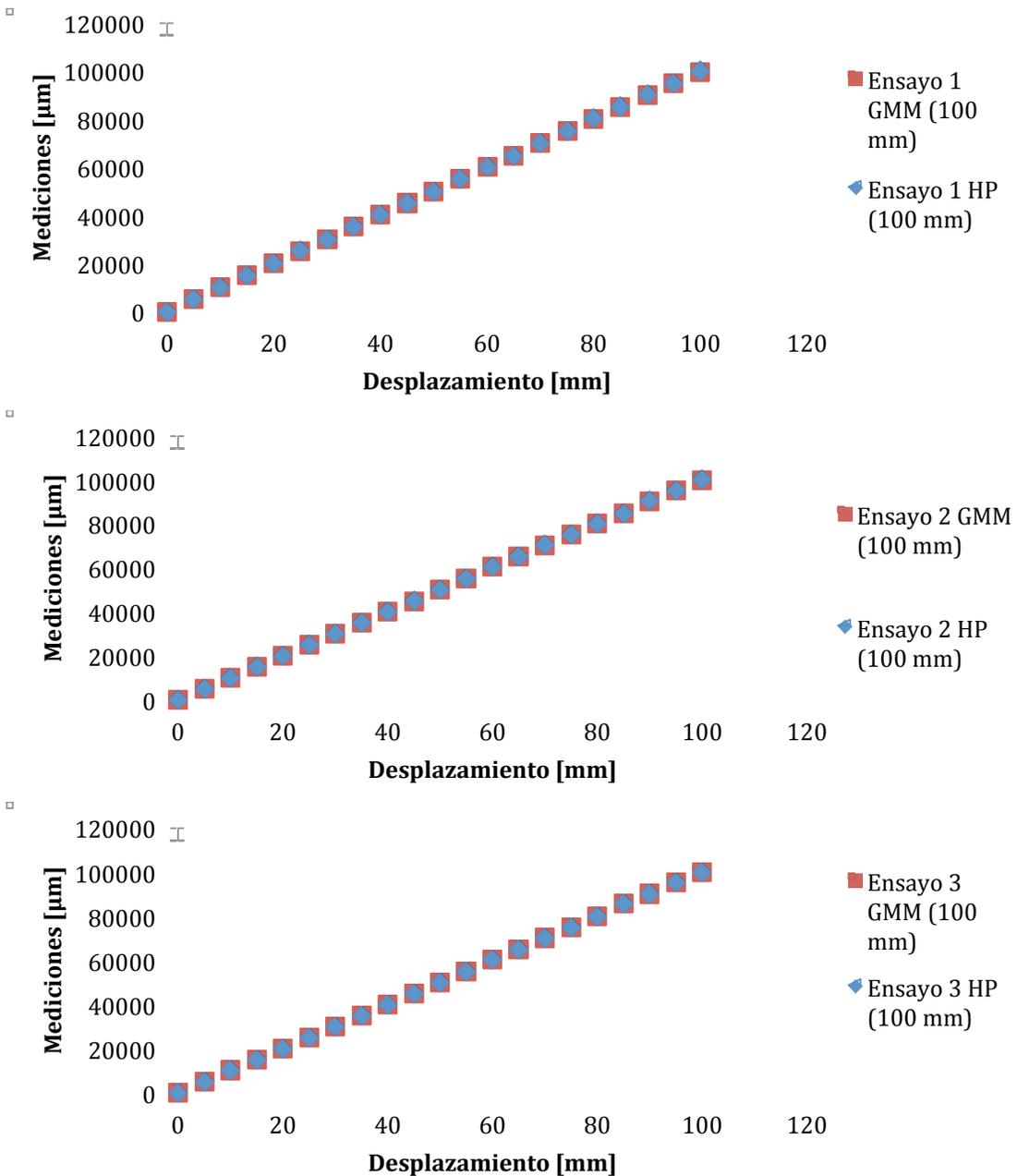


Figura 5 . 3 Mediciones de los instrumentos HP y GMM de la ronda 1

El error del prototipo del GMM alcanzó hasta varias centenas de micrómetros registrando en todos los casos desplazamientos menores que el equipo HP, la información sobre tres de los ensayos que representan la tendencia se muestra en la Figura 5.4 y Tabla 5.1 , donde se puede observar el error promedio de los ensayos se encuentra entre 50 y 100 μm , sin embargo el error máximo del ensayo 1 fue de 705,122 μm en la última medición y fue retirado por estar fuera de la escala; en la lectura correspondiente a 40 mm en el ensayo 2, el error se dispara de 35 a 90 μm y después retoma una tendencia de aumento en el error más suave mientras que en el ensayo 3 se observa una tendencia creciente relativamente uniforme.

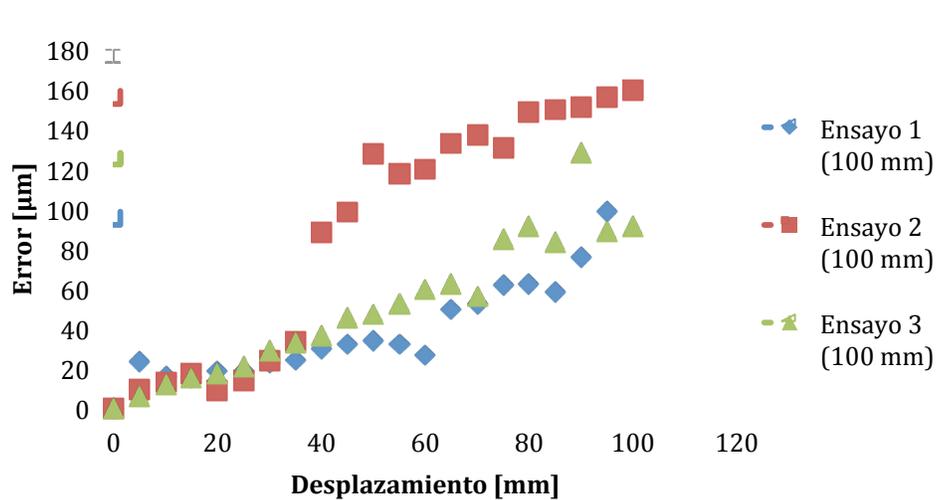


Figura 5. 4 Error acumulado en ensayos de la ronda 1

Tabla 5. 1 Error acumulado en ensayos de la ronda 1

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	72.94135	91.9312	52.9975
Error máximo [μm]	705.122 ³	159.286	128.078
Error mínimo [μm]	15.54	9.02	6.134
Desviación estándar	147.541	60.913	34.281

La tendencia creciente se debe a la acumulación del error de cada lectura durante los desplazamientos, por lo que al tomar en cuenta sólo los incrementos entre cada evento es posible notar que los valores del error promedio no superan los 40 micrómetros como se muestra en la Tabla 5.2, la gráfica de la Figura 5.5 utiliza la información del error entre desplazamientos y permite visualizar que la tendencia del error máximo no supera los 55 micrómetros.

³ Punto del ensayo 1 excluido del gráfico de la Figura 5.5 por estar fuera de la escala.

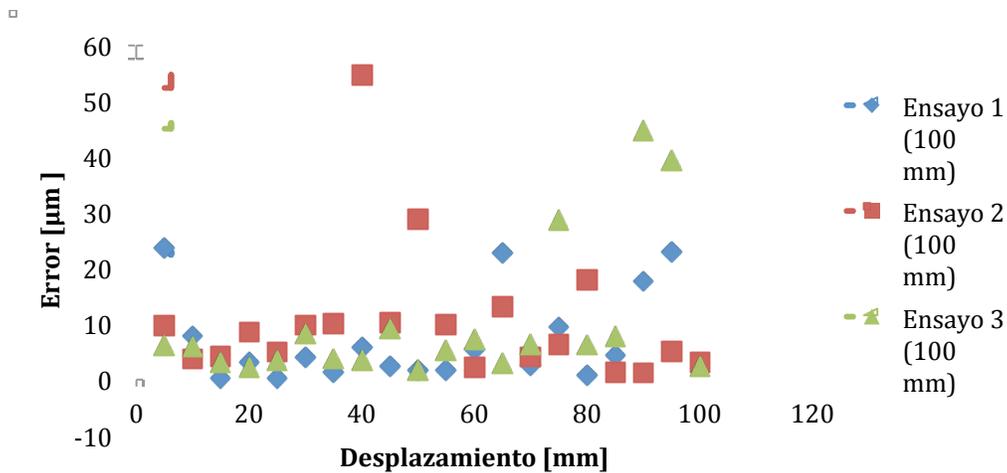


Figura 5. 5 Error entre desplazamientos de la ronda 1

Tabla 5. 2 Error entre desplazamientos de los ensayos de la ronda 1

Ensayo	1	2	3
Error promedio [µm]	37.205	10.4336	9.8974
Error máximo [µm]	606.424	54.724	44.751
Error mínimo [µm]	0.243	1.254	1.708
Desviación estándar	134.214	12.263	12.408

En todos los casos, el prototipo del GMM registró valores menores a los del equipo *HP*, este comportamiento se atribuyó a la pérdida de información de desplazamiento y se atribuyó a dos posibles causas, la primera es haber excedido la velocidad de desplazamiento máxima de 12.65 mm/s a la que el sistema electrónico puede procesar el conteo y la segunda es la pérdida de alineación momentánea a causa de las vibraciones, ambas producidas por la manipulación directa de los retro reflectores.

Para cubrir las posibles causas de la pérdida de información debida a las vibraciones se planteó un segundo montaje para lograr desplazamientos más suaves utilizando la MMH 2007 y su carro del eje Z, se mantuvo la configuración de alineamiento de los equipos, realizando el ajuste en la altura de los componentes ópticos con el uso de algunas barras paralelas de acero, este arreglo se muestra ya alineado en la Figura 5.6 .

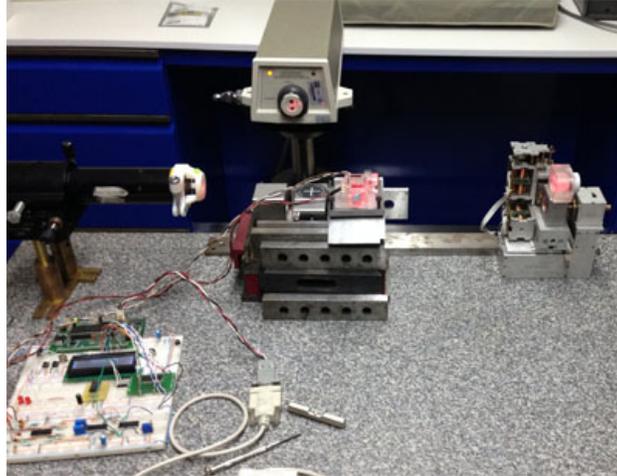


Figura 5 . 6 Segundo arreglo experimental con los equipos de interferometría HP y GMM

Se modificó el esquema de la segunda ronda de ensayos R2, debido a que el carro del eje Z de la MMH sólo permite realizar desplazamientos de 30 mm sin llegar a los límites de la carrera, se establecieron entonces 10 puntos para el registro de lecturas cada 3 mm, el tornillo impulsor de la MMH fue manipulado manualmente para realizar los desplazamientos tal como se hizo durante el desarrollo del prototipo.

Al iniciar la segunda ronda de ensayos con el segundo arreglo experimental, se observó un comportamiento de deriva creciente en el prototipo del GMM que no pudo ser corregido ni caracterizado, ésta condición provocó que todas las lecturas del prototipo del GMM fueran mayores que las del equipo HP, sin embargo la diferencia entre las lecturas fue menor que en el primer montaje experimental como se observa en las gráficas de la Figura 5.7, por lo que una vez más se recurrió al uso del error definido como la lectura del equipo HP menos la del prototipo del GMM, en la Figura 5.8 se observa la tendencia creciente del error acumulado durante el recorrido del carro de la MMH y a pesar de la presencia de la deriva este no superó los 40 μm , el error promedio se mantuvo entre 9.7 y 15.23 μm de acuerdo con la Tabla 5.3.

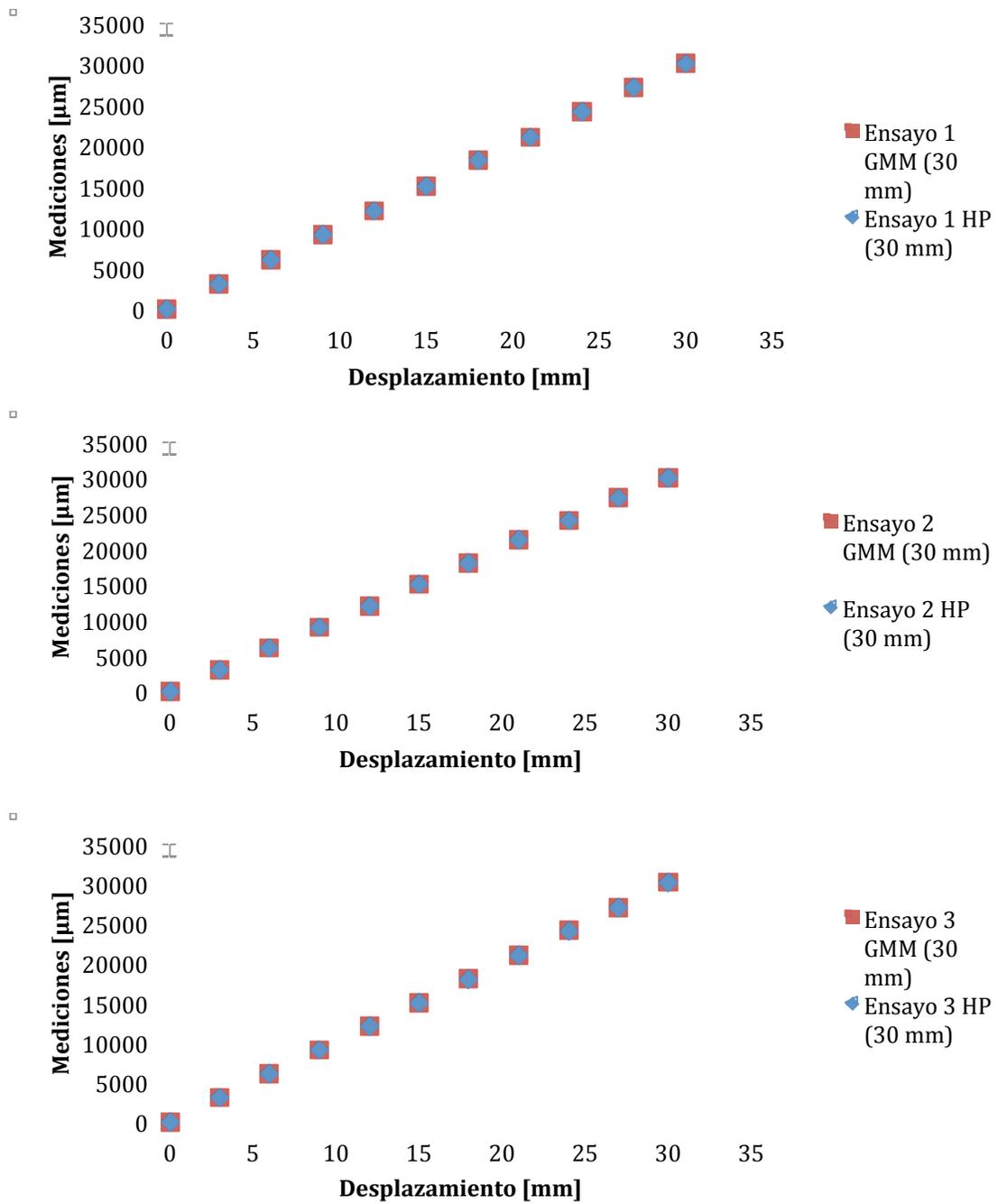


Figura 5 . 7 Mediciones de los instrumentos HP y GMM de la ronda 2

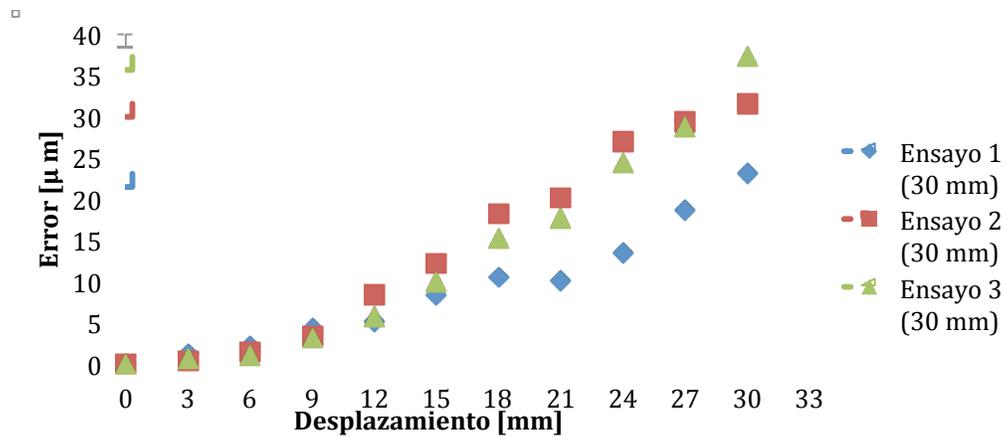


Figura 5. 8 Error acumulado en la segunda ronda de ensayos

Tabla 5. 3 Error en recorridos de los ensayos de la segunda ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	9.7013	15.2244	14.4038
Error máximo [μm]	23.077	31.569	37.255
Error mínimo [μm]	1.263	0.393	0.749
Desviación estándar	7.341	12.047	12.698

Al igual que en los ensayos realizados con el primer montaje experimental, se calculó el error entre los incrementos de cada medición para descartar el error acumulado, los resultados se presentan en la Tabla 5.4 y el comportamiento del error en la gráfica de la Figura 5.9 donde se aprecia que el error máximo no superó los 9 μm mientras que el error promedio se encontró por debajo de los 4 μm.

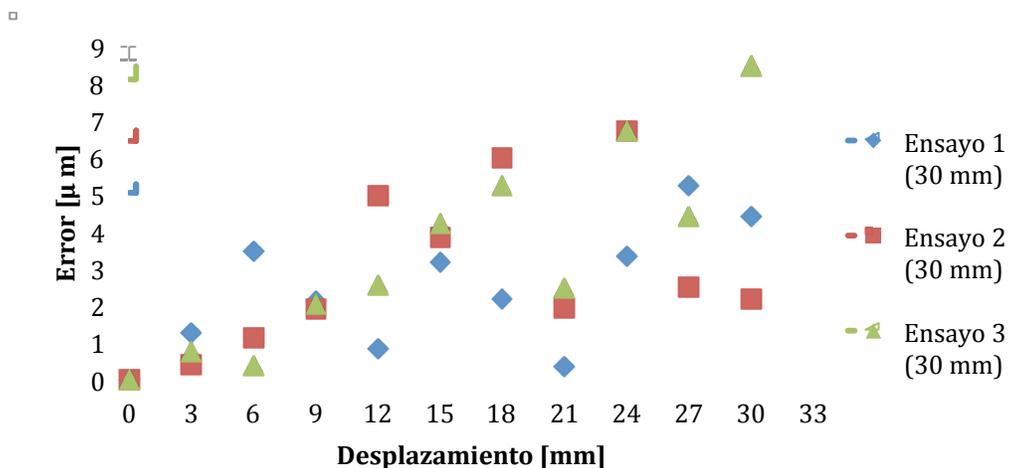


Figura 5. 9 Error entre desplazamientos en recorridos en la ronda 2

Tabla 5. 4 Error entre desplazamientos de la ronda 2

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	2.6337	3.1569	3.7225
Error máximo [μm]	5.231	6.714	8.47
Error mínimo [μm]	0.367	0.393	0.378
Desviación estándar	1.684	2.23	2.699

Las diferentes condiciones en las que se realizaron los ensayos de la primera y segunda ronda hacen que la comparación de sus resultados carezca de validez, sin embargo es notoria la reducción del error en los ensayos realizados con la MMH a pesar de la presencia de deriva. La fuente de la deriva no pudo ser identificada ni controlada.

Como existe una separación entre los haces de los equipos HP y GMM y no hay certeza del paralelismo entre sus reflectores y trayectorias, se realizó un ajuste matemático para minimizar el error coseno, este consistió en la linealización de los pares de mediciones asignando los datos del equipo HP a la variable independiente y los del prototipo del GMM la variable dependiente; los modelos para los tres ensayos reportados anteriormente se muestran a continuación.

$$\text{Ensayo 1 : } y = 1.00074219x - 2.6123$$

$$\text{Ensayo 2 : } y = 1.00118915x - 4.1054721$$

$$\text{Ensayo 3 : } y = 1.0012306x - 5.4602923$$

El error recalculado a partir de la linealización se muestra en la gráfica de la Figura 5.10 y Tabla 5.5, donde se observa que el error no sobrepasa los 6 micrómetros y que es al inicio de los datos obtenidos con el ajuste donde se presentan valores altos de este error como consecuencia del orden del ajuste empleado, el cuál podría disminuir usando un ajuste de orden superior.

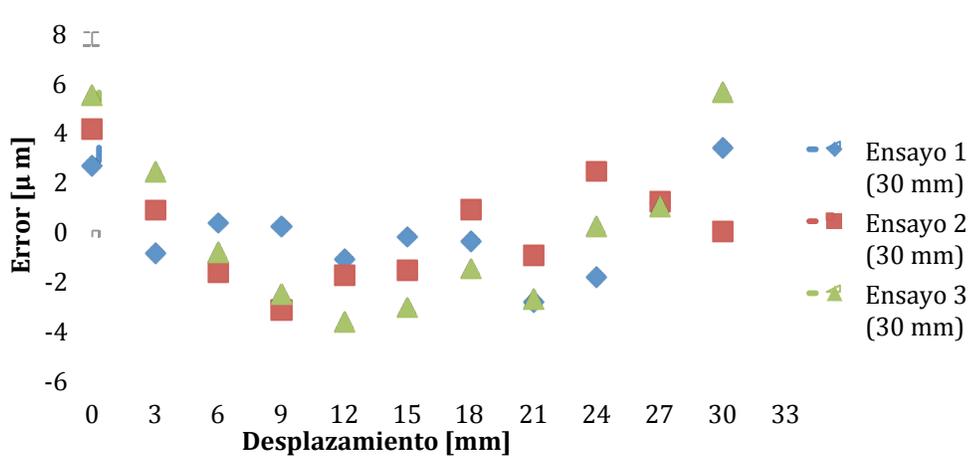


Figura 5. 10 Error ajustado con los modelos de las curvas HPvsGMM para la ronda 2

Tabla 5. 5 Error ajustado entre los modelos HP vs GMM y lecturas GMM para la ronda 2

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	-0.261	-0.411	-0.546
Error máximo [μm]	3.348	-3.215	5.572
Error mínimo [μm]	-0.154	-0.01574	0.154
Desviación estándar	1.835	2.13	3.286

Al finalizar la segunda ronda de ensayos el prototipo fue instalado en las instalaciones del GMM, donde no se detectó la presencia de deriva, por lo que se cree que tal fenómeno pudo originarse como consecuencia de ruido electrónico en las tablas de circuitos incrementado por el efecto de antena de los elementos usados para ajustar la altura del sistema. Para identificar y controlar fuentes de error como la deriva y otras, se realizó un tercer montaje experimental en el Laboratorio de Metrología; esta vez se empleó una mesa óptica *Thorlabs* modelo PTS603, donde se montó nuevamente la MMH 2007 procurando emplear la menor cantidad de elementos para montar los interferómetros, ambos equipos fueron alineados con la intención de que sus trayectorias fueran paralelas al desplazamiento, por lo que quedaron una sobre otra como se muestra en la Figura 5.11.

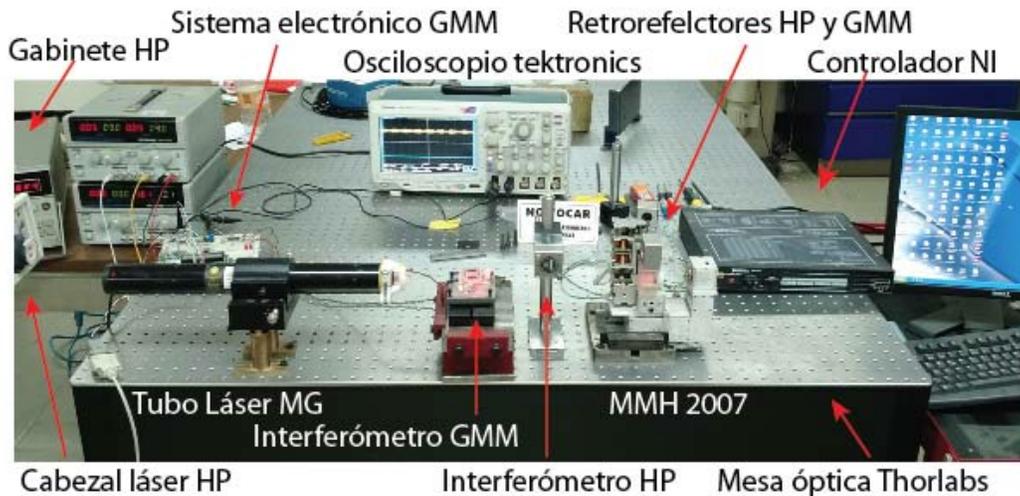


Figura 5. 11 Tercer montaje experimental

Buscando desplazamientos con mayor uniformidad en la MMH, se utilizó un controlador de motores a pasos *National Instruments* modelo MID-7604 que permite definir un perfil de velocidad para el motor además de generar micro pasos. También se utilizó un osciloscopio *Tektronics* modelo MSO 2024B conectado a la salidas de la etapa de amplificación en el canal 1 en color amarillo y a la generación de señales cuadradas en el canal 2 con color azul para detectar con mayor facilidad la presencia de fenómenos no deseados.

Con esta nueva configuración se realizó un ensayo para determinar la existencia de deriva, este consistió en realizar un desplazamiento cualquiera y usar el modo automático de adquisición para guardar el estado del desplazamiento cada segundo durante una hora, en la Figura 5.12 se muestra la gráfica de los datos recopilados, donde se indican en rojo incrementos de alrededor de un micrómetro que se presentan aproximadamente cada doce minutos y un par de incrementos de aproximadamente medio micrómetro que se presentaron una sola vez durante toda la prueba.

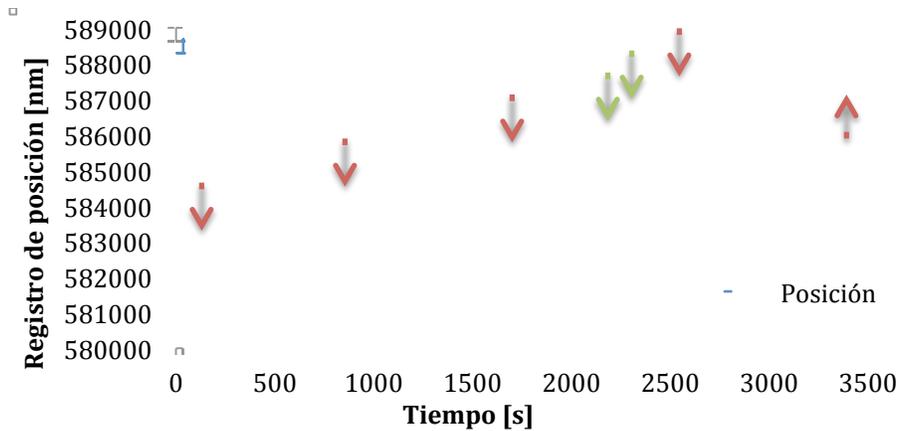


Figura 5. 12 Posición registrada por el prototipo del GMM durante un ensayo de deriva

En la pantalla del osciloscopio se pudo apreciar que cada escalón de la gráfica marcado en rojo coincide con el encendido de un compresor de aire localizado a espaldas del Laboratorio de Metrología, el cual alimenta una línea neumática del CCADET; por otro lado los escalones indicados en verde fueron producidos por el cierre de las puertas de acceso al laboratorio. Estos eventos fueron replicados y observados en numerosas ocasiones demostrando la alta sensibilidad del prototipo. En la Figura 5.13 se muestra la gráfica de posición obtenida al restar los escalones de los eventos identificados, en ella se aprecia que los incrementos y decrementos equivalen a no más de dos franjas, los cuales coinciden con el tiempo que estuvo encendido el compresor.

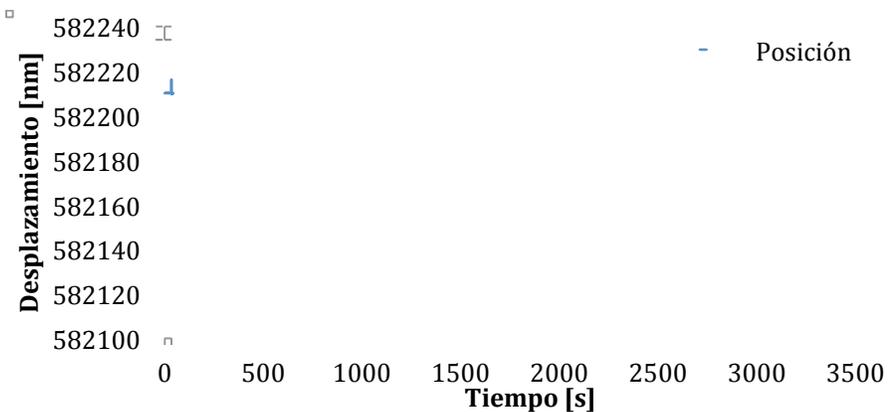


Figura 5. 13 Registro de la posición del ensayo de deriva sin los escalones de las perturbaciones identificadas

Para los eventos asociados con el cierre de las puertas, es claro que se trata de perturbaciones debidas a vibraciones mecánicas pues la señal observada en el osciloscopio es similar a las producidas por los desplazamientos del reflector, sin embargo los asociados con el compresor incrementaron el nivel de ruido eléctrico como se observa en la secuencia de la Figura 5.14 .

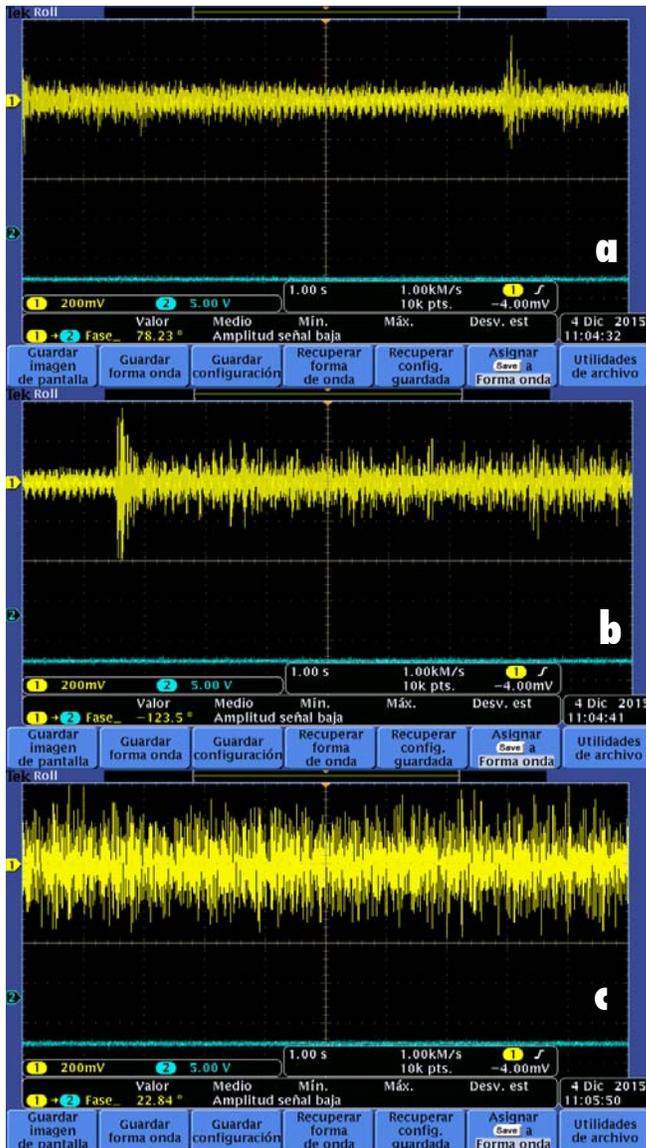


Figura 5. 14 Ruido eléctrico detectando a) Previo al arranque del compresor, b) Durante el arranque del compresor, c) Durante la operación del compresor

Como consecuencia de estas observaciones se decidió que los siguientes ensayos se realizarían durante los intervalos en los que el compresor estuviera apagado, incluyendo la posibilidad de realizar ensayos durante la noche cuándo se reduce la demanda del compresor y otros eventos que pudieran ocasionar conteos en falso.

Se planteó entonces la tercer ronda de ensayos R3 a realizarse durante los intervalos libres de la influencia del compresor, utilizando el tren de reducción de la MMH 2007 y el controlador de motor a pasos configurado para generar 10 micro pasos por cada paso de motor, a una velocidad de 5 000 micro pasos sobre segundo con un perfil de aceleración y desaceleración de 4 000 micro pasos sobre segundo al cuadrado. La toma de lecturas se realizó cada 500 micrómetros en una carrera de 30 milímetros para un total de 60 registros por ensayo con la idea de confirmar alguna tendencia en el comportamiento o encontrar alguna anomalía.

En las gráficas de la Figura 5.15 se observa el comportamiento de la tercer ronda de ensayos con el tercer montaje experimental.

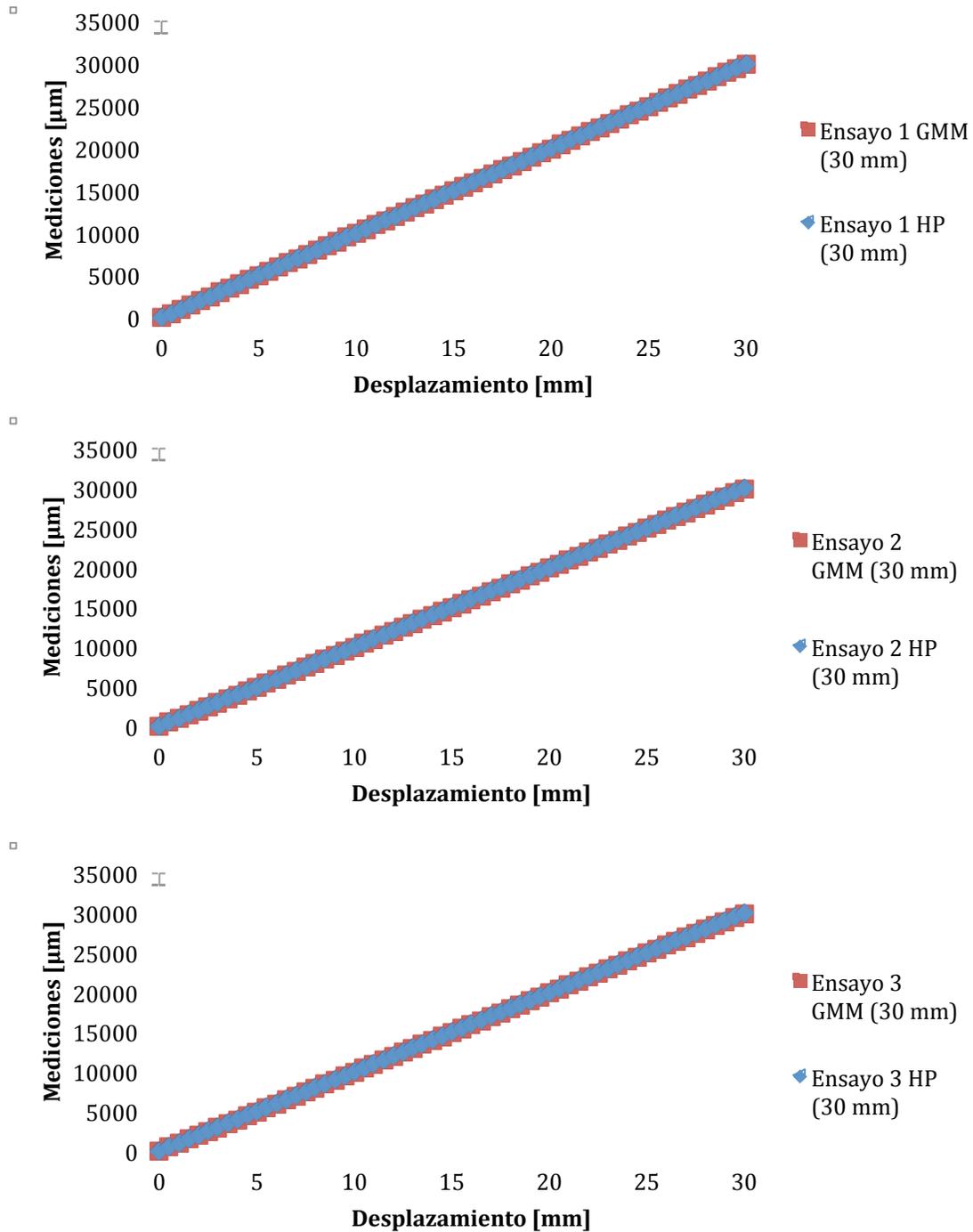


Figura 5 . 15 Mediciones de los instrumentos HP y GMM de la ronda 3

En las gráficas anteriores la diferencia entre las mediciones de los equipos es nuevamente muy pequeña en comparación con la escala, por lo que en la Figura 5.16 se muestra el gráfico del comportamiento del error acumulado de los tres ensayos y en la Tabla 5.6 sus valores de error máximo, mínimo, promedio y desviación estándar.



Figura 5 . 16 Error acumulado en los ensayos de la ronda 3

Tabla 5 . 6 Error acumulado en los ensayos de la tercer ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [µm]	-31.74536667	-33.39715	-25.00226667
Error máximo [µm]	-52.217	-57.434	-45.952
Error mínimo [µm]	-1.828	-1.654	-1.128
Desviación estándar	14.37126069	16.26898118	13.23916837

La tendencia creciente del error acumulado y su máximo son aún mayores que en los ensayos anteriores, dando la sensación de que algún elemento del montaje o su preparación no son adecuados, sin embargo en la Tabla 5.7 se puede observar que el error entre desplazamientos no sobrepasó los 2.5 micrómetros, y su tendencia indica que los desplazamientos se realizaron con menor variabilidad que en los ensayos anteriores, esta mejora se atribuyó al controlador de motores a pasos, la gráfica del error entre desplazamientos se muestra en la Figura 5.17 .

Tabla 5 . 7 Error entre desplazamientos de la tercer ronda de ensayos

Ensayo	1	2	3
Error promedio [µm]	-0.870283333	-0.957233333	-0.765866667
Error máximo [µm]	-2.252	-1.87	-1.179
Error mínimo [µm]	0.072	0.387	-0.382
Desviación estándar	0.453223436	0.420662556	0.2061094



Figura 5. 17 Error entre desplazamientos de la tercer ronda de ensayos

En la Figura 5.18 se muestran las señales generadas por los desplazamientos de la MMH configurados con una velocidad de 5 mil pasos sobre segundo con perfiles de aceleración y desaceleración de 4 mil pasos sobre segundo al cuadrado, en el canal 1 se observa que la intensidad de la señal sigue un perfil que coincide con la configuración de velocidad del motor, mientras que en el canal 2 se observa una menor densidad de pulsos al inicio y final de los desplazamientos, donde el perfil no es uniforme. De este modo, la magnitud del error acumulado se atribuyó a la ausencia de pulsos cuadrados como consecuencia de la configuración de desplazamiento.

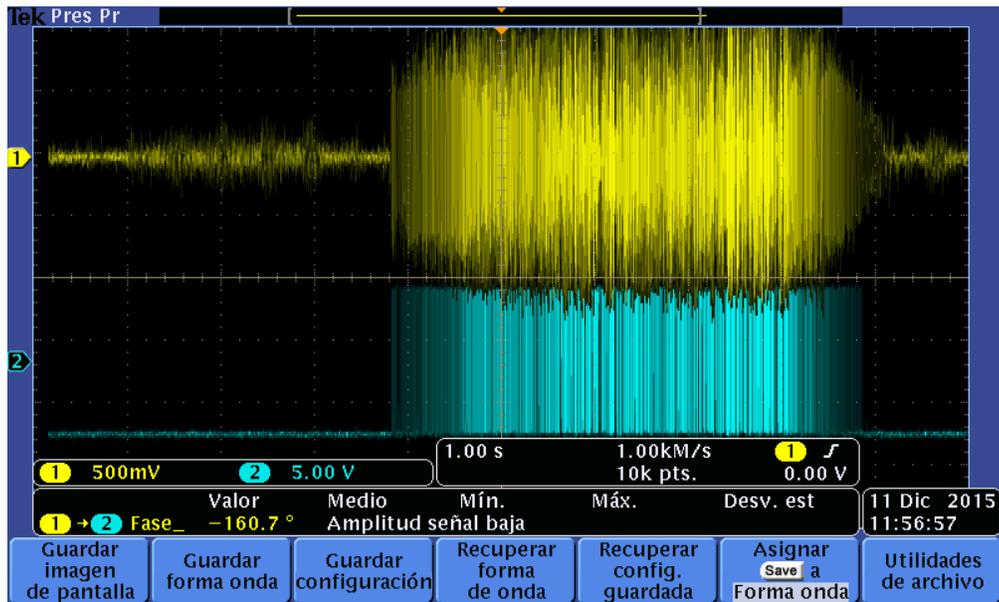


Figura 5. 18 Señales registradas con perfiles de aceleración de cuatro mil pasos sobre segundo al cuadrado

Para confirmar esta suposición, se desacopló el carro del eje Z de la transmisión del motor y nuevamente se realizó una ronda de ensayos con desplazamientos manuales con toma de lecturas cada tres milímetros. En la Figura 5.19 se muestran las señales observadas con el osciloscopio de los desplazamientos manuales, en ella se observa que en el inicio y final de los desplazamientos la densidad de pulsos cuadrados generados es más uniforme en comparación con el perfil mostrado anteriormente.

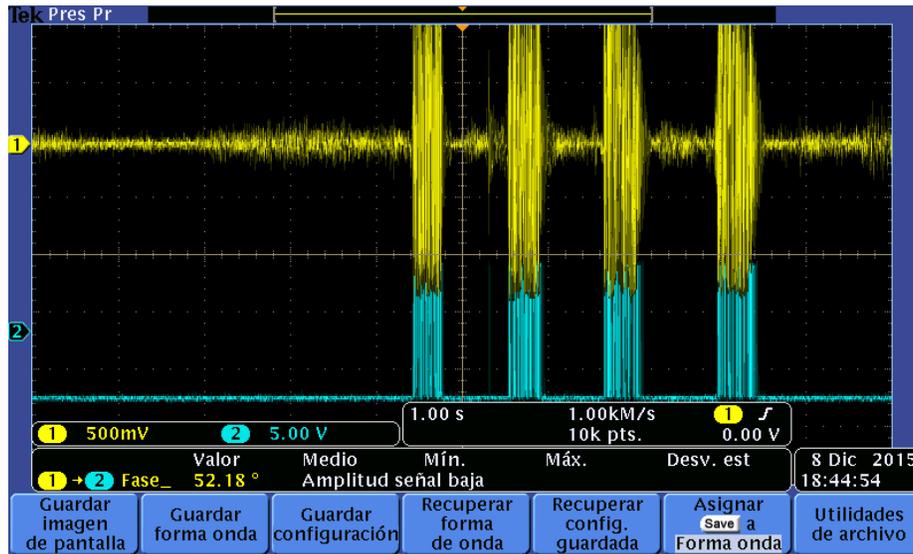


Figura 5. 19 Comportamiento de las señales durante la ronda de desplazamientos manuales

A continuación se muestran los resultados de la cuarta ronda de ensayos R4 realizada con desplazamientos manuales, en la Figura 5.20 se observa la gráfica del error acumulado y en la Tabla 5.8 sus estadísticos, mientras que en la Figura 5.21 se observa la gráfica del error entre desplazamientos con sus respectivos datos en la Tabla 5.9 .

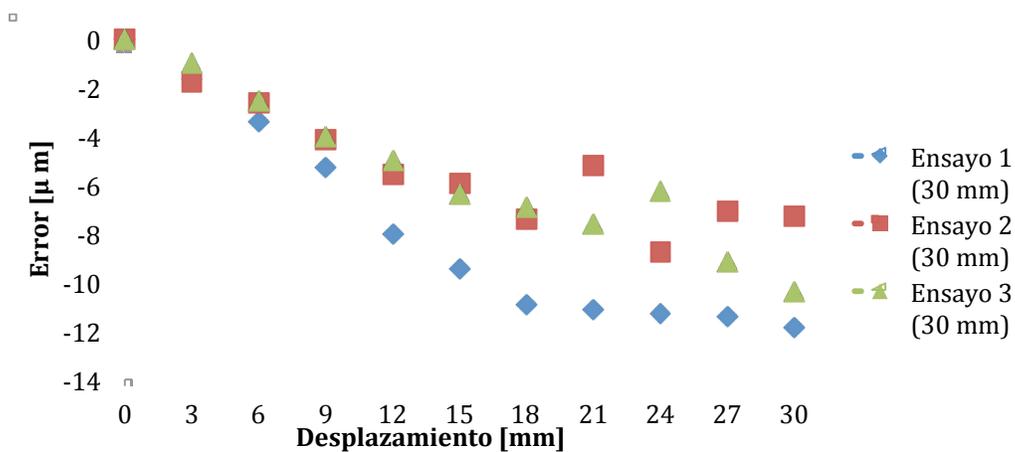


Figura 5. 20 Error acumulado de la cuarta ronda

Tabla 5. 8 Error acumulado de los ensayos de la cuarta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	-8.4425	-5.5842	-5.9373
Error máximo [μm]	-11.855	-8.766	-10.406
Error mínimo [μm]	-1.644	-1.785	-1.013
Desviación estándar	4.353905052	2.695280147	3.268125192

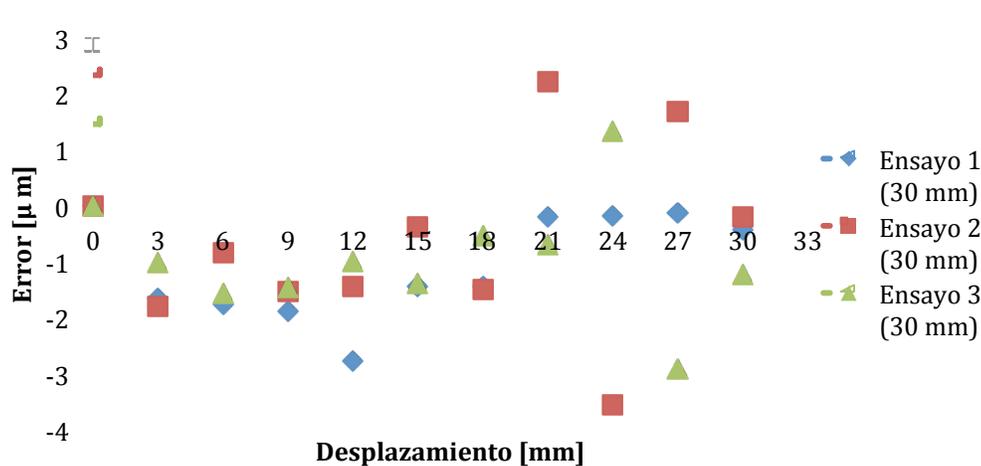


Figura 5. 21 Error entre desplazamientos de la ronda 4

Tabla 5. 9 Datos del error entre desplazamientos de los ensayos de la cuarta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	-1.1855	-0.7278	-1.0406
Error máximo [μm]	-2.768	-3.554	-2.906
Error mínimo [μm]	-0.128	-0.196	-0.532
Desviación estándar	0.927564886	1.621422725	1.050736504

Los resultados de esta ronda indican que el error acumulado fue menor a un tercio del registrado en la ronda anterior, sin embargo el error máximo entre desplazamientos aumentó casi al doble con variaciones mucho mayores. Estos resultados confirman que los desplazamientos realizados con perfiles de velocidad aumentan el error debido a la ausencia de pulsos cuadrados en los periodos de aceleración y desaceleración; además demuestran que usar el motor y tren de engranes de la MMH hace más estables los desplazamientos.

Se buscó una configuración para que el controlador de motores produjera una velocidad constante durante todo el movimiento y así los pulsos cuadrados pudieran ser generados, esta se encontró con una división de dos micro pasos por cada paso de motor, una velocidad de desplazamiento de 5 mil pasos por segundo, un perfil de aceleración de 20 mil pasos sobre segundo al cuadrado y una desaceleración de 30 mil pasos sobre segundo al cuadrado; en la Figura 5.22 se muestran las señales generadas por un desplazamiento controlado con esta

configuración, donde se aprecia que durante todo el desplazamiento la densidad de pulsos cuadrados tiene mayor constancia que en la rondas anteriores.

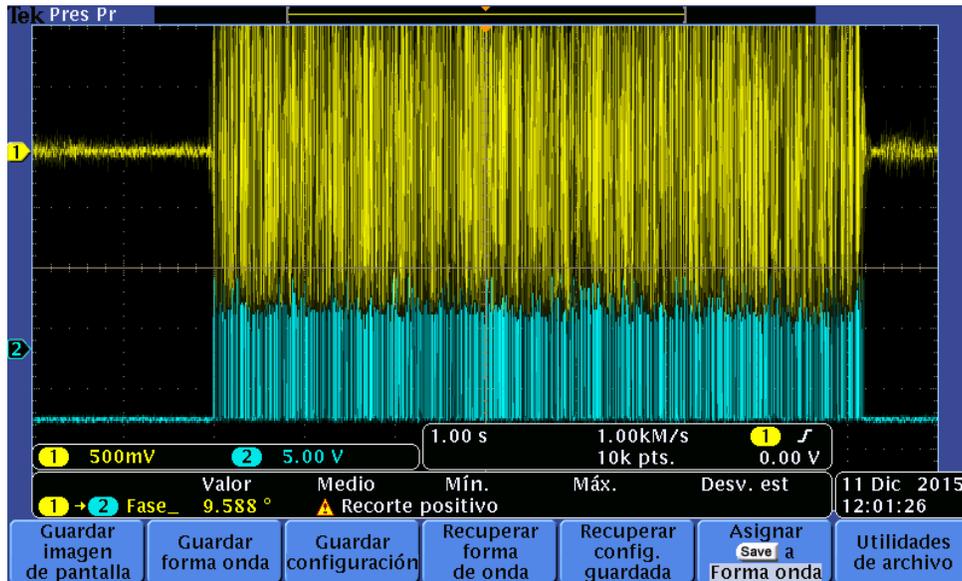


Figura 5 . 22 Señales registradas con el nuevo perfil de velocidad para el motor a pasos

Con esta nueva configuración para los desplazamientos, se planteó realizar nuevas rondas de ensayos, esta vez durante el horario nocturno cuándo la actividad del compresor de aire es mínima y el impacto de otras fuentes de ruido no identificadas es menor, tal como se muestra en la Figura 5.23, donde se observa una señal con la menor cantidad de ruido.

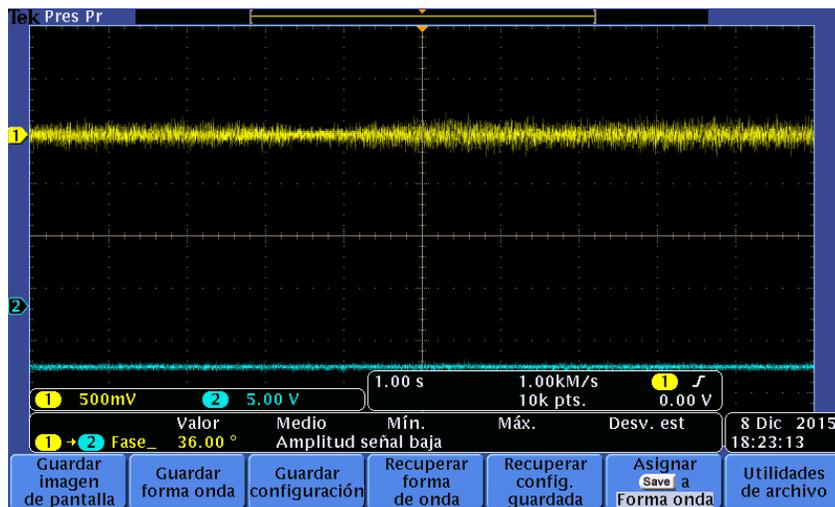


Figura 5 . 23 Señales durante las rondas de ensayos en el turno nocturno

Las rondas de ensayos se plantearon nuevamente para recorridos de treinta milímetros con toma de lecturas cada tres milímetros, sin embargo se incluyó la variante de realizar una ronda con el motor desacoplado y otra con el motor acoplado, con la intención de reafirmar que el controlador de motores realiza movimientos más estables que permiten hacer lecturas con menos variación. La quinta ronda de ensayos se realizó con el motor desacoplado al carro de la MMH, es decir que los desplazamientos se realizaron manipulando el eje impulsor de la MMH de forma manual, en la gráfica de la Figura 5.24 se muestra el comportamiento del error acumulado y en la Tabla 5.10 los datos relevantes de la ronda, donde es posible observar que el error acumulado es menor que el reportado en la tercera y cuarta ronda.

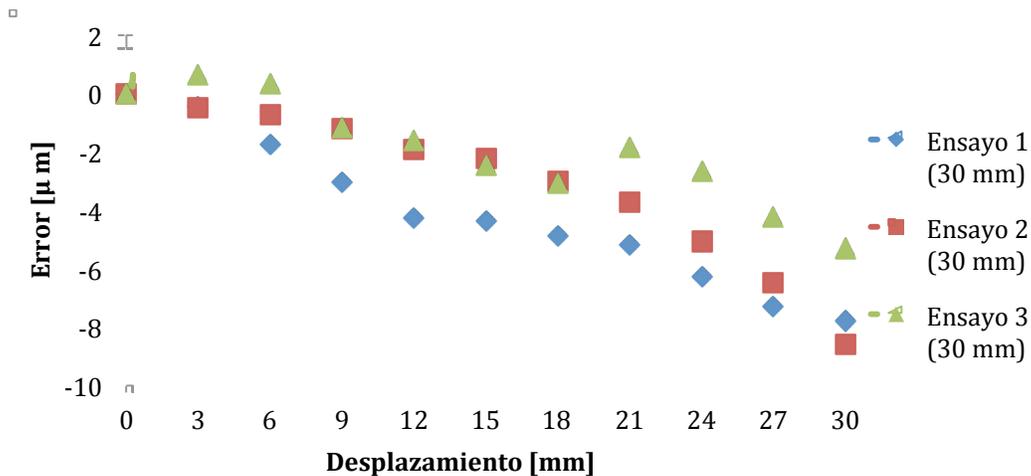


Figura 5. 24 Error acumulado en la quinta ronda de ensayos

Tabla 5. 10 Error acumulado en los ensayos de la ronda 5

Ensayo	1	2	3
Error promedio [µm]	-4.5281	-3.3408	-2.1374
Error máximo [µm]	-7.784	-8.6	-5.308
Error mínimo [µm]	-0.466	-0.495	0.319
Desviación estándar	2.587076124	2.718119109	1.868320714

Del mismo modo, el error entre desplazamientos disminuyó respecto a las rondas anteriores como se observa en la Tabla 5.11 y en la gráfica de la Figura 5.25, este comportamiento se atribuyó a la menor cantidad de ruido ambiental y a la experiencia ganada durante las rondas anteriores.

Tabla 5. 11 Error entre desplazamientos de la quinta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [µm]	-0.7784	-0.86	-0.5308
Error máximo [µm]	-1.289	-2.114	-1.567
Error mínimo [µm]	-0.071	-0.225	-0.309
Desviación estándar	0.489500618	0.618639284	0.853887389

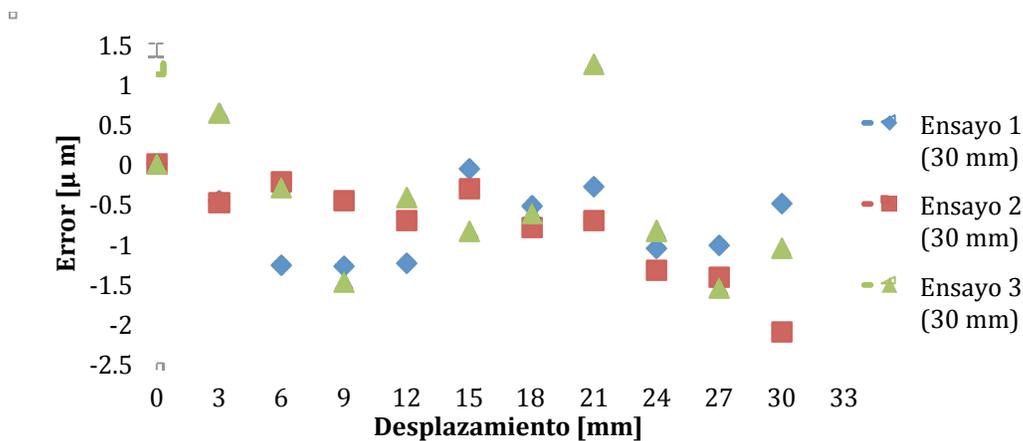


Figura 5 . 25 Error entre desplazamientos de los ensayos de la ronda 5

Tal como se hizo en la segunda ronda de ensayos, los datos se ajustaron con una aproximación lineal para minimizar el error coseno ocasionado por el ángulo entre los haces de los equipos GMM y HP, en la gráfica de la Figura 5.26 se observa el comportamiento del error ajustado, cuya magnitud se encuentra en límites similares a los del error entre incrementos de la Figura 5.25, así mismo se observa en la Tabla 5.12 que los valores de error máximo, mínimo y desviación estándar son muy similares a los de la ronda anterior, esta aparente falta de mejoría se atribuye a la variabilidad que conlleva realizar desplazamientos de manera manual.

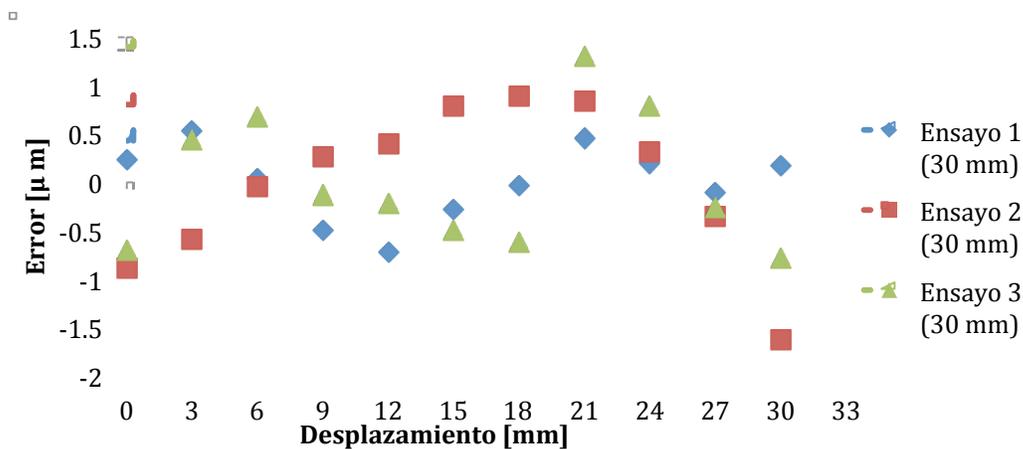


Figura 5 . 26 Error ajustado de la quinta ronda

Tabla 5 . 12 Error ajustado de los ensayos de la quinta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	-0.023579027	0.088866495	0.070382876
Error máximo [μm]	-0.723935083	-1.625583885	1.301566553
Error mínimo [μm]	-0.029813413	-0.045288116	-0.129260402
Desviación estándar	0.384072742	0.796065428	0.694516255

La sexta ronda de ensayos se realizó con el motor acoplado al carro de la MMH, en la gráfica de la Figura 5.27 se muestra el comportamiento del error acumulado, donde se aprecia que no sobrepasa los tres micrómetros, en la Tabla 5.13 se muestran los valores representativos donde ya se aprecian valores de error y desviación estándar eltre la mitad y un tercio de los registrados en la ronda anterior.

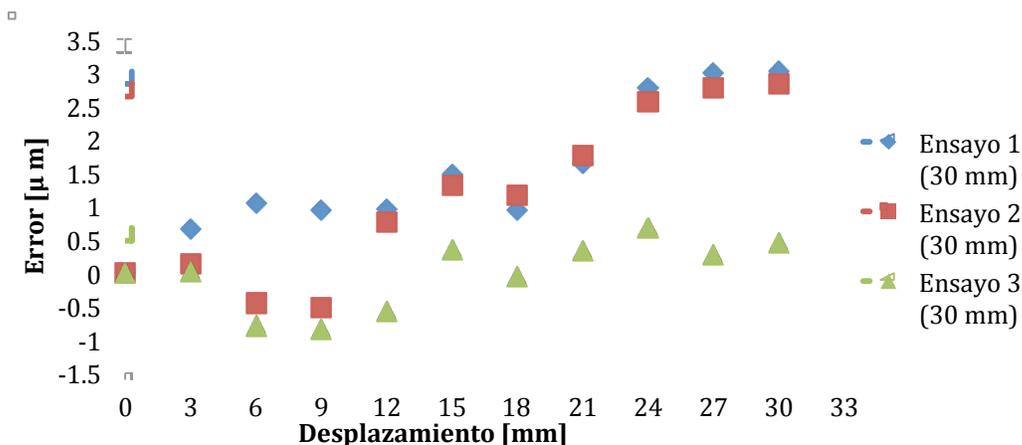


Figura 5 . 27 Error acumulado de los ensayos de la sexta ronda

Tabla 5 . 13 Error acumulado de la sexta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [µm]	1.6422	1.2322	-0.0206
Error máximo [µm]	3.015	2.839	-0.795
Error mínimo [µm]	0.666	0.141	0.015
Desviación estándar	1.011032982	1.252569265	0.513238948

Los datos obtenidos del error entre desplazamientos se muestran a continuación en la Tabla 5.14 y en la gráfica de la Figura 2.28, donde se aprecia que el error guarda cierta tendencia durante la longitud de la carrera de desplazamiento.

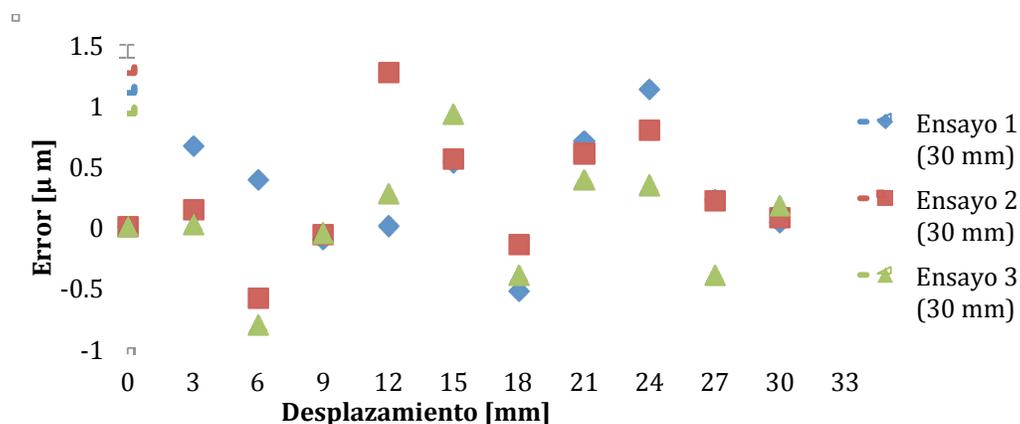


Figura 5 . 28 Error entre desplazamientos de la ronda 6

Tabla 5. 14 Error entre desplazamientos de los ensayos de la sexta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	0.3015	0.2839	0.0441
Error máximo [μm]	1.131	1.271	0.928
Error mínimo [μm]	-0.106	-0.064	0.015
Desviación estándar	0.464679772	0.51279966	0.468082141

Por último, se realizó el ajuste lineal a los datos de desplazamientos para minimizar el error coseno en la medición obteniendo las ecuaciones mostradas a continuación y recalculando nuevamente el error, la gráfica de la Figura 5.29 presentada a continuación muestra como en esta ocasión, el error ajustado se reduce hasta los límites de menos un micrómetro y seis décimas de micrómetro.

$$\text{Ensayo 1 : } y = 1.00009367x + 0.0881708$$

$$\text{Ensayo 2 : } y = 1.00011729x - 0.6388218$$

$$\text{Ensayo 3 : } y = 1.00003182x - 0.4958946$$

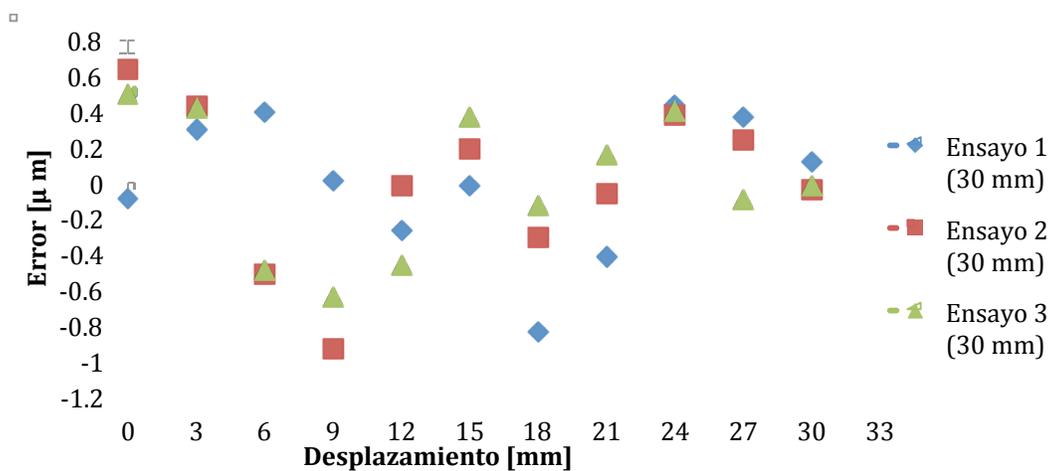


Figura 5. 29 Error ajustado en la sexta ronda de ensayos

Tabla 5. 15 Error ajustado en la sexta ronda

Ensayo	1	2	3
Error promedio [μm]	0.00881708	-0.063882183	-0.049589464
Error máximo [μm]	-0.836166549	-0.93355626	-0.640379288
Error mínimo [μm]	0.010060823	-0.014427149	-0.017547974
Desviación estándar	0.39197495	0.455186764	0.403992868

Con estos resultados se demuestra que la calidad en los desplazamientos es fundamental para realizar una caracterización apropiada del sistema, el cual ha presentado una gran sensibilidad a perturbaciones externas como vibraciones y ruido eléctrico. Las rondas de ensayos aquí presentadas se realizaron con los

recursos disponibles y la mayor atención para identificar y controlar las fuentes de error durante la caracterización de exactitud, sin embargo es razonable pensar que la MMH es un dispositivo inadecuado para realizar la caracterización de un instrumento de interferometría a pesar de sus capacidades para realizar desplazamientos, por lo que los resultados obtenidos en la sexta ronda de ensayos se consideran una aproximación de la verdadera capacidad del nuevo prototipo de interferómetro del GMM que deberá ser evaluada con otro tipo de dispositivos fuera del alcance de este trabajo.

Las rondas de ensayos realizadas con el tercer montaje experimental, es decir el ensayo de deriva y las rondas R1 a R6; permitieron conocer mejor el comportamiento del prototipo del GMM y dar una idea de sus capacidades, los resultados muestran una reducción progresiva del error de medición como consecuencia de la reducción en la variabilidad de las lecturas, que a su vez es consecuencia de la capacidad para producir desplazamientos controlados. Hasta el momento se han considerado algunos factores que influyen en el error de medición del interferómetro prototipo del GMM, dejando a la calidad de los desplazamientos como el principal, sin embargo existen otros factores que se encuentran presentes que son por el momento incuantificables, tales como la estabilidad de la fuente de luz debidas cambios de temperatura y atmósfera etc, que son otra razón para considerar los resultados como una mera aproximación de los reales.

Tomando las consideraciones para el tercer montaje experimental y la sexta ronda de ensayos, se preparó una ronda adicional de ensayos para determinar la sensibilidad a la medición que posee el instrumento considerando su principio de funcionamiento bajo la mejor configuración alcanzada, estos ensayos consistieron en desplazar los reflectores hasta alcanzar diversas posiciones dentro de la carrera de la MMH utilizando el controlador de motores a pasos para relacionar el conteo de franjas efectuado por el sistema electrónico con la lectura del equipo HP, los desplazamientos se realizaron en un sentido hasta los 30 milímetros y después se repitieron los desplazamientos en sentido contrario, las lecturas registradas de los tres ensayos se muestran a continuación en las Tablas 5.16, 5.17 y 5.18 respectivamente.

Tabla 5. 16 Ensayo 1 de sensibilidad de medición

Posición registrada HP [μm]	Conteo de franjas GMM	Posición registrada GMM [μm]	Sensibilidad estimada [nm]
499.6	12616	498.9628	39.60050729
998.4	25236	998.0838	39.56252972
9996.7	252761	9996.69755	39.55000969
29997.5	758476	29997.7258	39.5497023
10585.4	268232	10608.5756	39.46359868
1584.8	40692	1609.3686	38.94623022
1084.8	28060	1109.773	38.66001426
585.3	15456	611.2848	37.86878882

Tabla 5. 17 Ensayo 2 de sensibilidad de medición.

Posición registrada HP [μm]	Conteo de franjas GMM	Posición registrada GMM [μm]	Sensibilidad estimada [nm]
499.9	12629	499.47695	39.5834983
999.4	25241	998.28155	39.59431084
9997.3	252765	9996.85575	39.55175756
29997.3	758456	29996.9348	39.5504815
10583	268568	10621.8644	39.40529028
1586.6	41120	1626.296	38.58463035
1087.1	28504	1127.3332	38.13850688
587.6	15904	629.0032	36.94668008

Tabla 5. 18 Ensayo 3 de sensibilidad de medición.

Posición registrada HP [μm]	Conteo de franjas GMM	Posición registrada GMM [μm]	Sensibilidad estimada [nm]
499.2	12616	498.9628	39.56880152
998.5	25236	998.0838	39.56649231
9996.1	252748	9996.1834	39.54967003
29996.5	758456	29996.9348	39.54942673
10586.9	268476	10618.2258	39.43331992
1585.8	40912	1618.0696	38.76124364
1086.3	28320	1120.056	38.35805085
586.6	15716	621.5678	37.32501909

Como se puede observar, en los desplazamientos de avance, la relación del conteo y el desplazamiento se aproxima a la resolución teórica de 39.55 nanómetros de un 95% a un 98%, sin embargo al retroceder el carro se hace presente el comportamiento de histéresis mecánica “backlash” que, separa los conteos presumiblemente por efectos de la vibración en el tren de engranes durante el cambio de sentido basándose en la experiencia de las rondas anteriores; el backlash se aprecia muy cercano a los 583 micrómetros de acuerdo a la lectura del equipo HP. Es necesario prestar atención y tener cuidado con la interpretación de los datos del retroceso, pues a simple vista indican que la resolución ha aumentado, sin embargo ahondar en este fenómeno y el tipo de compensación o ensayo adecuado para su determinación fue excluido de éste trabajo.

5.2 Conclusiones

En este trabajo se diseñó y fabricó el prototipo de un sistema de interferometría láser para la medición de desplazamientos lineales, el sistema está constituido por un interferómetro con óptica semi integrada gracias al diseño de un juego de soportes ensamblables que mantienen alineados y protegidos a los dispositivos ópticos; un sistema electrónico diseñado para las necesidades del procesamiento homodino que además administra una interfaz de usuario, muestra el desplazamiento en una pantalla y envía la información a una computadora personal donde una interface permite organizar y almacenar la información de los desplazamientos.

Las características de mayor relevancia realizadas para esta versión del prototipo, son la integración del sistema óptico y los accesorios diseñados para facilitar la alineación, pues en conjunto lograron disminuir la cantidad de elementos a alinear y el tiempo empleado para la puesta en marcha del sistema; por otro lado los componentes del prototipo cubren las características esenciales de un sistema de interferometría comercial, llevando la información de los desplazamientos del reflector móvil hasta un archivo digital donde los datos pueden ser consultados y procesados a conveniencia del usuario.

Existen aspectos como el material de los soportes optomecánicos o las tablas de pruebas con las que se desarrolló el sistema electrónico, que si bien demuestran la funcionalidad del prototipo podrían limitar sus capacidades, en concreto la presencia de deriva durante los ensayos de caracterización es el reflejo de que el prototipo carece de la robustez deseada, no cubriendo el objetivo de este trabajo y dejando la hipótesis abierta a futuras mejoras.

Se han planteado comentarios y conclusiones de manera puntual en torno a varios aspectos del sistema de interferencia presentado hasta ahora con la intención de detallar los puntos considerados importantes para futuros avances. Sin embargo es oportuno aclarar que la MMH no es la herramienta adecuada para caracterizar un instrumento de tan alta sensibilidad como el prototipo actual del interferómetro.

Sobre sistema óptico:

- El retardo en las señales de interferencia puede generarse con un NPBS, películas polarizadoras a 0° y 90° y una película retardadora de $\frac{1}{4} \lambda$.
- Un haz de luz retardado $\frac{1}{4} \lambda$ tiene polarización circular, pero un haz polarizado circularmente no necesariamente está retardado.
- El diámetro del puntero láser es un factor determinante en la sensibilidad a las vibraciones en el sistema.

Sobre sistema mecánico:

- El juego de soportes mecánicos mantuvo alineado al sistema óptico por periodos de tiempo prolongados sin necesitar corrección alguna.
- El nivel de integración obtenido entre el sistema óptico y el mecánico facilita la puesta en marcha del interferómetro minimizando el tiempo de alineación.

Sobre sistema electrónico:

- A pesar de la presencia de ruido eléctrico durante los ensayos de caracterización, el sistema electrónico demostró su capacidad para realizar los conteos de franjas de forma adecuada.

Sobre la interfaz computacional:

- La interfaz programada es operativa y contiene los elementos esenciales para realizar la captura de información de desplazamiento.

Sobre el sistema de interferometría:

El potencial del arreglo óptico utilizado en interferómetro desarrollado en 2011 no fue explotado, principalmente por complicaciones en la alineación y ruido electrónico proveniente de diversas fuentes, el presente trabajo buscó atender estos aspectos y se dio un paso importante hacia la integración de sus dispositivos, las soluciones propuestas dieron como resultado un sistema más compacto y sencillo de alinear.

La presencia inesperada del fenómeno de deriva, llevó a replantear las condiciones de los ensayos para controlarla, sin evidencia de su origen la deriva no se presentó para el tercer montaje experimental; sin embargo las nuevas condiciones para la experimentación permitieron encontrar algunos factores de influencia que propician el error en las mediciones del sistema que permitieron conocerlo y caracterizarlo en medida de las posibilidades actuales.

A pesar de que los resultados experimentales no son definitivos para alcanzar el objetivo planteado, el desarrollo realizado durante dos años reportado en el presente escrito, permitió ahondar y acrecentar la comprensión y práctica de las técnicas de interferometría, que deberán servir como referencia para posteriores trabajos referentes al tema.

5.3 Trabajo futuro

Para el sistema óptico:

- Ajustar el desfase de las señales de interferencia para evitar la incertidumbre en las mediciones con el uso del material óptico apropiado.
- Probar alguna configuración de doble paso para aumentar la resolución del sistema.

Para el sistema mecánico:

- Fabricar el juego de soportes con un material de mayores propiedades mecánicas y térmicas que le otorgue al sistema una mayor durabilidad, por ejemplo con alguna variedad de aluminio.

Para el sistema electrónico:

- Llevar el sistema electrónico a un juego de circuitos impresos que permita la ágil detección de problemas e inconvenientes.
- Incorporar comunicación USB.
- Incluir sistemas de filtrado adecuados para impedir ruido proveniente de la toma de alimentación.

Para la interfaz computacional:

- Diseñar una interfaz más sencilla de operar con más opciones para realizar ensayos.
- Optimizar el uso de recursos de la PC durante ensayos prolongados.

Para un nuevo prototipo de interferómetro:

- Establecer un arreglo de pruebas más apropiado para caracterizar el interferómetro, capaz de realizar desplazamientos con menos vibración.
- Buscar un nivel mayor de integración con el uso de fibra óptica para prescindir de la alineación del tubo láser o bien, implementar el uso de un diodo láser que pueda integrarse al sistema mecánico.
- Incluir un lente para aumentar el diámetro del puntero láser y disminuir la sensibilidad del alineamiento a las vibraciones.
- Probar fuentes de luz de menor longitud de onda con el propósito de aumentar la resolución.
- Desarrollar un interferómetro que pueda realizar mediciones en dos ejes de manera simultánea.
- Empezar el desarrollo de un sistema de interferometría con detección heterodina.

Bibliografía

- Cirovic, M. M. (2003). *Electrónica Fundamental*. Reverté.
- Alagón, S. (2011). *Interferómetro láser tipo Michelson para la caracterización de micromáquinas herramienta*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, México.
- ADGCH. (2011). *Óptica Física, Interferometría*. Centro de Investigaciones en Óptica, León, Gto.
- Bastian, P. (1996). *Electrotécnica*. Ediciones Akal.
- Flores, N., & Figueroa, J. (2007). *Física Moderna*. Pearson Prentice Hall.
- Gregorcic, P., Pozar, T., & Mozina, J. (2009). Quadrature phase-shift error analysis using a homodyne laser interferometer. *OPTICS EXPRESS*, 17.
- Haijiang, H., Xiaoqian, Q., Wang, j., & Aison, J. (2009). Subdivision and direction recognition of 1/16 L orthogonal fringes for nanometric measure. *Optical Society of America*, 48 (33).
- Hecht, E. (1986). *Óptica*. Wilmington: Addison-Wesley.
- Herrera, G. (2010). *Investigación y Evaluación de mecanismos para el desarrollo de micromáquinas herramienta*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, México.
- Hewlett-Packard. (1983). *Hewlett-Packard Journal Vol 34, No 4*.
- Jinhong, K., & Deutsch, E. (2011). A Monolithic Mems Michelson Interferometer for FTIR spectroscopy. *Transducers*.
- McKelvey, J. P., & Grotch, H. (1978). *Física para ciencias e ingeniería*. NY: Harper & Row.
- Matweb. (n.d.). *Acrylic*. Retrieved 14 de junio de 2013 from <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=632572aef2a4224b5ac8fbd4f1b6f77>
- Matweb. (n.d.). *NBK7*. Retrieved 12 de Junio de 2013 from <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2bf94d7e6f634a9b8f5ce0570f8a1e3a>
- Michelson, A., & Morley, E. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*.
- Renishaw. (2012). *High-precision laser interferometer feedback systems*.
- Tang, S., Wang, Z., Jiang, Z., Gao, J., & Guo, J. (2011). A New Measuring Method for Circular Motion Accuracy of NC Machine Tools Based on Dual-frequency Laser Interferometer.
- Texas Instruments. (2011). *Converters, Application Brief Photo-Diode Current-To-Voltage*. Texas Instruments.
- Thorlabs. (2012). *FDS100 Spec Sheet*.
- Thywissen, J., & Amy, Q. (2012). 0.86 MHz Bandwidth photodiode amplifier for a beam motion system.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (Vol. 2). NY: W.H. Freeman and Company.

Uchino, K., & Ginniewicz, J. R. (2003). *Micromechatronics*. NY: Marcel Dekker.

Walcher, H. (1994). *Position Sensing. Angle and distance measurement for engineers*. Linacre House, Jordan Hill: Butterworth-Heinemann.

Yan, L., Chen, B., Li, D., Li, C., & Tang, W. (2009). Signal Processing method of a laser synthetic wavelength interferometer. *Measurement Science and Technology* .

Zygo Co. (1999). *A Primer on Displacement Measuring Interferometers*.

