

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Estudio de factibilidad del uso de interferómetro en fibra óptica como sensor de vibraciones aplicado a plataformas móviles

Rubén Alejandro Padilla Daza

**Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico**

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime Cariñe Catrileo

Comisión:
Dra. Silvia Restrepo
Dr. Ricardo Bustos

Concepción, abril de 2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime Cariñe Catrileo

Estudio de factibilidad del uso de interferómetro en fibra óptica como sensor de vibraciones aplicado a plataformas móviles

Rubén Alejandro Padilla Daza

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Concepción, abril de 2023

Resumen

Los interferómetros ópticos son instrumentos que se utilizan para medir longitudes, ángulos, índices de refracción, formas de onda y otros parámetros ópticos. Su funcionamiento se basa en dividir un haz de luz en dos caminos ópticos, que luego se vuelven a combinar para producir un patrón de interferencia. Existen varios tipos de interferómetros ópticos, entre ellos, el interferómetro de Sagnac y el interferómetro de Mach Zehnder. Cada tipo tiene su propia configuración y se utiliza para distintas aplicaciones, tales como, astronomía, comunicaciones, entre otros. Estos sensores ópticos son dispositivos que utilizan la luz para detectar y medir variables físicas.

En este trabajo se evalúa la factibilidad del uso de interferómetros contruidos en fibra óptica como sensor de vibraciones aplicado a plataformas móviles. Estas son plataformas que tienen un movimiento controlado por señales eléctricas, tales como un parlante, plataformas de ensayos sísmicos, etc. En primera instancia se realiza la construcción de los interferómetros de Mach Zehnder y Sagnac con dispositivos contruidos en fibras ópticas de bajo costo. Se evalúa su comportamiento para distintas vibraciones generadas por un parlante. Estas vibraciones son controladas por un generador de funciones que permite modificar su amplitud y frecuencia. A su vez, estas serán captadas por los interferómetros y se analiza la relación entre la vibración generada y la señal recibida por el interferómetro. Posteriormente se compara la señal del interferómetro en el dominio del tiempo y en frecuencia con la señal de los sensores que dispone el Departamento de Ingeniería Civil en la plataforma móvil. Los principales resultados del estudio muestran que el interferómetro de Sagnac presenta una alta correlación en amplitud y frecuencia, respecto a las vibraciones mecánicas controladas desde un parlante. Para el caso de estudio sobre una plataforma móvil, se encontró una correlación del 85% en el dominio del tiempo y del 96% en el dominio de la frecuencia al compararlo con el transductor de desplazamiento lineal variable, o también conocido como sensor LVDT.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi madre, padre y hermano por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Su amor, aliento y motivación han sido fundamentales para alcanzar mis metas y superar los obstáculos en el camino.

Asimismo, quisiera extender mi agradecimiento a mis amigos, en especial a Daniel Nusdel, Felipe Fierro, Ariel Soto, Ricardo Bahamonde, Sebastián Aedo, Cristóbal Leiva, Diego Monsalve, Marcos Torres y Matías Reyes. Su amistad y apoyo han sido de gran ayuda en los buenos y malos momentos que he atravesado. Siempre han estado ahí para escucharme, aconsejarme y motivarme a seguir adelante.

También me gustaría agradecer a mi profesor guía, el Dr. Jaime Cariñe, quien con su amplia experiencia y conocimientos me guió en esta etapa para lograr los resultados buscados en mi tesis.

Además, quiero expresar mi agradecimiento al profesor Nelson Maureira del Departamento de Ingeniería Civil, quien me brindó su ayuda y asesoramiento en la etapa final de mi tesis.

Por último, quiero agradecer a todos los docentes del Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica por los conocimientos que me brindaron a lo largo de mi carrera. Su enseñanza y dedicación fueron cruciales para mi formación profesional y para llegar hasta donde estoy hoy.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. ESTADO DEL ARTE	7
1.2. MOTIVACIÓN	8
1.3. OBJETIVO GENERAL	8
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.5. METODOLOGÍA	9
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. VIBRACIONES MECÁNICAS	10
2.2. VIBRACIONES SÍSMICAS	11
2.3. SENSORES DE VIBRACIONES	12
2.4. FIBRA ÓPTICA Y DISPOSITIVOS EN FIBRAS ÓPTICAS	13
2.5. INTERFERÓMETRO EN FIBRAS ÓPTICAS Y APLICACIONES	17
2.5.1 <i>Aplicaciones interferómetro Mach Zehnder</i>	22
2.5.1 <i>Aplicaciones interferómetro Sagnac</i>	24
2.6. PREPROCESAMIENTO DE LA SEÑAL	25
2.7. PROCESAMIENTO DE SEÑALES	25
CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN DE SENSORES ÓPTICOS Y SU EVALUACIÓN EN LABORATORIO	28
3.1. MACH ZEHNDER Y SAGNAC CONSTRUIDOS CON FIBRAS ÓPTICAS	28
3.2. ESTABILIDAD DE LOS INTERFERÓMETROS	29
3.3. ESTUDIO DEL INTERFERÓMETRO ANTE VIBRACIONES DESDE UN PARLANTE	31
3.4. RESULTADOS DE LOS SENSORES APLICADOS EN LABORATORIO	33
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS EN CAMPO	38
4.1 EVALUACIÓN DEL SENSOR EN PLATAFORMA MÓVIL DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL	38
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN PLATAFORMA MÓVIL	41
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	43
5.1 TRABAJO FUTURO	43
REFERENCIAS	44
ANEXO A. CÓDIGOS EN MATLAB	46
ANEXO B. DATOS INTERFERÓMETRO SAGNAC	54
ANEXO C. TRABAJO PREVIO Y SU DESCRIPCIÓN	61

Capítulo 1. Introducción

Chile es uno de los países más sísmicos de todo el mundo, siendo afectados por grandes terremotos que han ocasionado innumerables pérdidas tanto materiales como humanas [1]. Las frecuencias predominantes en los sismos varían entre 2 Hz a 12 Hz [2]. Los sismos se pueden detectar utilizando sismómetros, que son dispositivos que miden las vibraciones en el suelo, acelerómetros, que miden la aceleración de las vibraciones, entre otros [3]. Entre los sensores de vibraciones hay sistemas ópticos llamados interferómetros, para sensar vibraciones mecánicas. El interferómetro es un instrumento que se utiliza para medir variables utilizando las interferencias. En óptica, la interferencia se produce con la superposición de dos o más haces de luz [4]. Los interferómetros en fibra óptica son importantes, ya que presentan varias ventajas tales como pequeño tamaño, pasividad eléctrica, inmunidad a la interferencia electromagnética, entre otros factores [5].

1.1. Estado del arte

Un tipo de interferómetro es el Mach Zehnder construido utilizando dos dispositivos en fibras ópticas llamados beam splitter. Entre sus aplicaciones tenemos la detección de ejes de vehículos para carretera con el fin de poder ayudar en la gestión de tráfico [6]. También con este interferómetro se ha monitoreado dinámicamente la densidad del tráfico, las vibraciones de las carreteras, el ruido en las ciudades [7] y la velocidad del vehículo [8]. Para evaluar la calidad de este tipo de sensores se realizó un estudio comparativo entre una estación sísmica estándar, y un sensor interferométrico de Mach Zehnder, dando como resultado que ambos detectaron todos los tranvías, por lo que un sensor óptico sirve como herramienta de monitoreo de las respuestas vibratorias de los tranvías [5]. Estos sensores ópticos son dispositivos que utilizan la luz para detectar y medir variables físicas.

Otro tipo de sensor óptico es el interferómetro de Sagnac, el cual ha sido utilizado como sensor de corriente insensible a las vibraciones [9]. Otra aplicación, es como sensor de temperatura debido a la alta sensibilidad a variaciones de temperatura que presentan las fibras de alta birrefringencia [10]. Aunque existen otras configuraciones para interferómetros, en este trabajo estudiaremos el tipo Mach Zehnder y Sagnac. Una mejor descripción de los trabajos se muestra en el anexo c.

1.2. Motivación

En la actualidad, los sensores ópticos se han posicionado como una herramienta efectiva y confiable en diversas aplicaciones. Estos pueden ser desarrollados en la Universidad con elementos disponibles en el Laboratorio de Optoelectrónica, los cuales podrían ser un 90% más económicos que los sensores de vibraciones tradicionales. Dado el análisis anterior, en este trabajo se propone estudiar la factibilidad de utilizar interferómetros contruidos con dispositivos de fibra óptica de bajo costo, para sensar vibraciones desde plataformas móviles.

1.3. Objetivo General

Evaluar la calidad de interferómetros Mach Zehnder y Sagnac, contruidos en fibra óptica, para sensar movimientos sísmicos simulados desde plataforma móvil.

1.4. Objetivos específicos

- Construir interferómetros en fibra ópticas de bajo costo.
- Caracterizar arquitecturas de interferómetros en fibra óptica en laboratorio.
- Procesar las señales ópticas para su análisis en el tiempo y plano de Fourier, obteniendo parámetros como amplitud y frecuencia de la variable mecánica.
- Evaluar que los resultados ópticos se correlacionen con el resultado de sensores tradicionales facilitados por el Departamento de Ingeniería Civil.

1.5. Metodología

Las arquitecturas de los diferentes interferómetros se implementarán con fibra óptica, disponible en el Laboratorio de Optoelectrónica, para luego evaluarlas en plataformas móviles capturando mediciones de vibraciones desde un osciloscopio digital. La data digital, se filtra o preprocesa utilizando el software Matlab, para luego estimar parámetros de amplitud y frecuencias de las vibraciones mecánicas. Las primeras evaluaciones de los dispositivos se realizan con vibraciones emuladas con un parlante en el Laboratorio de Optoelectrónica, para finalmente evaluar su funcionamiento en la plataforma móvil del Departamento de Ingeniería Civil.

1.6. Alcances y limitaciones

Todo lo planteado anteriormente será realizado con la infraestructura y materiales que se encuentran disponibles en el Laboratorio de Optoelectrónica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Las mediciones finales se realizan en plataforma instalada en el Edificio San José Obrero del Departamento de Ingeniería Civil.

Como limitación, esta tesis busca evaluar la factibilidad y no desarrollar un dispositivo. Esto se debe a que el desarrollo requiere mayor tiempo de ejecución.

Capítulo 2. Marco Teórico

En este capítulo se tratarán las vibraciones mecánicas y sísmicas, junto con sus respectivas definiciones. También se explicarán los distintos tipos de fibras ópticas y sus componentes, así como el funcionamiento y las aplicaciones del interferómetro Mach Zehnder y Sagnac.

2.1. Vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas se describen como el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. Estas vibraciones se caracterizan por dos magnitudes frecuencia (Hz) y amplitud (m) [11].

Las vibraciones mecánicas se pueden clasificar según la forma de onda de la vibración:

Vibraciones simples: son vibraciones que se producen en un sistema mecánico en el que la forma de la onda es sinusoidal y tiene una sola frecuencia.

Vibraciones compuestas: son vibraciones que se producen en un sistema mecánico en el que la forma de la onda no es sinusoidal y puede tener varias frecuencias. Las vibraciones compuestas se pueden descomponer en varias vibraciones simples con diferentes frecuencias, amplitudes y fases [12].

A continuación, en la fig.2.1 se puede visualizar la forma de onda de estas vibraciones.

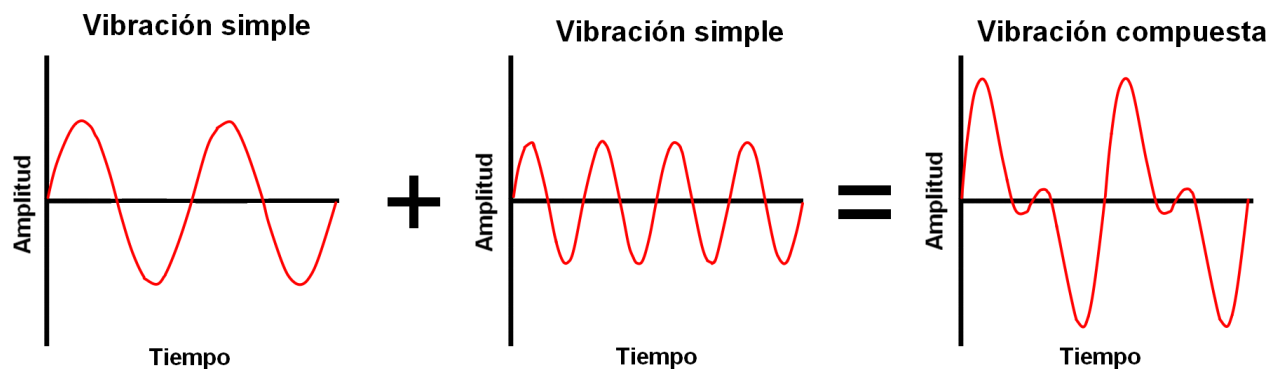


Fig.2.1: Clasificación forma de onda de la vibración.

2.2. Vibraciones sísmicas

Un sismo es el proceso de generación de ondas elásticas y su posterior propagación por el interior de la Tierra. Al llegar a la superficie de la tierra estas ondas producen movimiento y vibración del suelo [13]. Existen dos clases de ondas sísmicas las de cuerpo y las superficiales. Las de cuerpo se propagan por el interior de la tierra, mientras que las superficiales se propagan a lo largo de la superficie.

Como ondas de cuerpo tenemos:

Ondas Primarias (P): estas ondas hacen movimiento de empuje y contracción, tiene una velocidad de propagación de 6 Km/s. Las ondas P puede viajar a través de las rocas sólidas y líquidos, haciendo que las partículas del medio se muevan en la misma dirección de propagación de la onda.

Ondas Secundarias (S): estas ondas llegan después que las ondas P, tiene una velocidad de propagación de 3,5 Km/s. Las ondas S solo pueden propagarse a través de rocas sólidas produciendo movimientos perpendiculares a la dirección en que se propagan.

A continuación, en la fig.2.2 se puede visualizar las ondas de cuerpo.

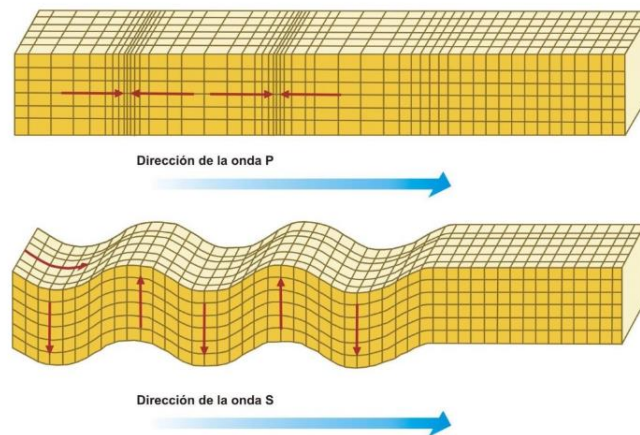


Fig.2.2: Ondas de cuerpo. Fuente: [14].

Como ondas superficiales tenemos:

Ondas Love: estas ondas están compuestas por múltiples ondas S reflejadas y superpuestas. Las ondas Love mueven el suelo de lado a lado produciendo un movimiento horizontal.

Ondas Rayleigh: estas ondas están compuestas por una combinación de ondas P y S. Las ondas Rayleigh producen un movimiento horizontal y vertical en un plano vertical indicando la dirección del movimiento.

Las velocidades de propagación para las ondas superficiales varían entre 3,5 y 4,5 Km/s [15].

A continuación, en la fig.2.3 se puede visualizar las ondas superficiales.

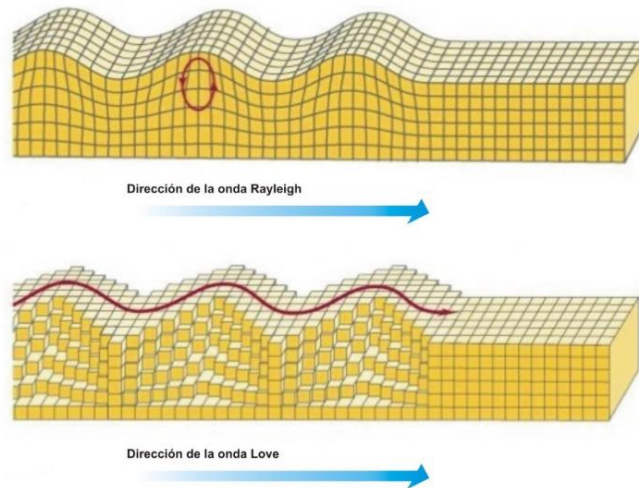


Fig.2.3: Ondas de superficie. Fuente: [14].

Este tipo de ondas sísmicas tienen vibraciones o movimientos en frecuencia entre 2Hz a 12Hz [2].

2.3. Sensores de vibraciones

Dentro de los sensores comerciales, podemos encontrar acelerómetros que miden la aceleración, tales como los modelos PCE-AC500G (fig.2.4a), VSP001 (fig.2.4b) y 333B50 (fig.2.4c). Estos sensores tienen un rango de detección de frecuencias que oscilan entre 0,6 a 23 kHz [16], 0,6 a 10 kHz [17] y 0,5 a 3 kHz [18] respectivamente. En cuanto a su precio, el costo de estos sensores comerciales varía entre \$378 a \$622 USD.



Fig.2.4: Sensores comerciales. a) PCE-AC500G. b) VSP001. C) 333B50. Fuente: [16], [17] y [18].

Además, también se puede contar con un sensor de desplazamiento proporcionado por el Departamento de Ingeniería Civil, llamado LVDT (transductor de desplazamiento lineal variable). Este tipo de sensor (fig.2.5) es un transductor electrónico que mide el desplazamiento lineal de un objeto [19], con precio estimado en el mercado de \$450 a \$600 USD [20].



Fig.2.5: LVDT Ingeniería Civil.

Estos sensores de vibraciones se basan en el principio de la inducción electromagnética. Este fenómeno físico establece que cuando un campo magnético varía en intensidad o dirección cerca de un conductor eléctrico, se genera una corriente eléctrica en el mismo [21].

2.4. Fibra óptica y dispositivos en fibras ópticas

La fibra óptica es un sistema de transmisión de datos usado habitualmente en telecomunicaciones, que consiste en un hilo muy fino de material transparente (vidrio o silica), por el que se envían pulsos de luz que representan datos a transmitir. La fibra óptica está compuesta por un núcleo, revestimiento y cubierta como se aprecia en la fig.2.6, donde:

Núcleo: es el medio físico que permite transmitir las señales ópticas de un lugar a otro. Puede estar compuesto por vidrio ultrapuro de cuarzo o de dióxido de silicio.

Revestimiento: es la capa que rodea al núcleo con la finalidad de confinar la luz en el centro. Está compuesto por el mismo material que el núcleo, pero se le agregan dopantes para poder tener un índice de refracción distinto.

Cubierta: es la capa protectora de la fibra óptica compuesta de plástico con la finalidad de amortiguar golpes [22].

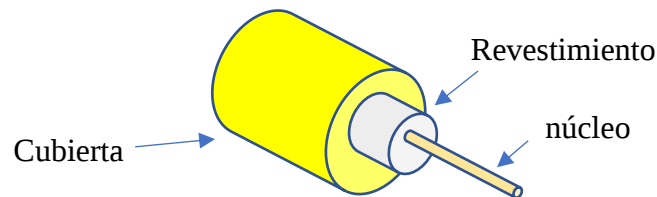


Fig.2.6: Estructura de la fibra óptica.

La fibra óptica se puede clasificar según su modo de propagación. La palabra modo hace referencia al camino que sigue el haz de luz a través de la fibra. En esta categoría encontramos dos clases de fibra; monomodo y multimodo.

La fibra monomodo se caracteriza porque la trayectoria del haz de luz solo puede seguir un único camino. Si el índice de refracción del núcleo es muy diferente al del revestimiento, se dice que son fibra monomodo de índice escalonado.

La fibra multimodo se caracteriza por permitir que el haz de luz siga múltiples trayectorias debido a que tiene un núcleo mayor que el de la fibra monomodo, lo que permite una mayor dispersión del haz de luz [23].

Para la utilización de fibras ópticas en circuitos ópticos uno de los elementos más importantes es el beam splitter (BS). El BS es un dispositivo óptico cuya función es dividir un haz de luz en dos caminos ópticos. Según el esquemático de la fig.2.7, cuando incide un haz de luz en el beam splitter un porcentaje de este se refleja (r) mientras que otro se transmite (t), donde $r + t = 1$.

En la fig.2.7 se puede observar que la señal incidente 2 (E_{in_2}) de color rojo se divide en una señal reflejada y una señal transmitida. La señal reflejada presenta un desfase de π , lo cual se debe a que el material presenta un índice de refracción mayor que la luz incidente.

Por otro lado, en la señal incidente 1 (E_{in_1}) de color azul, el haz se divide en una señal reflejada y una señal transmitida. Sin embargo, a diferencia de la señal incidente 2, en la señal reflejada no se produce un desfase debido a que el material presenta un índice de refracción menor que la luz incidente.

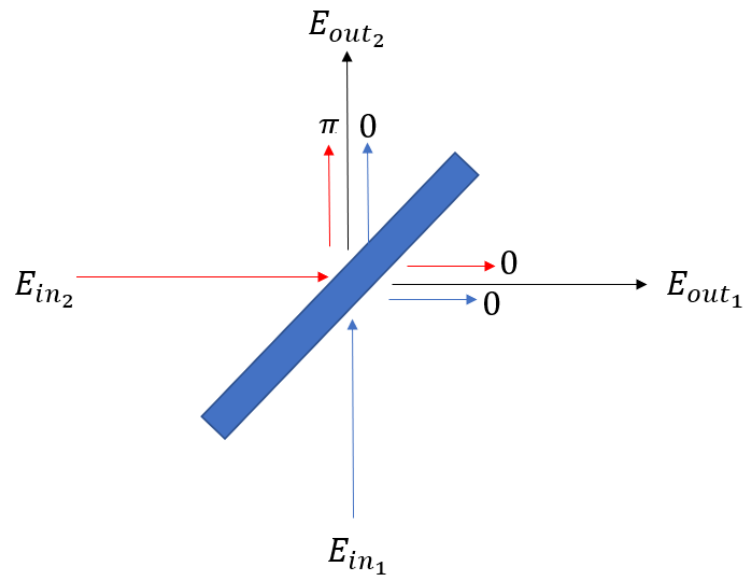


Fig.2.7: Estructura de un Beam Splitter.

Expresando las ecuaciones del campo eléctrico de un frente de ondas (o luz) sobre el BS.

$$\begin{aligned} E_{out1} &= r \cdot E_{in1} + t \cdot E_{in2} \\ E_{out2} &= t \cdot E_{in1} + r \cdot E_{in2} \cdot e^{j\pi} \end{aligned} \quad (1)$$

Utilizando la propiedad de Euler ($e^{jn} = \cos(n) + j\sin(n)$) en E_{out2} se tiene que:

$$\begin{aligned} E_{out2} &= t \cdot E_{in1} + r \cdot E_{in2} \cdot (\cos(\pi) + j\sin(\pi)) \\ E_{out2} &= t \cdot E_{in1} - r \cdot E_{in2} \end{aligned} \quad (2)$$

Llevando las ecuaciones del campo eléctrico a forma matricial.

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & t \\ t & -r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para un sistema simétrico donde las intensidades de las señales se distribuyen uniformemente se puede probar que $r = t = 1/\sqrt{2}$. Para demostrar esto se tiene que la intensidad es el campo eléctrico conjugado multiplicado por su campo eléctrico ($I = E^* \cdot E$).

$$I_2 = E_{in_2}^2 \quad (4)$$

$$I_r = (r \cdot E_{in_2} \cdot e^{j\pi})^* \cdot (r \cdot E_{in_2} \cdot e^{j\pi}) = (r \cdot E_{in_2})^2 \quad (5)$$

$$I_t = (t \cdot E_{in_2})^* (t \cdot E_{in_2}) = (t \cdot E_{in_2})^2 \quad (6)$$

Donde:

I_r : Corresponde a la intensidad reflejada.

I_t : Corresponde a la intensidad transmitida.

Para un sistema ideal se tiene que:

$$I_2 = I_r + I_t \quad (7)$$

Remplazando las intensidades:

$$E_{in_2}^2 = (r \cdot E_{in_2})^2 + (t \cdot E_{in_2})^2 \quad (8)$$

$$1 = r^2 + t^2 \quad (9)$$

Ahora, para un sistema simétrico $r=t$:

$$1 = r^2 + r^2 \quad (10)$$

$$r = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

Finalmente, la matriz de proceso del beam splitter queda como:

$$M_{BS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para poder monitorear la potencia óptica desde de una fuente de luz es necesario incluir un fotodetector, el cual entrega un voltaje de salida en función de la potencia óptica (P_{opt}).

Este voltaje depende de la respuesta a una longitud de onda $R(\lambda)$ (en nuestro laboratorio contamos con el detector PDA05CF2 [24] y este parámetro se muestra en la fig.2.8), de una ganancia de transimpedancia (G) y de un factor de escalamiento (FE), tal como se muestra en la ecuación 13.

$$V_{out} = P_{opt} \cdot \mathfrak{R}(\lambda) \cdot G \cdot FE \quad (13)$$

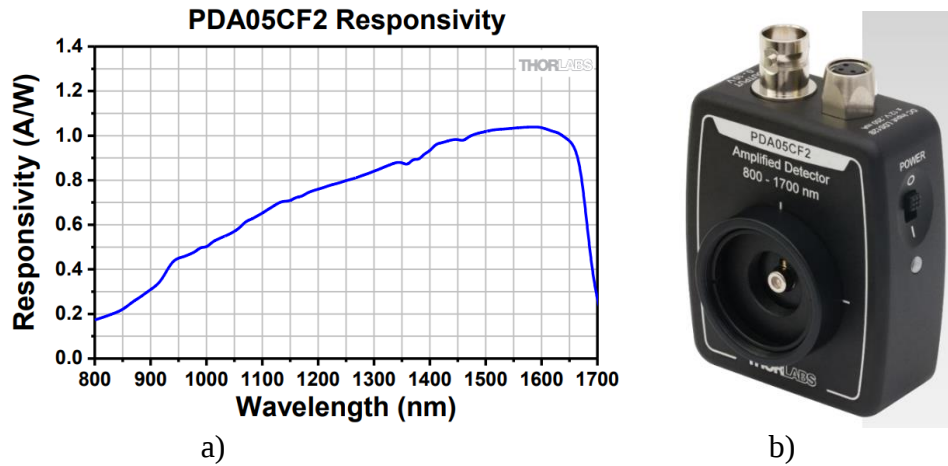


Fig.2.8: Detector óptico, a) Respuesta en función de la longitud de onda ($\mathfrak{R}(\lambda)$). b) Forma física del detector. Fuente: [24].

2.5. Interferómetro en fibras ópticas y aplicaciones

Un interferómetro es un instrumento que se utiliza para medir variables utilizando las interferencias de estos. En óptica, la interferencia se produce cuando dos o más haces de luz se superponen entre sí [4].

Una arquitectura clásica en interferómetro es el propuesto por Mach Zehnder (MZ) y se basa en la conexión de dos beam splitter (BS). A continuación, obtendremos las ecuaciones que rigen el interferómetro Mach Zehnder.

Un interferómetro Mach Zehnder es la conexión de dos beam splitter en cascada como se muestra en la fig.2.9, el primero que divide el haz de luz y el segundo que los recombina. Al pasar de un beam splitter al otro existirán variaciones de fase la que queda reflejada en la fig.2.10.

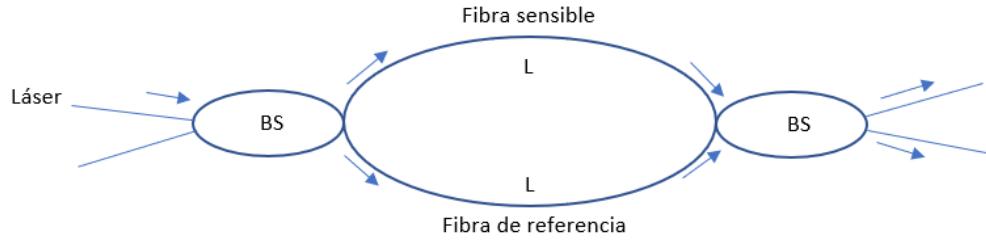


Fig.2.9: Estructura del interferómetro Mach Zehnder.

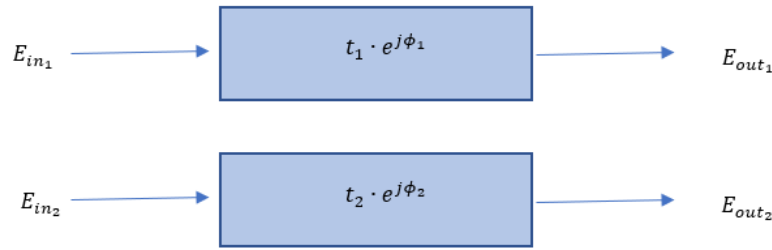


Fig.2.10: Diagrama variación de fase.

Aplicando las ecuaciones del campo eléctrico.

$$\begin{aligned} E_{out1} &= t_1 \cdot e^{j\phi_1} \cdot E_{in1} + 0 \cdot E_{in2} \\ E_{out2} &= t_2 \cdot e^{j\phi_2} \cdot E_{in2} + 0 \cdot E_{in1} \end{aligned} \quad (14)$$

Expresándolo en matrices queda como:

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} & 0 \\ 0 & t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde la matriz del proceso de la variación de fase es:

$$M_\phi = \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} & 0 \\ 0 & t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Y ahora se puede determinar la matriz del proceso del Mach Zehnder con la fig.2.11.

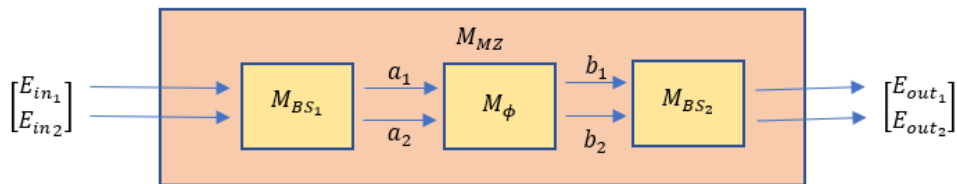


Fig.2.11: Diagrama de interferómetro Mach Zehnder.

Expresando las ecuaciones del campo eléctrico del diagrama del interferómetro Mach Zehnder se tiene que:

$$\begin{bmatrix} E_{out_1} \\ E_{out_2} \end{bmatrix} = M_{BS_2} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Remplazando la matriz b.

$$\begin{bmatrix} E_{out_1} \\ E_{out_2} \end{bmatrix} = M_{BS_2} \cdot M_{\phi} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Remplazando la matriz a.

$$\begin{bmatrix} E_{out_1} \\ E_{out_2} \end{bmatrix} = M_{BS_2} \cdot M_{\phi} \cdot M_{BS_1} \cdot \begin{bmatrix} E_{in_1} \\ E_{in_2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Finalmente, la matriz del proceso del Mach Zehnder queda representada como:

$$M_{MZ} = M_{BS_2} \cdot M_{\phi} \cdot M_{BS_1} \quad (20)$$

Donde:

$$M_{BS_1} = M_{BS_2} \quad (21)$$

Remplazando las matrices del proceso del Mach Zehnder se tiene que:

$$M_{MZ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} & 0 \\ 0 & t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$M_{MZ} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} & t_2 \cdot e^{j\phi_2} \\ t_1 \cdot e^{j\phi_1} & -t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$M_{MZ} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} + t_2 \cdot e^{j\phi_2} & t_1 \cdot e^{j\phi_1} - t_2 \cdot e^{j\phi_2} \\ t_1 \cdot e^{j\phi_1} - t_2 \cdot e^{j\phi_2} & t_1 \cdot e^{j\phi_1} + t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ahora con esta matriz del proceso del interferómetro de Mach Zehnder se puede determinar el campo eléctrico.

$$E_{MZ} = M_{MZ} \cdot \begin{bmatrix} E_{in_1} \\ E_{in_2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

En un interferómetro se tiende a utilizar una sola fuente de entrada para generar sus salidas.

$$E_{MZ} = M_{MZ} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Remplazando la matriz.

$$E_{MZ} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} + t_2 \cdot e^{j\phi_2} & t_1 \cdot e^{j\phi_1} - t_2 \cdot e^{j\phi_2} \\ t_1 \cdot e^{j\phi_1} - t_2 \cdot e^{j\phi_2} & t_1 \cdot e^{j\phi_1} + t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$E_{MZ} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_1 \cdot e^{j\phi_1} + t_2 \cdot e^{j\phi_2} \\ t_1 \cdot e^{j\phi_1} - t_2 \cdot e^{j\phi_2} \end{bmatrix}$$

Finalmente, para determinar las intensidades se utiliza $I = E^* \cdot E$.

Para la primera intensidad.

$$I_1 = \frac{1}{2} (t_1 \cdot e^{-j\phi_1} + t_2 \cdot e^{-j\phi_2}) \cdot \frac{1}{2} (t_1 \cdot e^{j\phi_1} + t_2 \cdot e^{j\phi_2}) \quad (27)$$

$$I_1 = \frac{1}{4} (t_1^2 + t_1 \cdot t_2 \cdot e^{j(\phi_2 - \phi_1)} + t_1 \cdot t_2 \cdot e^{-j(\phi_2 - \phi_1)} + t_2^2)$$

Donde $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$.

$$I_1 = \frac{1}{4} (t_1^2 + t_1 \cdot t_2 \cdot e^{j\Delta\phi} + t_1 \cdot t_2 \cdot e^{-j\Delta\phi} + t_2^2) \quad (28)$$

Utilizando la propiedad de Euler.

$$I_1 = \frac{1}{4} (t_1^2 + t_1 \cdot t_2 (\cos(\Delta\phi) + j\sen(\Delta\phi)) + t_1 \cdot t_2 (\cos(\Delta\phi) - j\sen(\Delta\phi)) + t_2^2) \quad (29)$$

$$I_1 = \frac{1}{4} (t_1^2 + 2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cos(\Delta\phi) + t_2^2)$$

Donde t_1 puede ser igual a t_2 en caso ideal, por lo tanto, pueden ser igual a 1.

$$I_1 = \frac{1}{4} (2 + 2 \cos(\Delta\phi)) \quad (30)$$

$$I_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos(\Delta\phi))$$

Se utiliza la propiedad trigonométrica $\cos^2\left(\frac{n}{2}\right) = \frac{1 + \cos(n)}{2}$ para poder obtener la primera intensidad.

$$I_1 = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (31)$$

Para la segunda intensidad.

$$I_1 + I_2 = 1 \quad (32)$$

Remplazando I_1 .

$$\cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + I_2 = 1 \quad (33)$$

$$I_2 = 1 - \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (34)$$

Para obtener la segunda intensidad se utiliza la identidad trigonométrica $\cos^2(n) + \sin^2(n) = 1$.

$$I_2 = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (35)$$

Y finalmente se obtienen las dos intensidades del interferómetro Mach Zehnder.

$$I_1 = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (36)$$

$$I_2 = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (37)$$

Por otro lado, una arquitectura alternativa es el interferómetro propuesto por Sagnac y esta se basa en un único beam splitter (BS). Donde dos haces salientes del BS atraviesan el mismo bucle de fibra en direcciones opuestas, denominadas direcciones sentido horario (CW) y antihorario (CCW).

Haciendo una analogía, CW sería como el haz reflejado y CCW sería el transmitido. La interferencia se genera cuando los haces CW y CCW recorren todo el bucle de la fibra recombiniéndose al pasar por el BS. Cuando una magnitud externa, como la onda mecánica, perturba la fibra cerca de un extremo del bucle, genera un cambio de fase instantáneo. Esta propiedad del interferómetro hace que sea adecuado para detectar perturbaciones o vibraciones mecánicas. La configuración se puede apreciar en la fig.2.12.

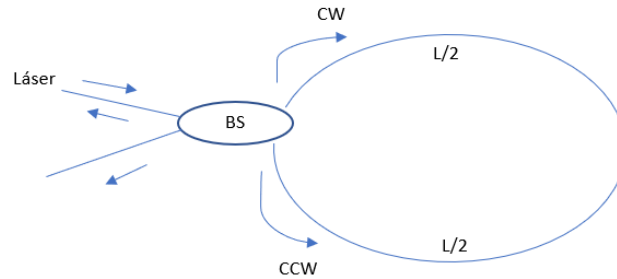
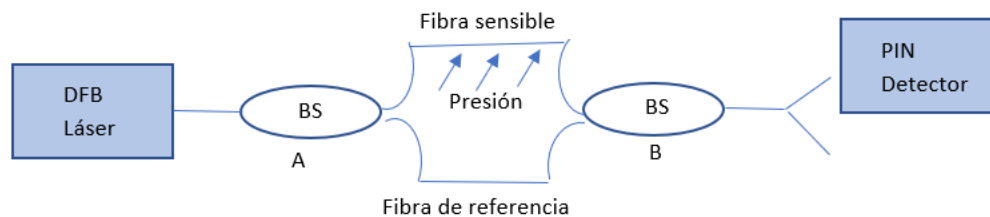


Fig.2.12: Estructura interferómetro Sagnac.

Las ecuaciones del interferómetro de Sagnac pueden ser expresadas por las ecuaciones del interferómetro Mach Zehnder (36) [25]. Sin embargo, a diferencia del MZ, los haces de luz CW y CCW al pasar por la misma fibra, no presentan problemas en polarización ni fase cuando la fibra no está expuesta a perturbaciones externas.

2.5.1 Aplicaciones interferómetro Mach Zehnder

Entre las aplicaciones de un MZ está su utilización para pesaje en movimiento (WIM) el que se esquematiza en la fig.2.13.



Donde:

DFB Láser: es un tipo de láser que emite luz coherente y monocromática a una longitud de onda específica.

PIN Detector: es un fotodetector.

Fig.2.13: Estructura básica del sensor.

En este sistema una luz láser pasa por la fibra óptica y se divide en 2 haces de luz en el BS A, una pasa por una fibra sensible y otra por la referencia hasta llegar al BS B, donde se recombinan estos haces llegando al detector. La señal de salida que es detectada por el detector PIN varía dependiendo de la diferencia de fase de los dos haces de luz al llegar al BS B, si se encuentran en fase la salida será máxima de lo contrario es mínima.

La instalación de este sistema se muestra en la fig. 2.14, donde la fibra sensible se incrusta directamente sobre el material compuesto y a la vez la fibra de referencia debe ser inmune a la presión externa ejercida. Cuando un vehículo pasa por el detector ejerce una presión sobre la fibra sensible, lo que produce un desfase entre los brazos del interferómetro, que refleja la presión externa [6] y es medida por la ecuación (36).

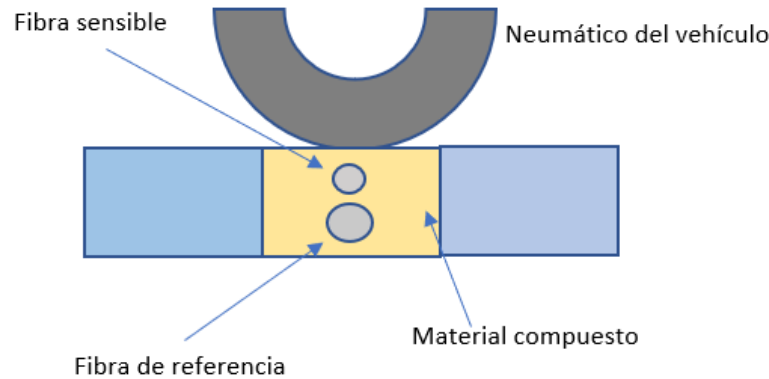


Fig.2.14: Disposición de los brazos sensible y de referencia.

Otra aplicación utilizando la MZ es la propuesta por [6], cuyo esquema se muestra en la fig.2.15.

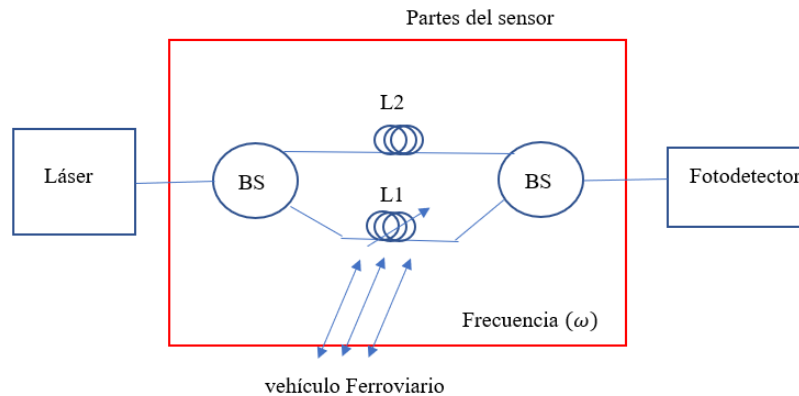


Fig.2.15: Esquema simplificado del sensor interferómetro basado en el interferómetro Mach Zehnder.

En este esquema el sensor se basa en el interferómetro Mach Zehnder de dos brazos. Cuando un vehículo ferroviario pasa cerca de un sensor provoca una respuesta con baja frecuencia, en el rango de varios Hz hasta cientos de Hz. Esta vibración excita la fibra óptica del sensor y provoca un cambio en su longitud óptica. El cambio de fase resultante viene dado por los cambios entre los brazos del

MZ, los cambios de la longitud del brazo y su índice de refracción. Estos cambios de fase al igual que el sistema anterior pueden medirse con la ecuación (36).

2.5.1 Aplicaciones interferómetro Sagnac

Entre las aplicaciones del Sagnac tenemos un sensor de corriente insensible a las vibraciones mecánicas, cuyo esquema se muestra en la fig.2.16. En este, el interferómetro permite medir la corriente (con una precisión de 0.2).

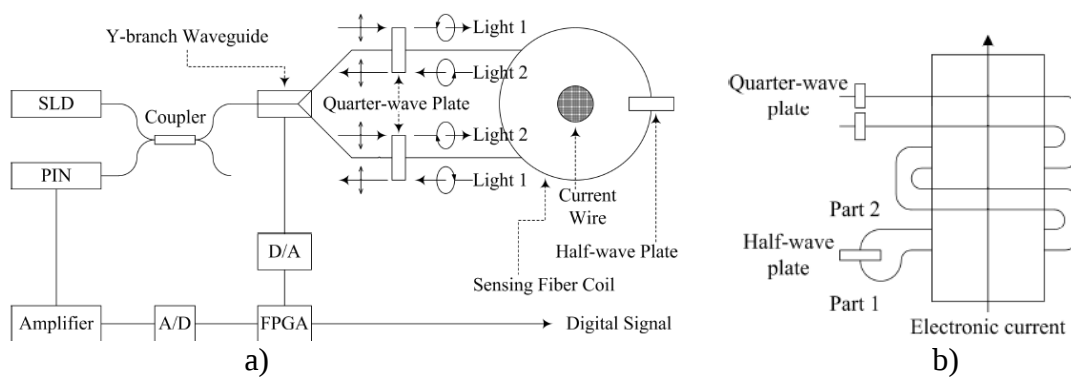


Fig.2.16: Sensor Sagnac. a) Estructura del sensor de corriente. b) Detalles de la fibra en el sistema electrónico. Fuente: [9].

Por otro lado, en la fig.2.17 se presenta el diseño de un sensor de temperatura automatizado y controlado, basando en el funcionamiento del interferómetro Sagnac.

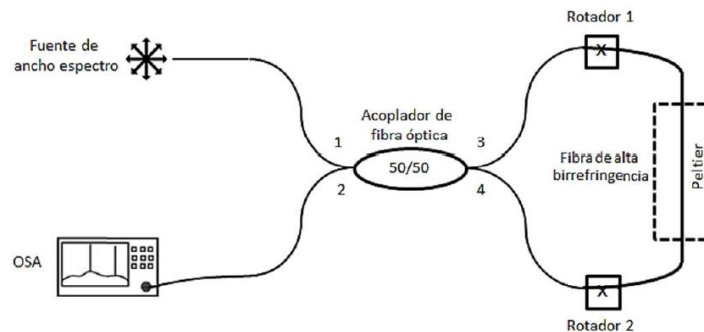


Fig.2.17: Arquitectura del interferómetro Sagnac propuesto. Fuente: [10].

En la fig.2.17 se muestra la arquitectura que se utilizó, consistente en un acoplador 50/50 con los puertos de salida empalmados a 43cm con fibra de alta birrefringencia ($B = 4.22 \times 10^{-4}$), estos empalmes conectan con rotadores mecánicos para ajustar la transmitancia del lazo.

Entre sus resultados el interferómetro de Sagnac con un lazo de alta birrefringencia les permitió hacer un ajuste, en el desplazamiento en longitud de onda del espectro de transmitancia de este, a través de la variación de la temperatura sobre la fibra del lazo [10].

Como se ha mostrado, los interferómetros son funcionales, para su fabricación es necesario conocer el precio de un BS y está alrededor de los \$18 USD [26]. En este contexto, el interferómetro MZ saldría a \$36 USD dado que necesita 2BS para su construcción y el interferómetro Sagnac estaría a \$18 USD.

2.6. Preprocesamiento de la señal

Los sistemas digitales utilizan preprocesamiento antes de procesar las señales. El preprocesamiento consiste en un filtro que limpia la señal, como por ejemplo un filtro pasa bajo. Frecuentemente se utiliza un filtro de media móvil, por ejemplo, el filtro de orden 5 que se muestra en la ecuación (38). El cual consiste en la realización de la media aritmética entre la muestra actual y las muestras anteriores [27].

$$y(n) = \frac{1}{5}x(n) + \frac{1}{5}x(n-1) + \frac{1}{5}x(n-2) + \frac{1}{5}x(n-3) + \frac{1}{5}x(n-4) \quad (38)$$

2.7. Procesamiento de señales

Por otro lado, el procesamiento para medir amplitud se puede utilizar los siguientes dos procesamientos a las señales, medición directa de amplitud y el valor RMS.

Para evaluar directamente la amplitud se puede utilizar señales sinusoidales sobre actuadores. En la fig.2.18 se muestra una señal sinusoidal la que se utilizará como guía para estimar la amplitud de la señal. En nuestro caso estimamos la amplitud máxima utilizando Matlab, a partir de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \quad (39)$$

Donde el voltaje máximo (V_{max}) y mínimo (V_{min}) son los que se analizan de la señal del interferómetro.

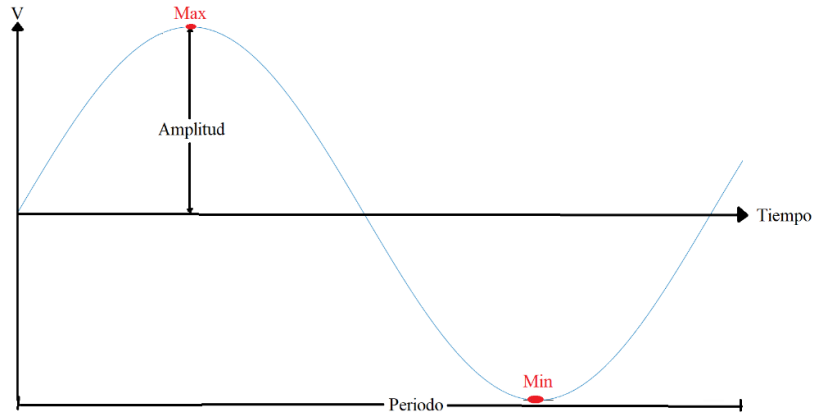


Fig.2.18: Señal Sinusoidal.

Otro parámetro por medir es el valor RMS, que es la magnitud efectiva de una señal. El cual se determina con la ecuación (40).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2} \quad (40)$$

Donde:

x_n : Corresponde a la señal del interferómetro.

N : Corresponde al largo de la señal del interferómetro.

Por otro lado, para estimar o evaluar la frecuencia se utiliza la transformada de Fourier que es una técnica matemática que se utiliza para analizar y comprender cómo varían las señales a lo largo del tiempo. Esta técnica permite convertir una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que permite ver qué frecuencias están presentes en la señal [28] y con eso podemos identificar las frecuencias de las señales que vamos a sensor.

$$F\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (41)$$

Donde:

$f(t)$: Corresponde a la señal del interferómetro.

El trabajo desarrollado en esta sección permite avanzar hacia el siguiente capítulo, en los cuales se abordará la construcción de interferómetros Mach Zehnder y Sagnac mediante el uso de beam splitter. Posteriormente, se llevará a cabo el preprocesamiento y procesamiento de las señales generadas por estos interferómetros, con el objetivo de analizar su amplitud y frecuencia. Finalmente, se compararán los resultados obtenidos con los de un sensor LVDT.

Capítulo 3. Construcción de sensores ópticos y su evaluación en laboratorio

En este capítulo se abordará la construcción de los interferómetros Mach Zehnder y Sagnac en fibra óptica, y se explicará cómo se evalúa su estabilidad. Asimismo, se explorará el comportamiento ante vibraciones utilizando un parlante para generarlas.

3.1. Mach Zehnder y Sagnac contruidos con fibras ópticas

El interferómetro Mach Zehnder se construye conectando dos BS. En la fig.3.1 se muestra como conectamos dos BS en fibra óptica para formar este interferómetro.

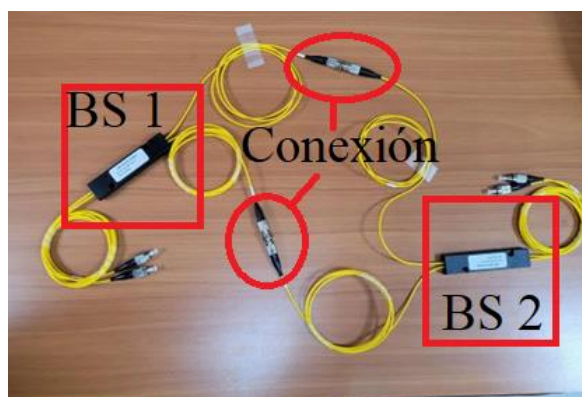


Fig.3.1: Interferómetro Mach Zehnder.

Por otro lado, el interferómetro Sagnac construido en el laboratorio se basa en un solo BS. La fig.3.2 muestra la única conexión de este dispositivo.

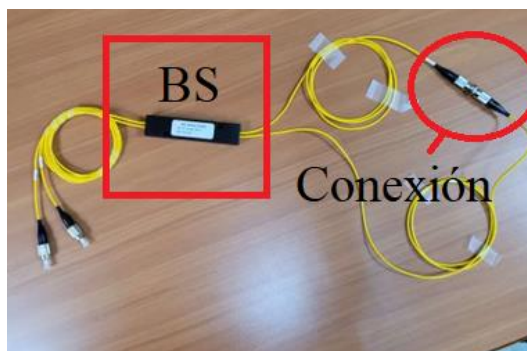
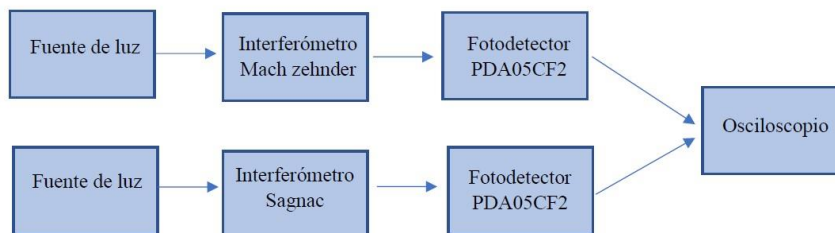


Fig.3.2: Interferómetro Sagnac.

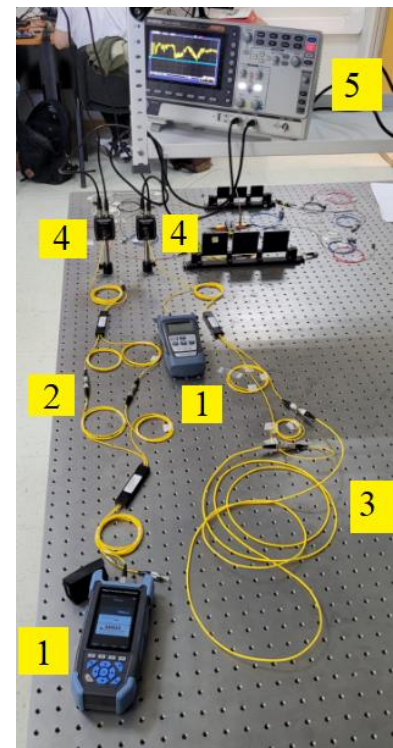
Esto tuvo un costo total de fabricación de \$36 y \$18 USD respectivamente, considerando solamente los BS, tal como se aprecia en las figuras 3.1 y 3.2.

3.2. Estabilidad de los interferómetros

Con la finalidad de conocer la estabilidad de los interferómetros se implementó el diagrama de la fig.3.3a, el cual consiste en dos fuentes de luz de 1550 nm conectados a cada fotodetector mediante los interferómetros, llegando los fotodetectores al osciloscopio. Para realizar esta medición fue necesario mover ambos sistemas un poco al inicio y luego dejarlos en reposo. En la fig.3.3b se presenta el setup utilizado para ver la estabilidad de los interferómetros donde: (1) es la fuente de luz RY-LS300E, (2) es el interferómetro Mach Zehnder, (3) es el interferómetro Sagnac, (4) es el fotodetector PDA05CF2 y finalmente en (5) se muestra el osciloscopio GDS-1202B disponible.



a)



b)

Fig.3.3: a) Diagrama de estabilidad. b) Setup.

Por otro lado, para evaluar la estabilidad se realiza la medición que consistió en disparar una luz de 1550nm en ambos interferómetros, luego se procedió a mover con la mano un poco los interferómetros y se dejaron en reposo por 16 minutos aproximadamente, donde el osciloscopio comenzó a recopilar la información de estas formas de onda y por medio de un pendrive se extrajeron estos datos para poder procesarlos en Matlab.

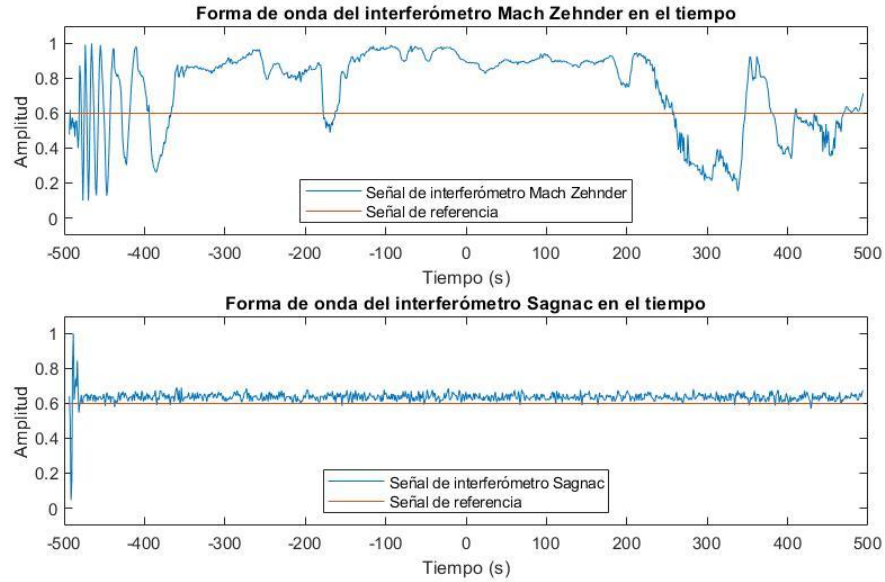


Fig.3.4: Forma de onda de los interferómetros en el tiempo.

Se puede observar en la fig.3.4, que el interferómetro Sagnac resulta ser más estable que el interferómetro Mach Zehnder. Al aplicar una fuerza al sistema, el Sagnac presenta un peak máximo y mínimo en un inicio, pero se estabiliza de manera casi instantánea. En cambio, durante este mismo período de tiempo, el MZ no logra estabilizarse en ningún momento. Esto es debido a su configuración y a la forma en que los haces de luz interactúan en el interior del dispositivo.

Para cuantificar la estabilidad se utilizará el error cuadrático medio (ECM). Este evalúa la diferencia cuadrática entre la señal obtenida y una referencia. Esto es:

$$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{S}_i - S_{ref})^2, \quad (42)$$

donde $\hat{S}_i$ corresponde a la señal bruta adquirida por el fotodetector y S_{ref} es una señal arbitraria estable y N es la cantidad de puntos obtenidos en la grafica de la fig.3.4. Entonces el ECM nos dará una

magnitud entre una señal estable y la señal obtenida. Para que la señal sea estable, se espera que el ECM tienda a 0.

Los resultados obtenidos mediante el análisis del ECM fueron de 0,0708 para el MZ y 0,0025 para el Sagnac. Al analizar estos datos, podemos observar que el interferómetro de Sagnac es más estable que el MZ, ya que presentó un ECM significativamente menor que el del MZ.

Después de evaluar la estabilidad de ambos dispositivos, se concluyó que el interferómetro Sagnac es más estable que el Mach Zehnder. Por esta razón, se tomó la decisión de utilizar exclusivamente el interferómetro Sagnac en las pruebas posteriores.

3.3. Estudio del interferómetro ante vibraciones desde un parlante

Con la finalidad de realizar este estudio se implementó el diagrama de la fig.3.5.

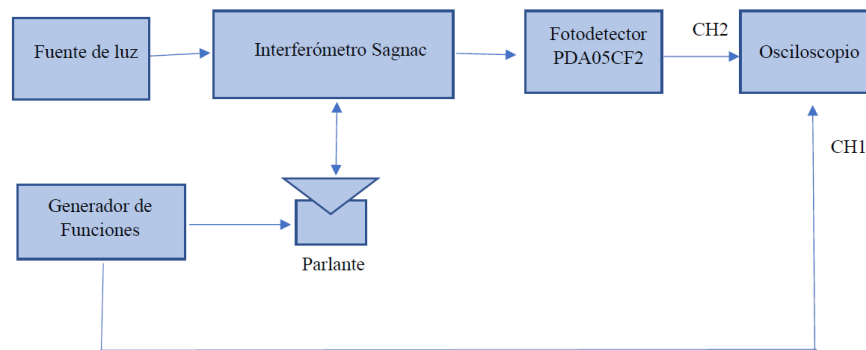


Fig.3.5: Diagrama del sistema.

En la fig.3.5 se puede apreciar el diagrama del sistema, este consta de un generador de funciones conectado a un parlante, el cual genera vibraciones que serán detectadas por el interferómetro Sagnac que se encuentra sobre la superficie del parlante, además por el interferómetro pasa una luz de 1550 nm llegando hacia el fotodetector. Al osciloscopio le llegan señales tanto del fotodetector (CH2) como del generador de funciones (CH1).

Para hacer funcionar el parlante de la fig.3.6 es necesario conectarlo a un generador de funciones en donde se le da el tipo de señal, amplitud y frecuencia.



Fig.3.6: Plataforma Parlante.

Para realizar este estudio se implementó el setup de la fig.3.7 donde: (1) es la fuente de luz RY-LS300E, (2) es el interferómetro Sagnac, (3) es el parlante, (4) es el fotodetector PDA05CF2, (5) es el generador de funciones y finalmente en (6) se muestra el osciloscopio GDS-1202B disponible. Se destaca en el punto (3) que el interferómetro se encuentra sobre el parlante con el fin de captar las vibraciones.

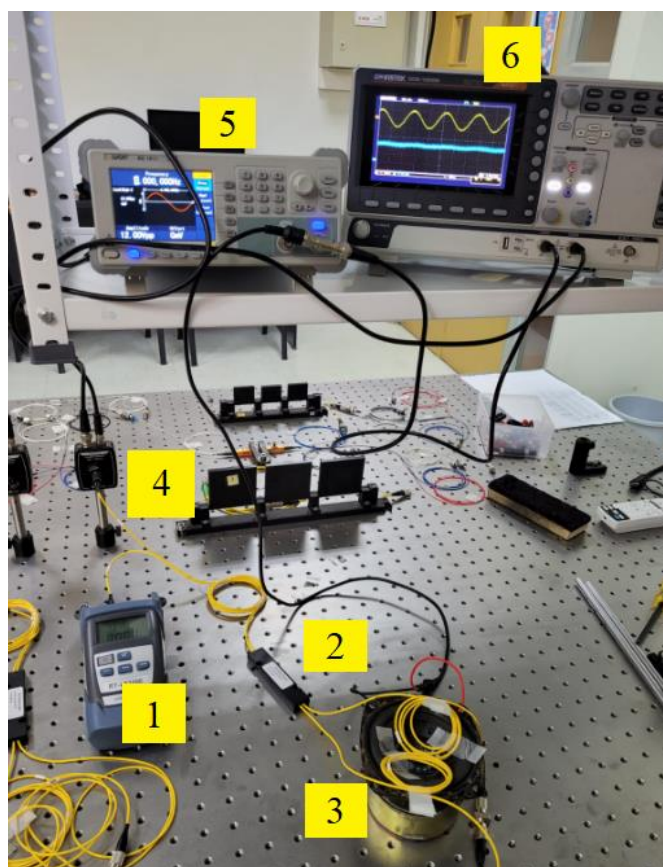


Fig.3.7: Setup del sistema.

El proceso para la toma de mediciones consistió en dos pasos, el primero es disparar un haz de luz de 1550 nm en el interferómetro de Sagnac y la segunda es generar una señal de entrada para el parlante por medio del generador de funciones, lo que genera una traslación vertical dependiente de la señal eléctrica generada por el generador de funciones.

3.4. Resultados de los sensores aplicados en laboratorio

Para el procesamiento digital se dispone de una señal proveniente de un osciloscopio digital, muestreado a una frecuencia de 10kSa/s en señales de 1 segundo y una frecuencia de 100Sa/s para señales de 100 segundos (buffer de 10000 muestras). Cabe mencionar que los osciloscopios del laboratorio tienen un pequeño error, por cada diez puntos se registran valores constantes y esto hace que la señal tenga una mala adquisición. Además, tenemos que las señales se adquieren con un ruido de alta frecuencia. Para evitar el problema de los muestreos constantes y del ruido la señal aplicamos un filtro pasa bajo como filtrado de señal.

Además, se eliminó la media de la señal óptica, ya que la señal óptica presenta una media dependiente de la polarización en la fibra y no de las vibraciones mecánicas. Además, se utilizó un filtro de media móvil de orden 50, esto es debido a que el osciloscopio utilizado entregaba 10 puntos con el valor constante lo que implica que el filtro es equivalente a una media móvil de 5 puntos.

Se implementó el setup de la fig.3.7 para llevar a cabo la caracterización en amplitud y voltaje RMS. Durante el experimento, se varió la amplitud de la señal ingresada al generador de funciones, manteniendo la misma frecuencia para cada medición. Se realizaron mediciones para frecuencias de 5Hz, 10Hz y 20Hz, y los resultados se registraron en las siguientes tablas. Es importante mencionar que la amplitud y valor RMS fueron determinados por Matlab con las ecuaciones (39) y (40) respectivamente.

Donde:

CH1: es la señal eléctrica proporcionada por el generador de funciones.

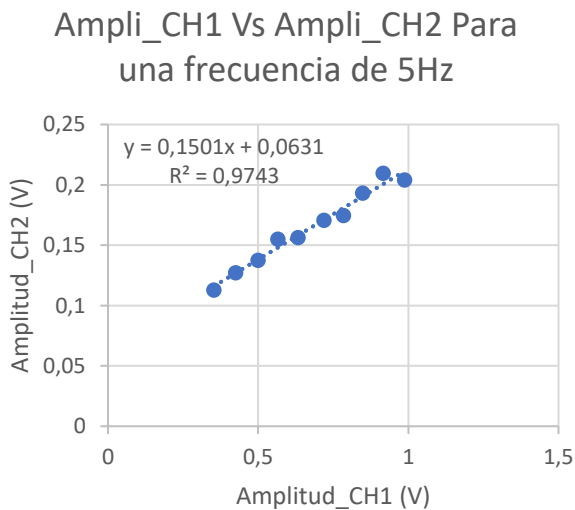
CH2: es la señal del interferómetro de Sagnac.

Tabla 1: Procesamiento de amplitud y voltaje RMS para frecuencias de 5Hz.

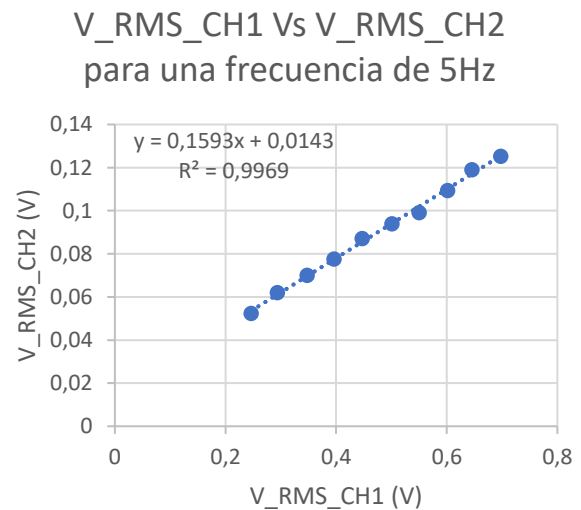
V_RMS_CH1 (V)	V_RMS_CH2 (V)	Amplitud_CH1 (V)	Amplitud_CH2 (V)
0,246561519	0,052442212	0,3524	0,1128
0,294077455	0,061998272	0,4248	0,1272
0,347743993	0,070014413	0,4996	0,1376
0,396536445	0,077598206	0,5656	0,1552
0,446927429	0,087177562	0,6328	0,1564
0,500894203	0,093969296	0,7188	0,1708
0,550174174	0,099209884	0,784	0,1748
0,601432573	0,1094764	0,8476	0,1932
0,645718103	0,119082656	0,9164	0,2096
0,697814642	0,125273959	0,988	0,204

En el anexo adjunto se pueden encontrar las tablas correspondientes a las mediciones realizadas para las frecuencias de 10Hz y 20Hz. Además, los datos presentados en las tablas fueron extraídos a través del procesamiento realizado en Matlab, el cual también se incluye en el anexo.

Se realizó la caracterización de la señal mediante un gráfico de dispersión en Excel. En este gráfico se agregó una línea de tendencia lineal (fig.3.8).



a)



b)

Fig.3.8: Línea de tendencia del interferómetro de Sagnac en función del generador de funciones. a) Amplitud. b) Voltaje RMS.

Teniendo así la caracterización de amplitud y voltaje RMS del interferómetro Sagnac en función del generador de funciones mostrada en la fig.3.8.

Tabla 2: Caracterización de amplitud y correlaciones.

Frecuencia	Amplitud del interferómetro Sagnac en función de la amplitud del generador de funciones	Correlación
Para 5 Hz	$Ampli_{CH2} = 0,1501 * Ampli_{CH1} + 0,0631$	97,43%
Para 10 Hz	$Ampli_{CH2} = 0,1544 * Ampli_{CH1} + 0,055$	94,77%
Para 20Hz	$Ampli_{CH2} = 0,2364 * Ampli_{CH1} + 0,0308$	99,91%

Tabla 3: Caracterización del voltaje RMS y correlaciones.

Frecuencia	Voltaje RMS del interferómetro Sagnac en función del voltaje rms del generador de funciones	Correlación
Para 5 Hz	$V_{RMSCH2} = 0,1593 * V_{RMSCH1} + 0,0143$	99,69%
Para 10 Hz	$V_{RMSCH2} = 0,1568 * V_{RMSCH1} + 0,0113$	99,53%
Para 20Hz	$V_{RMSCH2} = 0,2347 * V_{RMSCH1} - 0,0065$	99,81%

En la tabla 2 y 3 se presentan las diferentes caracterizaciones de amplitud y voltaje RMS a distintas frecuencias, y se puede observar que hay una correlación positiva entre ellas. Esto indica que a medida que la frecuencia aumenta, tanto la amplitud como el voltaje RMS también tienden a aumentar en conjunto.

Caracterización de frecuencia

Se llevó a cabo la caracterización en frecuencia utilizando el setup mostrado en la fig.3.7, donde se varió la frecuencia de la señal ingresada al generador de funciones en el rango de 4 Hz a 22 Hz, manteniendo una amplitud constante, obteniendo las siguientes gráficas. Es importante mencionar que se utilizó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) disponible en Matlab para el procesamiento en frecuencia.

A continuación, en la fig.3.9 se muestra las formas de onda de las señales y sus respectivas transformadas de Fourier.

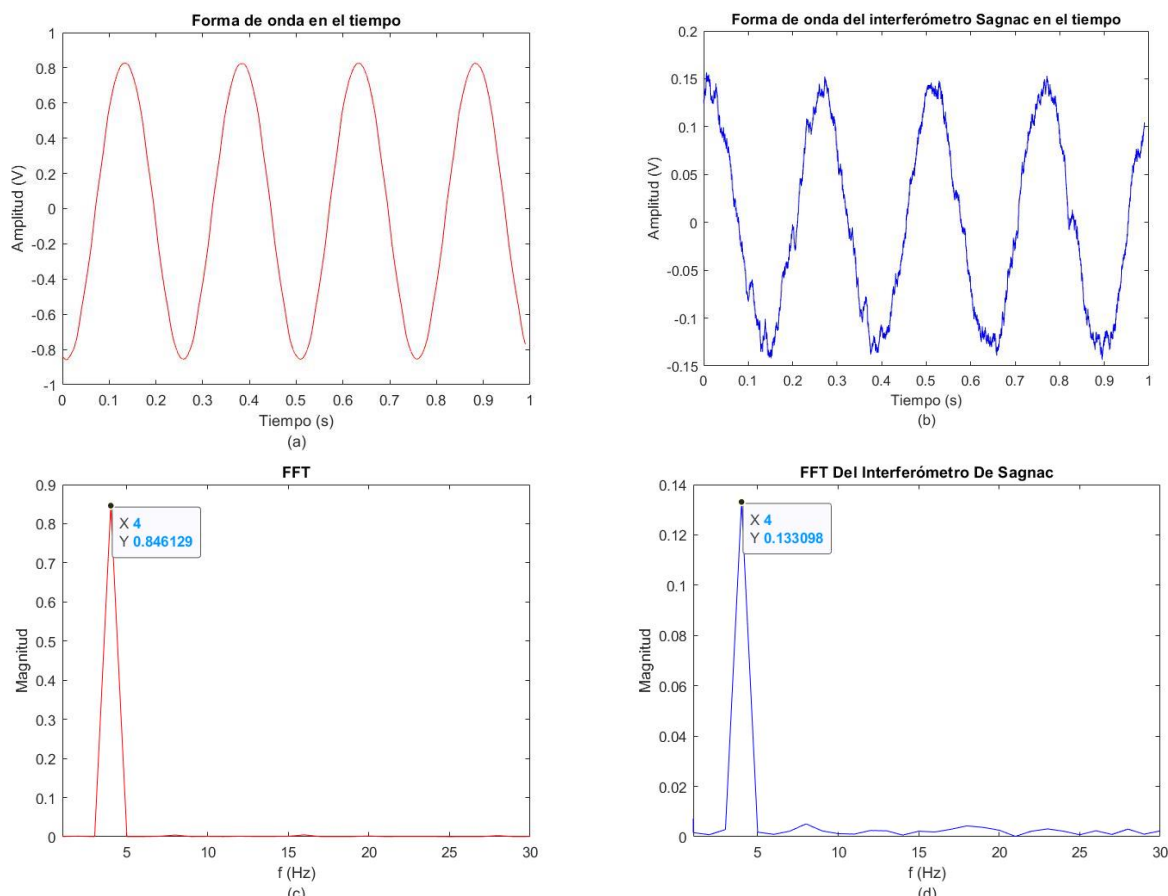


Fig.3.9.: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 4 Hz.

Como se puede observar en la fig3.9, las formas de onda a y b tienen una gran similitud y cuando se les aplica la transformada de Fourier fig.3.9c y fig.3.9d, presentan las mismas frecuencias. Esto indica que el interferómetro de Sagnac tiene la capacidad de detectar vibraciones a través del movimiento que percibe la fibra.

En los anexos adjuntos se pueden encontrar los códigos que se utilizaron para el procesamiento en frecuencia, así como también una serie de gráficos que fueron empleados para generar la siguiente tabla, donde: (CH1) es la señal eléctrica proporcionada por el generador de funciones y (CH2) es la señal del interferómetro de Sagnac.

Tabla 4: Procesamiento en frecuencia para distintas frecuencias de entrada.

f_CH1 (Hz)	f_CH2 (Hz)
4	4
6	6
8	8
10	10
12	12
14	14
16	16
18	18
20	20
22	22

Se realizó la caracterización de la señal mediante un gráfico de dispersión en Excel. En este gráfico se agregó una línea de tendencia lineal (fig.3.10).

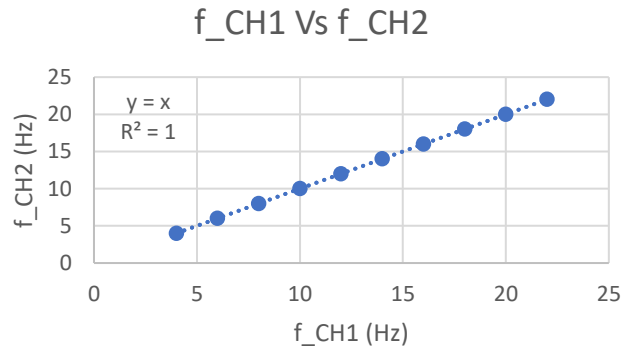


Fig.3.10: Línea de tendencia de la frecuencia del interferómetro de Sagnac en función de la frecuencia del generador de funciones.

Como se puede apreciar de la fig.3.10 la caracterización es idéntica con una correlación del 100%, lo que implica una caracterización de $f_{CH2} = f_{CH1}$. Sin embargo, considerando el error de medición proveniente del osciloscopio que se evidencia en la data adquirida podemos presentar la relación como:

$$f_{CH2} = f_{CH1} \pm 0,1Hz \quad (43)$$

Capítulo 4. Evaluación de sensores ópticos en campo

En este capítulo se utilizarán los sensores evaluados anteriormente en la plataforma móvil que dispone el Departamento de Ingeniería Civil.

4.1 Evaluación del sensor en plataforma móvil del Departamento de Ingeniería Civil

Con la finalidad de evaluar el sensor utilizando la plataforma del Departamento de Ingeniería Civil se implementó el diagrama de la fig.4.1.

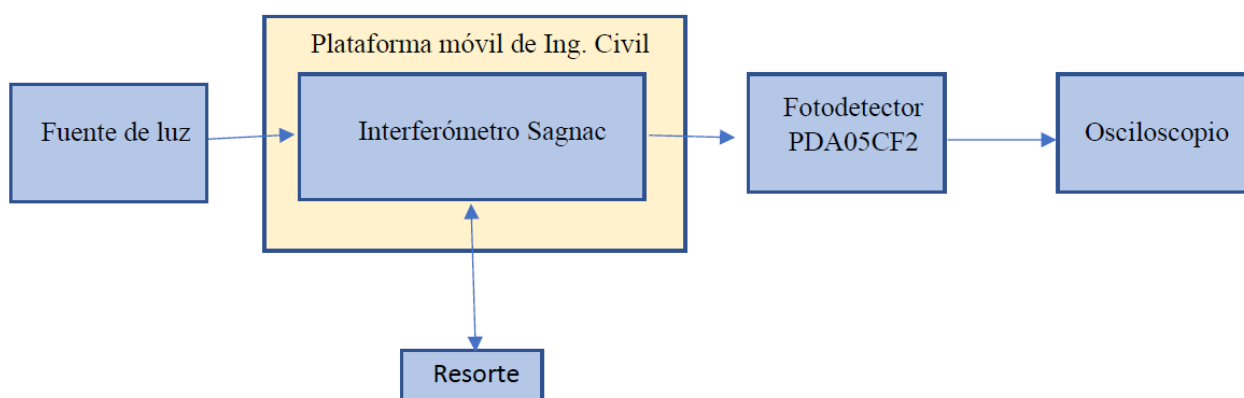


Fig.4.1: Diagrama del sistema.

En la fig.4.1 se puede apreciar el diagrama del sistema que es prácticamente igual al anterior (fig.3.5) solo que cambia la plataforma móvil. Además, se incorpora un resorte al interferómetro con el fin de permitirle movimiento para que la fibra no se rompa cuando la plataforma comience a moverse.

En la fig.4.2 se encuentra la plataforma del Departamento de Ingeniería Civil, que se mueve de manera horizontal, donde se le programa el movimiento deseado mediante un software denominado indraworks engineering, en el cual se le ingresa la velocidad y la aceleración media. Este software permite abordar tareas de automatización y puestas en marcha basadas en PLC, donde la compañía fabricante es Bosch Rexroth Ltd.

Cabe destacar que un estudiante de Ingeniería Civil realizó el movimiento de la plataforma, además, de la adquisición de datos del sensor LVDT.



Fig.4.2: Plataforma de Ingeniería Civil.

Para poder fijar nuestro sensor a la plataforma, fue necesario hacer un arreglo como se muestra en la fig.4.3. Este arreglo fue diseñado por el profesor Nelson Maureira usando una impresora 3D de filamento, lo que permitió asegurar el sensor y mantenerlo en su lugar sobre la plataforma. Cabe destacar que es la primera prueba del arreglo.

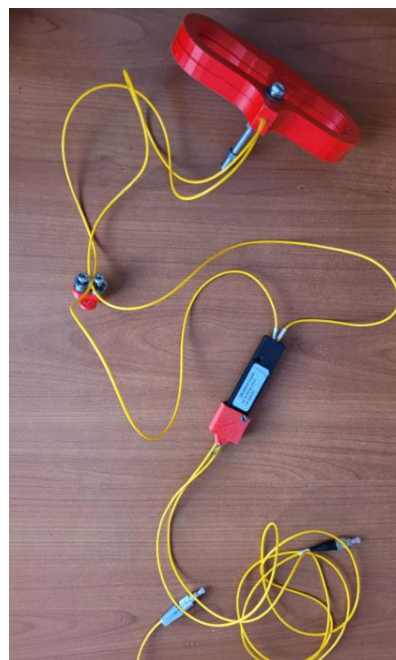


Fig.4.3: Arreglo utilizado.

A continuación, en la fig.4.4 se presenta el setup utilizado para tomar las mediciones en la plataforma del Departamento de Ingeniería Civil, donde: (1) es el osciloscopio GDS-1202B disponible, (2) es el fotodetector PDA05CF2, (3) es la fuente de luz RY-LS300E, (4) es el resorte utilizado, (5) es el interferómetro de Sagnac, (6) es la plataforma móvil de Ingeniería Civil, (7) es el sensor de desplazamiento LVDT y (8) el arreglo.

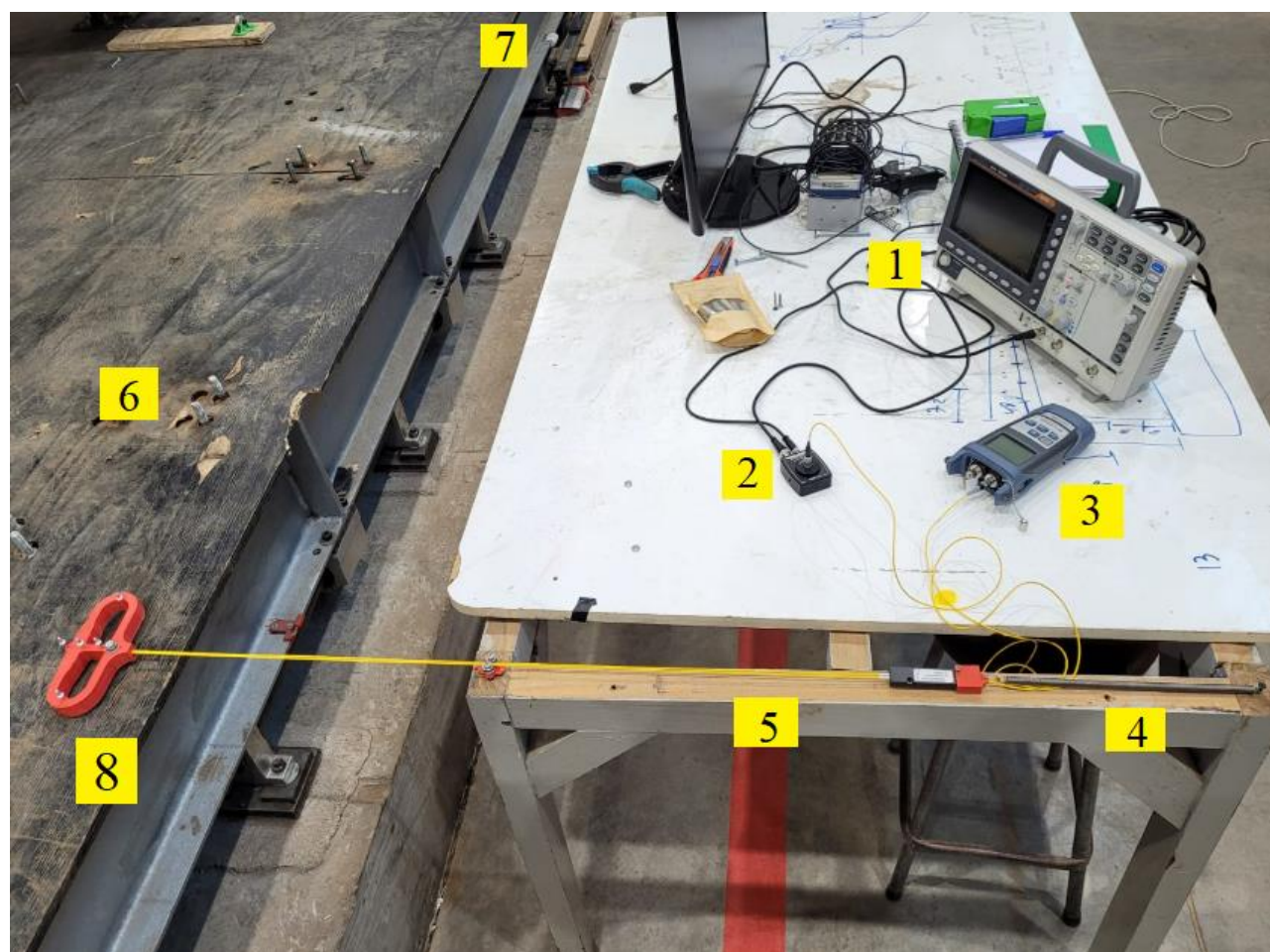


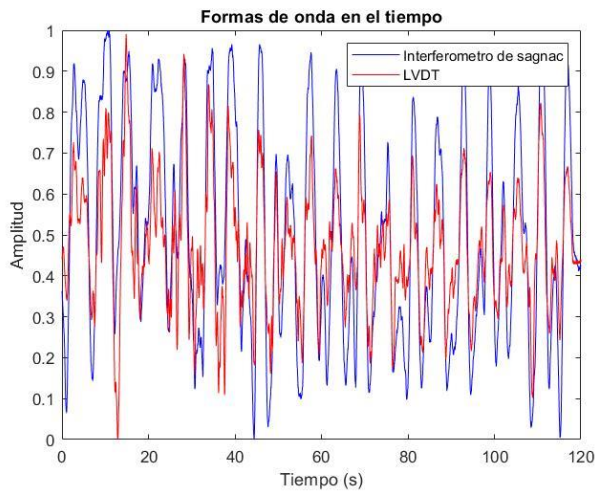
Fig.4.4: Setup utilizando en plataforma móvil de Ingeniería Civil

El proceso para la toma de mediciones consistió en dos pasos: el primero es disparar una luz de 1550 nm en el interferómetro de Sagnac y el segundo es mover la plataforma, ingresando una simulación de terremoto al software y procediendo a mover el interferómetro. El osciloscopio comienza a recopilar la información de estas formas de onda y por medio de un pendrive se extrajeron los datos para poder procesarlos en Matlab

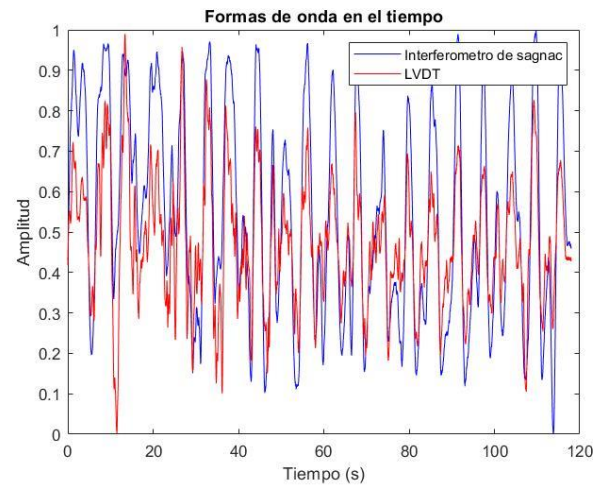
4.2 Resultados obtenidos en plataforma móvil

A partir de los datos obtenidos se realizó un procesamiento de señal en Matlab, que consistió en pasar ambas señales a través de un filtro de media móvil. Además, se percató que la señal del interferómetro estaba invertida con respecto al sensor LVDT, moviéndose en sentido contrario, por lo que se procedió a invertir la señal.

A continuación, en la fig.4.5 se presentan dos muestras diferentes bajo las mismas condiciones de trabajo.



a) Señal 1.



b) Señal 2.

Fig.4.5: Formas de onda en el tiempo.

En la fig.4.5 a y b se puede observar que el interferómetro de Sagnac es más sensible a las vibraciones que el LVDT, ya que presenta una mayor amplitud en las ondas medidas. Sin embargo, es importante mencionar que existe una similitud en las formas de ondas en el tiempo, con una correlación del 85,98% y 85,64% respectivamente.

Además, se aplicó la transformada de Fourier a las señales de la fig.4.5, las cuales se presentan en las figuras 4.6 y 4.7

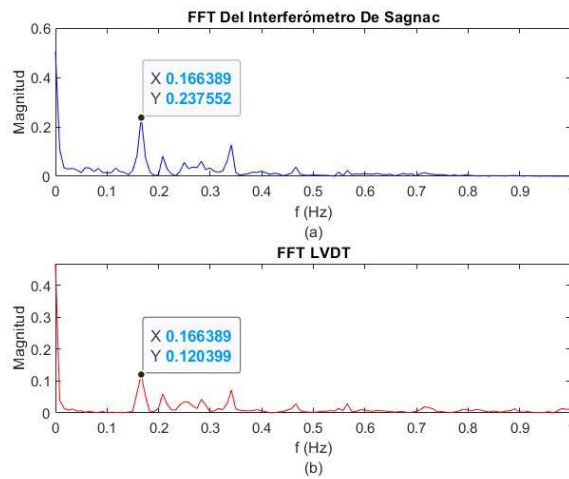


Fig.4.6: FFT de señal 1.

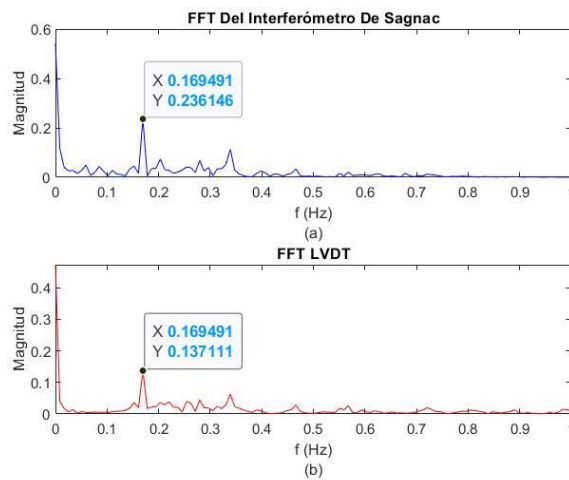


Fig.4.7: FFT de señal 2.

Los resultados muestran que las frecuencias medidas por ambos sensores son similares, con una correlación del 96% y 96,93% en las fig.4.6 y fig.4.7, respectivamente. Esto sugiere que el interferómetro de Sagnac es altamente preciso en la frecuencia del desplazamiento, y podría ser utilizado como una alternativa al LVDT para evaluar este parámetro con mayor precisión.

Capítulo 5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha logrado construir ambos interferómetros con dispositivos contruidos en fibra óptica de bajo costo. Después de evaluar la estabilidad de los interferómetros, se decidió por descartar el interferómetro Mach Zehnder debido a su inestabilidad y quedar solo con el Sagnac.

En el capítulo 3 se ha demostrado el funcionamiento de estos interferómetros utilizando un parlante que por medio de señales acústicas generan vibraciones mecánicas sobre su superficie. Se han presentado los resultados obtenidos para una frecuencia específica, en los que se observa una alta correlación al aumentar o disminuir la amplitud del parlante. Además, se ha evaluado la frecuencia utilizando la transformada de Fourier, lo que ha permitido obtener resultados precisos y confiables.

También se ha logrado medir en el Departamento de Ingeniería Civil y utilizar el sensor en una plataforma móvil para comparar los resultados con los obtenidos por sus propios sensores. Se han obtenido correlaciones del 85,6% en el plano del tiempo y del 96% en el dominio de la frecuencia. Desafortunadamente, la correlación entre la amplitud y el sensor de desplazamiento es de mediana calidad, con un valor de 0,85, lo que indica que hay una tendencia, pero no una relación fuerte. Esto es algo que se debe investigar a futuro. Por otro lado, en cuanto a la frecuencia, los resultados muestran una mayor correlación, lo que sugiere que estos sensores tienen una alta capacidad para discriminar las frecuencias provenientes de las vibraciones en plataformas móviles.

5.1 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone un estudio para evaluar con mayor detalle el parámetro de amplitud, de tal forma de obtener señales con una mayor correlación entre las señales ópticas y la obtenida con el sensor LVDT. También, evaluar otros tipos de arreglos que podrían hacer más eficaz la detección de la señal.

Además, se propone el desarrollo del sensor como un sistema electrónico completo, en el cual se incluya un FPGA capaz de realizar la transformada de Fourier. Esto permitiría obtener la información en tiempo real sobre las señales medidas.

Referencias

- [1] Leyton, Felipe; Ruiz, Sergio; Sepúlveda, Sergio A., «Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central,» *Andean Geology*, vol. 37, n° 2, pp. 455-472, 2010.
- [2] Mendoza Ramirez, Wilber; Cotrado Flores, Dina Marlene; et al, «FREQUENCIES AND PREDOMINANT PERIODS OF EARTHQUAKES REGISTERED IN THE CITY OF TACNA, BY MEANS OF ANALYSIS AND FOURIER SPECTRUM,» *Ingeniería Investiga*, vol. 2, n° 1, pp. 161-175, 2020.
- [3] P. M. Shearer, *Introduction to Seismology*, New York: Cambridge University Press, 2019.
- [4] B. Rossi, *Fundamentos de Óptica*, REVERTE, S.A., 1966.
- [5] Nedoma, Jan; Stolarik, Martin; Fajkus, Marcel; et al, «Use of Fiber-Optic Sensors for the Detection of the Rail Vehicles and Monitoring of the Rock Mass Dynamic Response Due to Railway Rolling Stock for the Civil Engineering Needs,» *Applied Sciences*, vol. 9, p. 134, 2019.
- [6] Wang, Ying; Wu, Qifeng; Xiong, Mudi; He, Rongxi, «A new vehicle axle detector for roadways based on fiber optic Mach-Zehnder interferometer,» *Proc. SPIE 6019*, 2005.
- [7] Nedoma, Jan; Zboril, Ondrej; Fajkus, Marcel; et al, «Fiber optic system design for vehicle detection and analysis,» *Proc. SPIE 9889*, 2016.
- [8] Kepak, Stanislav; Cubik, Jakub; Zavodny, Petr ; et al, «Fibre optic track vibration monitoring system,» *Opt Quant Electron*, vol. 48, n° 354, 2016.
- [9] Mu, Jie; Zhao, Wei; Wang, Jia; Xu, Jin-tao, «New Scheme of Sagnac Interferometric Fiber-Optic Current Sensor Insensible to Mechanical Vibration,» 2010.
- [10] M. J. Villareal Aguirre, «INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PID,» UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO, 2019.
- [11] M. Rikondo Iriondo, «Vibraciones mecánicas. Qué son y cómo se evalúa el riesgo,» *DYNA*, vol. 82, n° 9, pp. 499-506, 2007.
- [12] J. C. Pacheco Barra, «Implementación del Computed Order Tracking (COT) en el laboratorio de mecánica,» UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO , Concepción, 2015.
- [13] CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL UNIVERSIDAD DE CHILE, «CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL,» [En línea]. Available: <https://www.sismologia.cl/informacion/preguntas-frecuentes.html>. [Último acceso: 2023].
- [14] NC ARQUITECTURA, «¿Qué es un terremoto?,» [En línea]. Available: <https://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>. [Último acceso: 2023].
- [15] M. Gómez Cano, «CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS USANDO ANÁLISIS DE ESPECTROS SINGULARES (SSA)Y TRANSFORMADA DE TIEMPO CORTO DE FOURIER (STFT),» Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2016.
- [16] PCE Instruments, «Acelerómetro PCE-AC500G,» [En línea]. Available: https://www.pce-instruments.com/chile/sistemas-regulacion-control/sensorica/sensor-de-vibracion-pce-instruments-sensor-de-vibraci_n-con-salida-de-tensi_n-iepe-est_ndar-det_5477655.htm. [Último acceso: 2023].
- [17] ifm, «Acelerómetro VSP001,» [En línea]. Available: <https://www.ifm.com/ar/es/product/VSP001?gclid=CjwKCAiA3KefBhByEiwAi2LDHmZ12>

- Xyb4rJfxd4TGuzyqGkmfzkC1wDPKJ6yn7NNxPbk48kPEHuOqxoC-l4QAvD_BwE.
[Último acceso: 2023].
- [18] PCB PIEZOTRONICS, «Accelerometer 333B50,» [En línea]. Available: https://www.pcb.com/it/products-it-it?model=333b50&item_id=Products&m=002C10. [Último acceso: 2023].
- [19] OMEGA, «¿Qué es un LVDT (transductor de desplazamiento lineal variable)?,» [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/sensor-LVDT.html>. [Último acceso: 2023].
- [20] OMEGA, «LVDT,» [En línea]. Available: <https://es.omega.com/search/eseach.asp?start=0&perPage=10&summary=yes&sort=rank&search=lvdt&submit=Search&collection=es>. [Último acceso: 2023].
- [21] Young, Freedman, Sears y Zemansky, FÍSICA UNIVERSITARIA CON FÍSICA MODERNA, Pearson Educación, 2013.
- [22] Del Valle, Jimena; Dupré, Jorge; Parra, Cecilia, «Fibra Óptica,» Universidad de Concepcion, Concepcion, Chile, 2002.
- [23] I. A. Vargas, «SISTEMAS DE FIBRA OPTICA,» Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Ica, Perú.
- [24] THORLABS, «InGaAs Free-Space Amplified Photodetectors,» [En línea]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4&pn=PDA05CF2. [Último acceso: 2023].
- [25] Banishev, Alexander A; Bhowmick, Mithun; Wang, Jue, Optical Interferometry, InTechOpen, 2017.
- [26] Mercado Libre, «Divisor De Fibra Óptica,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1330083358-divisor-de-fibra-optica-monomodo-sc-apc-1x2-plc-scupc-pcl-JM?matt_tool=91325440&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14571116307&matt_ad_group_id=134864371420&matt_match_type=&matt_network=g&matt_. [Último acceso: 2023].
- [27] MathWorks, «Filtrar datos,» [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/filtering-data.html. [Último acceso: 2023].
- [28] C. O. Jiménez Tintaya, «PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES SÍSMICAS CON MATLAB,» *Revista de Investigacion de Fisica*, vol. 10, pp. 45-50, 2007.

Anexo A. Códigos en Matlab

Códigos en Matlab de estabilidad de los interferómetros

```
close all
clear
clc

t1=xlsread('ALL0003.CSV','A1:A10000');
I1=xlsread('ALL0003.CSV','B1:B10000');
t2=xlsread('ALL0003.CSV','C1:C10000');
I2=xlsread('ALL0003.CSV','D1:D10000');

dec=10;
t1 = decimate(t1,dec);
I1 = decimate(I1,dec);
t2 = decimate(t2,dec);
I2 = decimate(I2,dec);
I1=I1/max(I1);
I2=I2/max(I2);
y=0.6*ones(1000,1);
ErrorMZ=immse(I1,y)
ErrorSg=immse(I2,y)

figure (1)
subplot(211)
plot(t1,I1,t1,y) % señal en el tiempo
title('Forma de onda del interferómetro Mach Zehnder en el tiempo')
legend('Señal de interferómetro Mach Zehnder','Señal de
referencia','Location','south')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
ylim([-0.1 1.1])
```

```

subplot(212)
plot(t2,I2,t2,y) % señal en el tiempo
title('Forma de onda del interferómetro Sagnac en el tiempo')
legend('Señal de interferómetro Sagnac','Señal de
referencia','Location','south')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
ylim([-0.1 1.1])

```

Códigos de procesamiento de señales

Funciones utilizadas:

La siguiente función nos permite abrir el archivo .CSV y guardar los datos que se desea trabajar.

```

function [t,Ch1,Ch2]=abrirCSVModificado(nombreArchivo)
M = xlsread(nombreArchivo);
t=M(:,1);
Ch1=M(:,2);
Ch2=M(:,4);

```

La siguiente función nos permite aplicar un filtro de media móvil de orden N, restar la media a las señales y regular el tiempo.

```

function [dt,t,Ch1f,Ch2f]=filtrarData(t,Ch1,Ch2,orden)
a=1;
b=ones(1,orden)*1/orden;
Ch1f=filter(b,a,Ch1); %determina el filtro
Ch2f=filter(b,a,Ch2); %determina el filtro
lmax=length(t);
t=t(orden+1:lmax);
Ch1f=Ch1f(orden+1:lmax);
Ch2f=Ch2f(orden+1:lmax);
Ch1f=Ch1f-mean(Ch1f); %resta la media de la señal
Ch2f=Ch2f-mean(Ch2f); %resta la media de la señal

```

```
lmax2=length(t);
%regula el tiempo
dt=(max(t)-min(t))/lmax2;
t=(0:lmax2-1)*dt;
```

La siguiente función nos permite determinar la amplitud y el RMS de las señales seleccionadas.

```
function [Ampli1,Ampli2,rms1,rms2]=procAmplitud(t,Ch1,Ch2)
lmax=length(t);
Ampli1=(max(Ch1)-min(Ch1))/2; %determina la amplitud de la señal
Ampli2=(max(Ch2)-min(Ch2))/2; %determina la amplitud de la señal
rms1=rms(Ch1); %determina el valor rms de la señal
rms2=rms(Ch2); %determina el valor rms de la señal
```

La siguiente función nos permite determinar la Transformada de Fourier.

```
function [f,frec_S]=Fourier(dt,S)
Fs=1/dt;
L=length(S);
Y = fft(S);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
frec_S=P1;
```

A continuación, se presentarán los códigos utilizados para el procesamiento de las señales.

Para el procesamiento en amplitud y RMS se utilizó el siguiente código:

En la primera parte del código se selecciona en que carpeta se desea trabajar.

```
clc;clear all;close all;
%NombreCarpeta='Correlacion para 5Hz'
%NombreCarpeta='Correlacion para 10Hz'
NombreCarpeta='Correlacion para 20Hz';
```

En la segunda parte del código se procede a encontrar los archivos dentro de la carpeta seleccionada anteriormente.

```
s=dir();
carpeta_mfile=s(1).folder;
cd(NombreCarpeta);
s1=dir('*.csv');
cd(carpeta_mfile);
```

En la tercera parte del código se obtiene el análisis en amplitud y RMS. En el ciclo for indicamos que archivo abriremos para el procesamiento y en data se obtiene una tabla con la información procesada (RMS_CH1, RMS_CH2, Ampli1 y Ampli2).

```
for i=1:10
[t,Ch1,Ch2]=abrirCSVModificado([carpeta_mfile,'\ ',NombreCarpeta,'\ '
,s1(i).name]); %nos permite abrir el archivo y guardar los datos
Ch1=Ch1*2; %factor de escalamiento
Ch2=Ch2*50; %factor de escalamiento
[dt,t,Ch1f,Ch2f]=filtrarData(t,Ch1,Ch2,50); %aplica el filtro de
orden 50

[Ampli1,Ampli2,rms1,rms2]=procAmplitud(t,Ch1f,Ch2f)%determina la
amplitud y valor rms
data(i,:)=[i,rms1,rms2,Ampli1,Ampli2] ;
subplot(211)
plot(t,Ch1f,'r' );
subplot(212)
plot( t,Ch2f,'b');
pause(0.5)
end
```

Ahora se presentará el código utilizado para el procesamiento en frecuencia.

La primera y segunda parte hacen lo mismo que el código de procesamiento de amplitud y RMS.

Primera parte.

```
clc;clear all;close all;
NombreCarpeta='Correlacion para fft';
```

Segunda parte.

```
s=dir();
carpeta_mfile=s(1).folder;
cd(NombreCarpeta);
s1=dir('*.csv');
cd(carpeta_mfile);
```

En la tercera parte del código se obtiene la Transformada de Fourier. En el ciclo for indicamos que archivo abriremos para determinar la FFT y de las gráficas obtenidas se visualiza la frecuencia correspondiente

```
i=1; %se especifica el archivo
[t,Ch1,Ch2]=abrirCSVModificado([carpeta_mfile,'\\',NombreCarpeta,'\\',
,s1(i).name]); %nos permite abrir el archivo y guardar los datos
Ch1=Ch1*2; %factor de escalamiento
Ch2=Ch2*50; %factor de escalamiento
[dt,t,Ch1f,Ch2f]=filtrarData(t,Ch1,Ch2,50); %aplica el filtro de
orden 50
[f,frec_Ch1]=Fourier(dt,Ch1); %aplica la transformada de fourier
[f,frec_Ch2]=Fourier(dt,Ch2); %aplica la transformada de fourier

figure(1)
plot(t,Ch1f,'r' );
title('Forma de onda en el tiempo')
xlabel({'Tiempo (s)','(a) '})
ylabel('Amplitud (V)')
```

```
figure (2)
plot(f,frec_Ch1,'r' );
title('FFT')
xlabel({'f (Hz)', '(c) '})
ylabel('|Frecuencia|')
xlim([1 100])
```

```
figure (3)
plot( t,Ch2f,'b');
title('Forma de onda del interferómetro Sagnac en el tiempo')
xlabel({'Tiempo (s)', '(b) '})
ylabel('Amplitud (V)')
```

```
figure (4)
plot( f,frec_Ch2,'b');
title('FFT Del Interferómetro De Sagnac')
xlabel({'f (Hz)', '(d) '})
ylabel('|Frecuencia|')
xlim([1 100])
```

Código utilizado para invertir la señal e igualar el largo del vector

```
clear all
close all
clc
load('sg01')
load('desp01')

t1=k1(:,1);
f1=k1(:,2);%señal de desplazamiento
f1=(f1-min(f1))/(max(f1)-min(f1));%normalización
f1=1-f1;%inversion de señal
t2=k2(:,1) -2.2330-6.3070+0.2000- 0.1400;
f2=k2(:,2);%interferometro sagnac
f2=(f2-min(f2))/(max(f2)-min(f2));%normalización

k=1;
for i=1:length(t2)
    if(t2(i)<max(t1) & t2(i)>0)
```

```

        f3(k)=f2(i);
        t3(k)=t2(i);
        k=k+1;
    end

end

dt=round(length(t3)/length(t1));
k=1;
for i=1:dt:length(t3)
    t(k)=t1(k);
    fs(k)=f1(k);
    fd(k)=f3(i);
    k=k+1;
end

```

Código utilizado para graficar el interferómetro de Sagnac y LVDT

```

clear all
clc
close all
load('exp1')
figure(1)
plot(t,fs,'b',t,fd,'r')
xlim([0 120])
title('Formas de onda en el tiempo')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
legend('Interferometro de sagnac','LVDT')
corr(fs',fd') %determina la correlación de las señales en el tiempo

L=length(t);
dt=(max(t)-min(t))/L;

[f,frec_fs]=Fourier(dt,fs); %aplica la transformada de fourier
[f,frec_fd]=Fourier(dt,fd); %aplica la transformada de fourier

figure(2)
subplot(211)
plot(f,frec_fs,'b');
title('FFT Del Interferómetro De Sagnac')
xlabel({'f (Hz)', '(a)'})
ylabel('Magnitud')
xlim([0 1])

subplot(212)
plot(f,frec_fd,'r');
title('FFT LVDT')

```

```
xlabel({'f (Hz) ','(b) '})  
ylabel('Magnitud')  
xlim([0 1])  
  
corr(frec_fs',frec_fd') %determina la correlación de las señales en  
frecuencia
```

Anexo B. Datos interferómetro Sagnac

Caracterización en amplitud y voltaje RMS.

Tabla 5: Procesamiento de amplitud y voltaje RMS para frecuencias de 10Hz.

V_RMS_CH1 (V)	V_RMS_CH2 (V)	Amplitud_CH1 (V)	Amplitud_CH2 (V)
0,253172475	0,05038986	0,36	0,1176
0,304170765	0,062230804	0,4428	0,134
0,357765952	0,065805173	0,5084	0,1252
0,409628423	0,07575363	0,58	0,1412
0,459196927	0,083306308	0,6628	0,156
0,513729414	0,089360427	0,7312	0,1556
0,565837726	0,09850831	0,8016	0,1756
0,615556927	0,108853668	0,8712	0,1844
0,663263605	0,116906094	0,936	0,2048
0,716020877	0,123665443	1,0232	0,2236

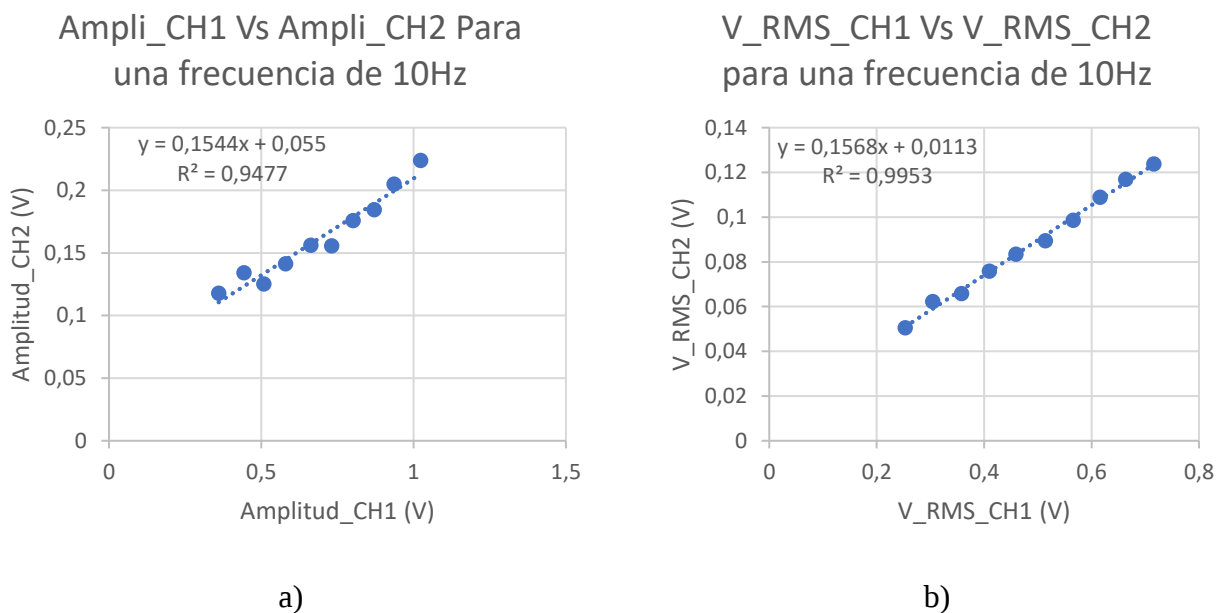
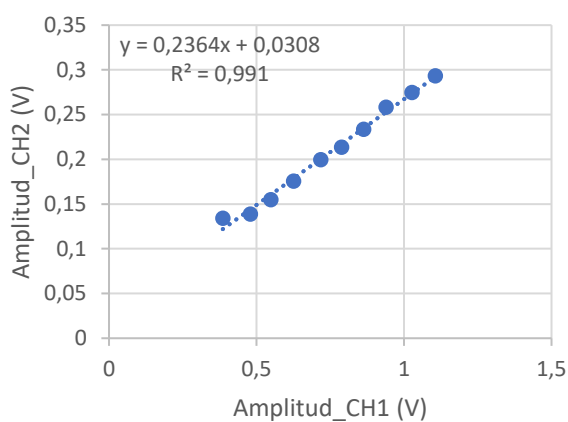


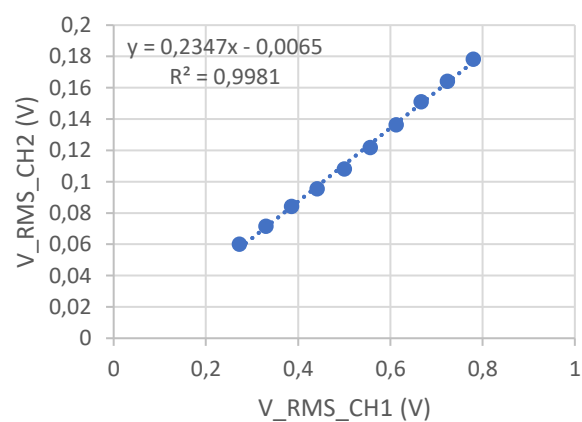
Fig.6.1: Línea de tendencia del interferómetro de Sagnac en función del generador de funciones. a) Amplitud. b) Voltaje RMS.

Tabla 6: Procesamiento de amplitud y voltaje RMS para frecuencias de 20Hz.

V_RMS_CH1 (V)	V_RMS_CH2 (V)	Amplitud_CH1 (V)	Amplitud_CH2 (V)
0,272328302	0,060152032	0,3856	0,134
0,330350012	0,071462352	0,4788	0,1388
0,385409406	0,084195848	0,5488	0,1548
0,441201146	0,095382842	0,6256	0,1756
0,500043897	0,108120562	0,7176	0,1996
0,556221924	0,121927743	0,7888	0,2136
0,612451739	0,136395894	0,8628	0,2336
0,666461912	0,151130956	0,9392	0,2584
0,723684296	0,164090196	1,0272	0,2748
0,779996729	0,178174594	1,1064	0,2932

Ampli_CH1 Vs Ampli_CH2 Para
una frecuencia de 20 Hz

a)

V_RMS_CH1 Vs V_RMS_CH2
para una frecuencia de 20Hz

b)

Fig.6.2: Línea de tendencia del interferómetro de Sagnac en función del generador de funciones. a) Amplitud. b) Voltaje RMS.

Graficas para caracterización en frecuencia.

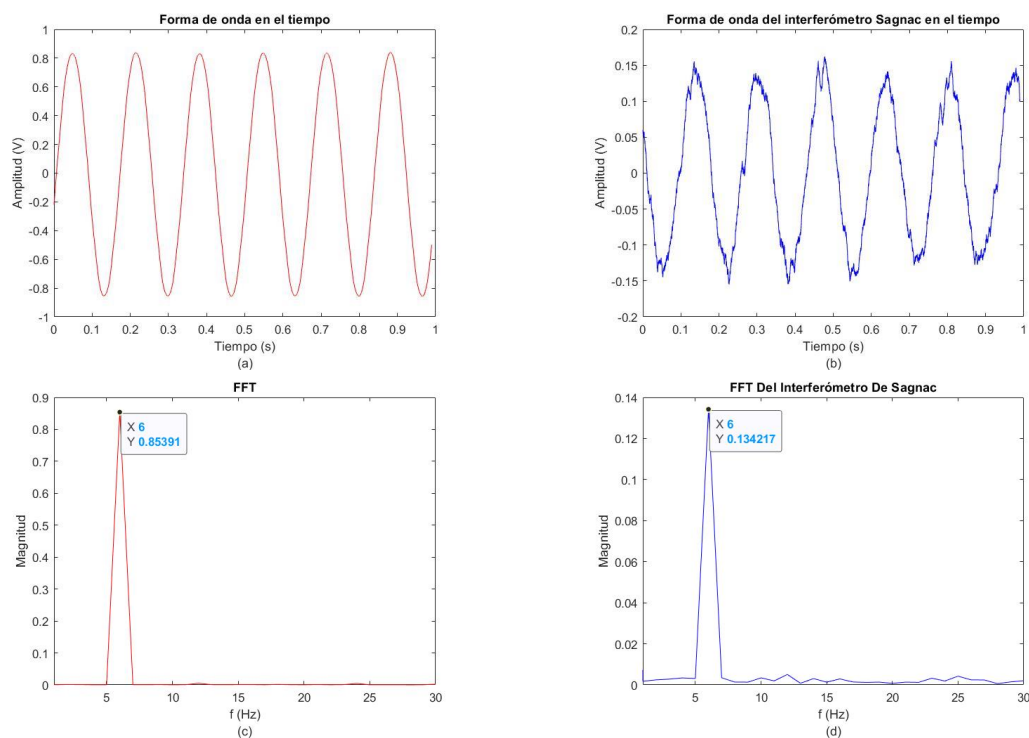


Fig.6.3: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 6 Hz.

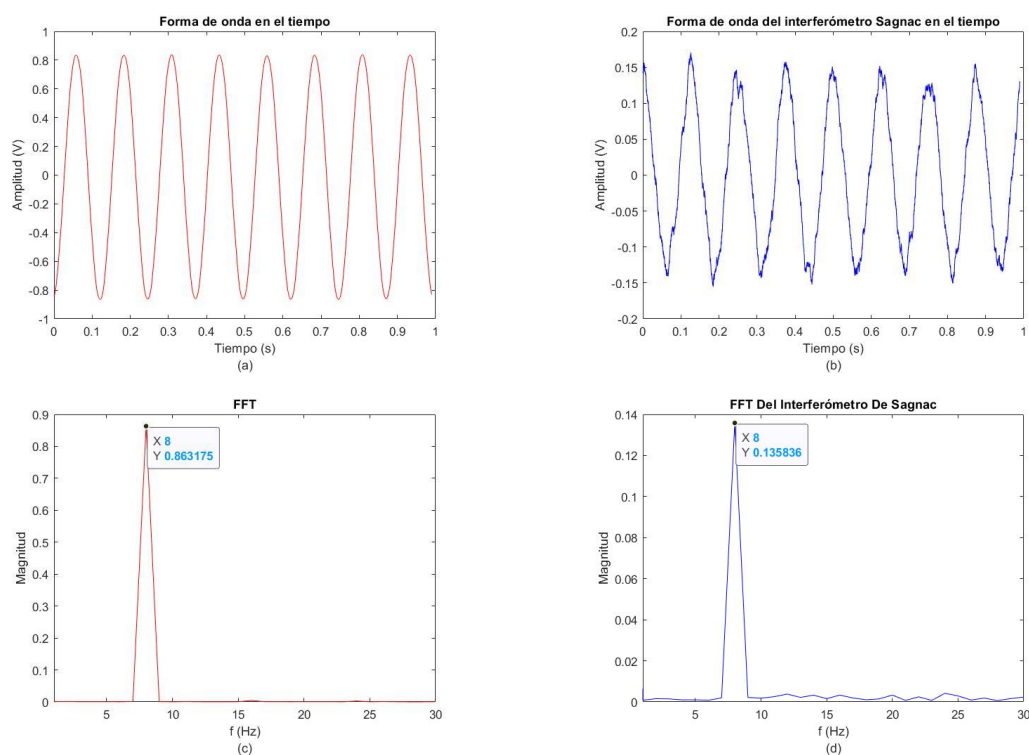


Fig.6.4: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 8 Hz.

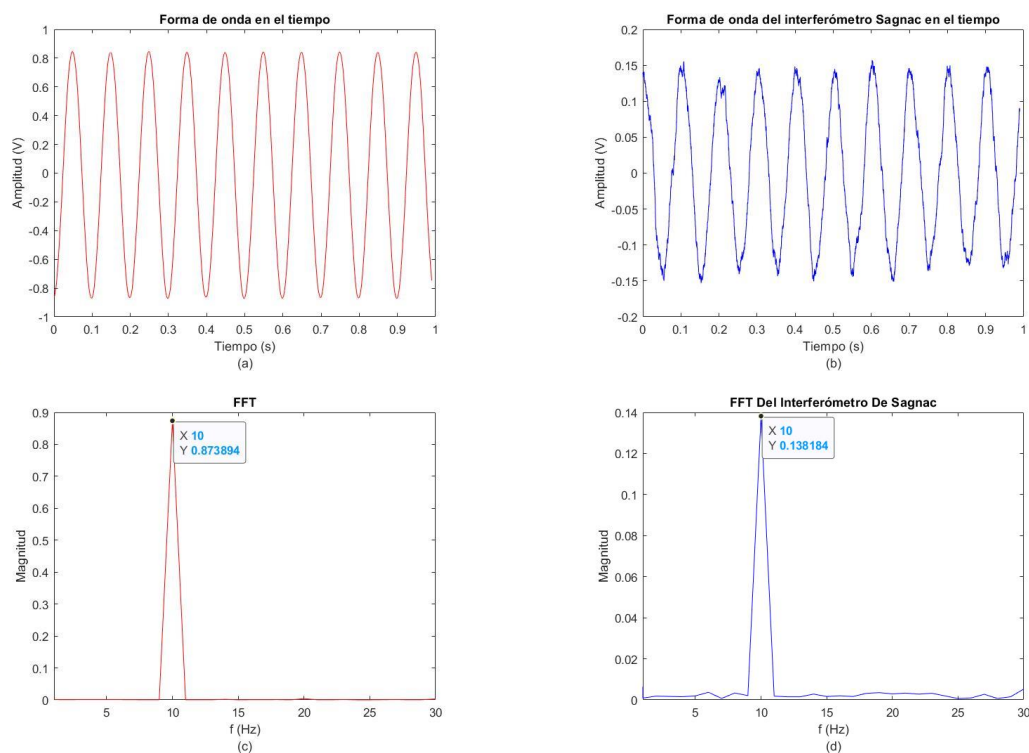


Fig.6.5: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 10 Hz.

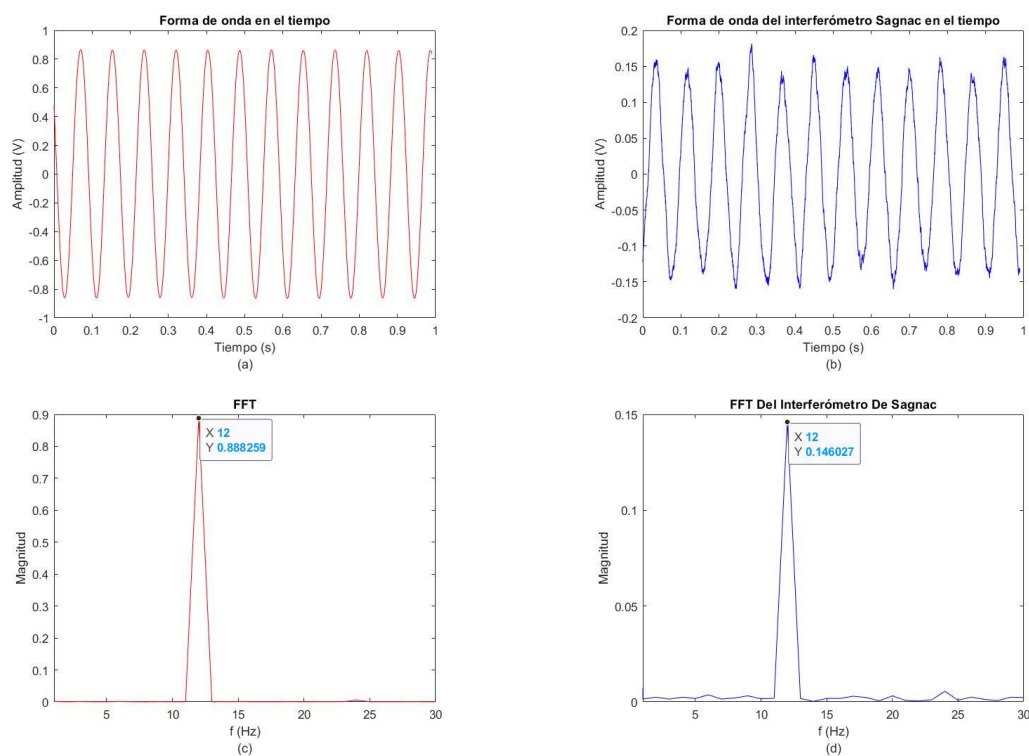


Fig.6.6: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 12 Hz.

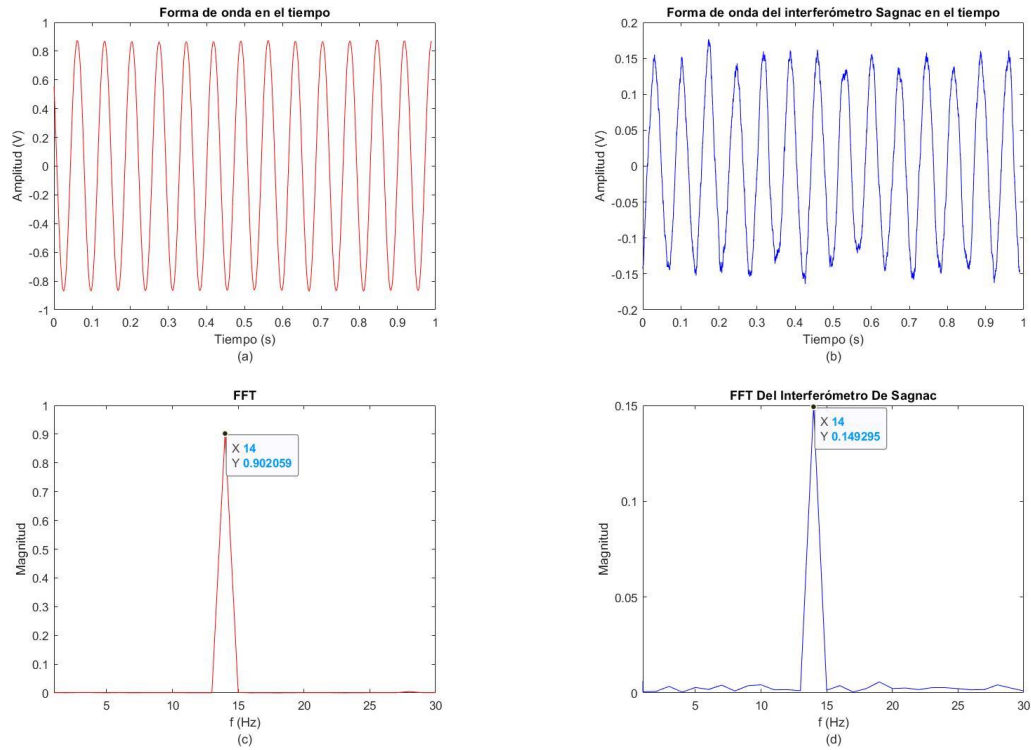


Fig.6.7: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 14 Hz.

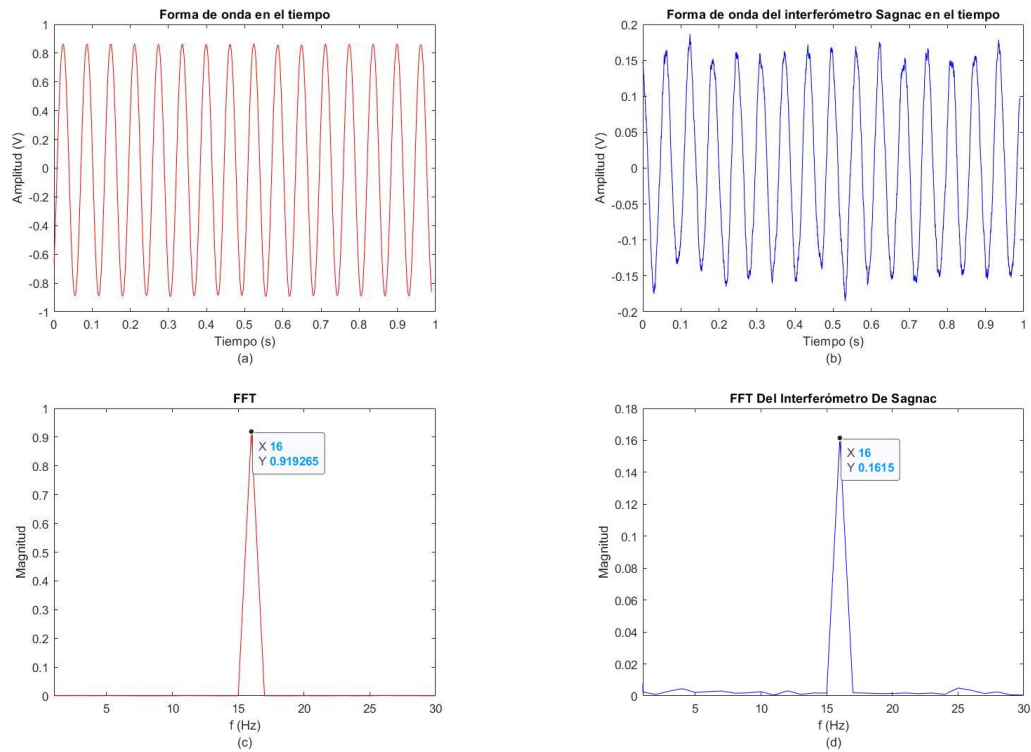


Fig.6.8: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 16 Hz.

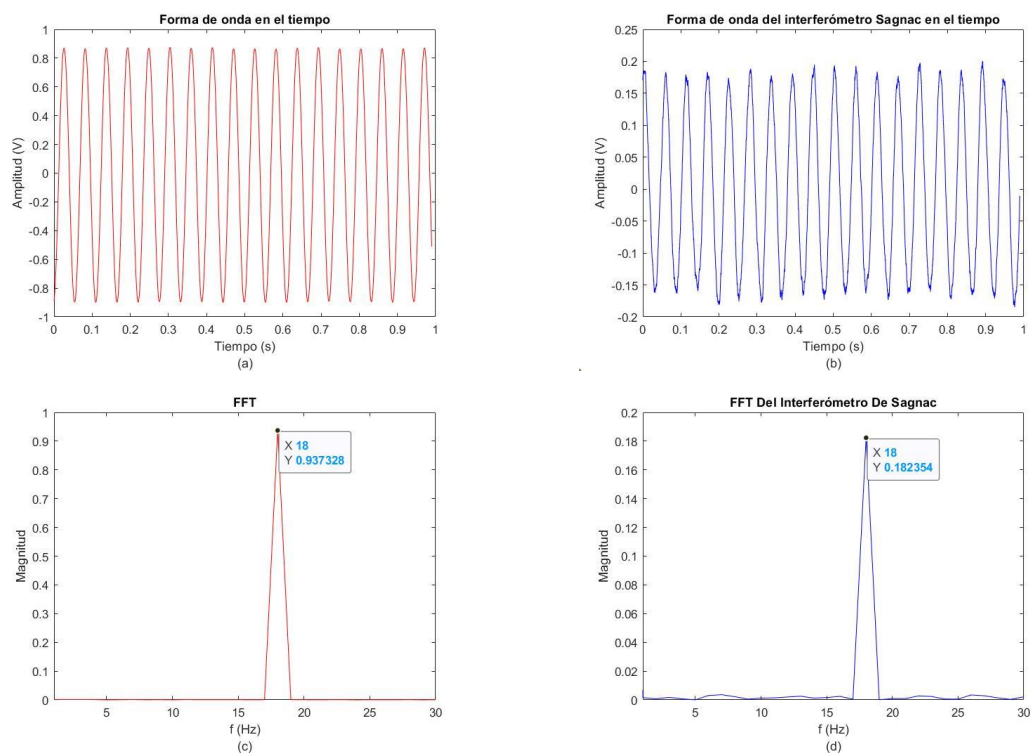


Fig.6.9: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 18 Hz.

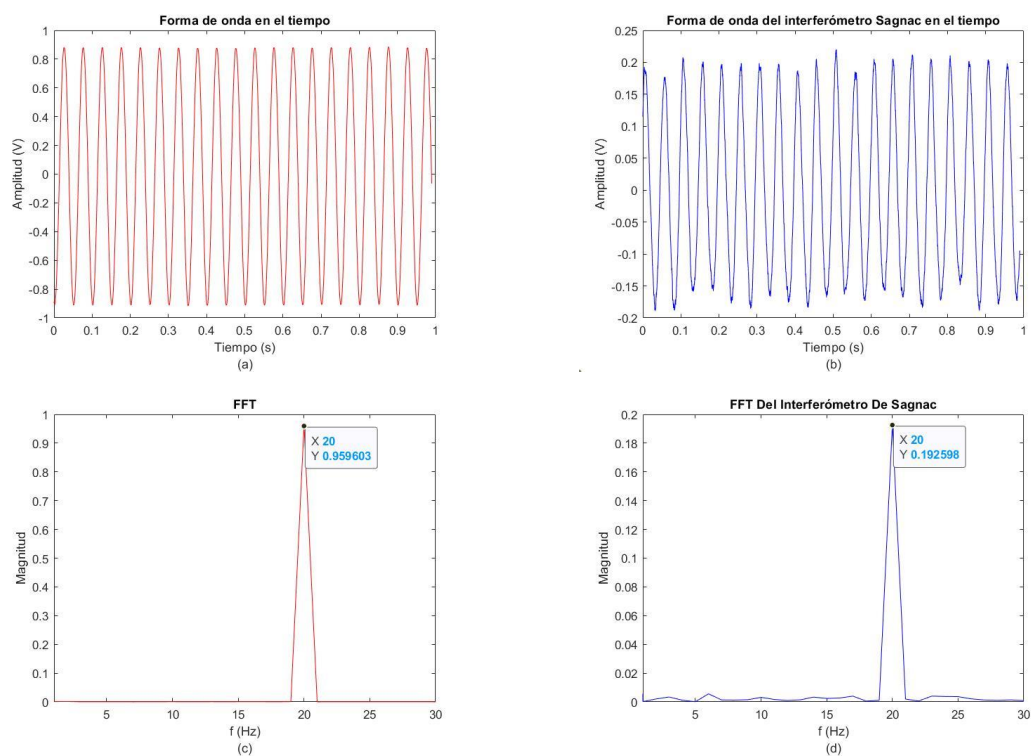


Fig.6.10: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 20 Hz.

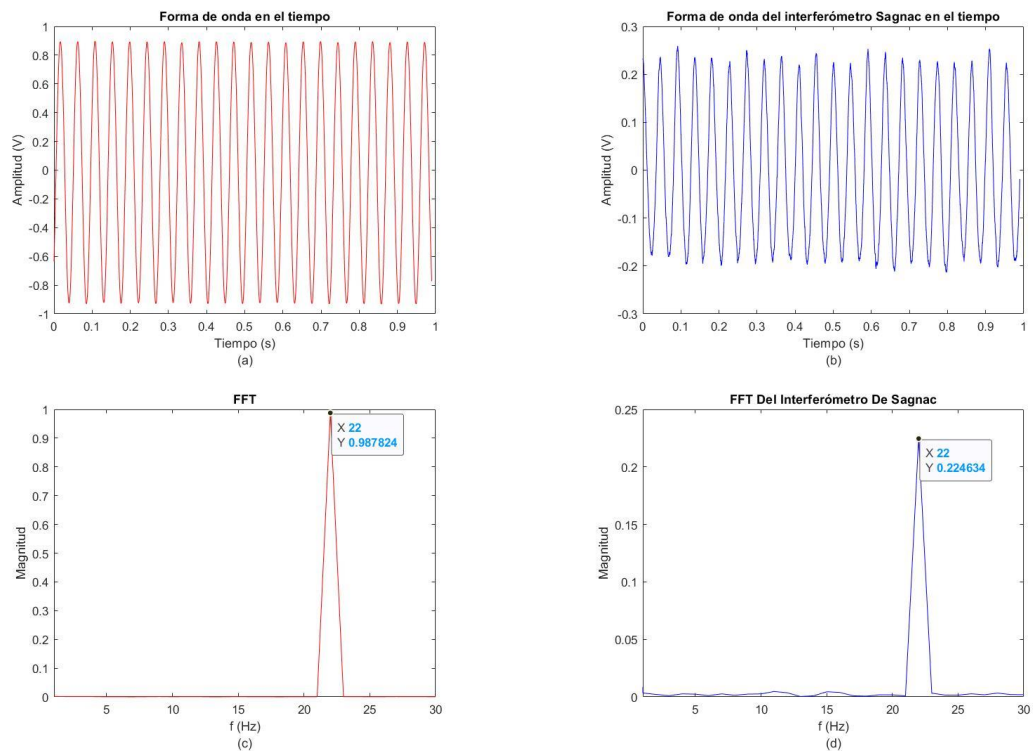


Fig.6.11: Formas de onda en el tiempo y FFT con parlante a 22 Hz.

Anexo C. Trabajo previo y su descripción

- ♣ Wang, Ying; Wu, Qifeng; Xiong, Mudi; He, Rongxi, «A new vehicle axle detector for roadways based on fiber optic Mach-Zehnder interferometer,» *Proc. SPIE* 6019, 2005.

En este trabajo se evaluó la factibilidad de un nuevo detector de ejes de vehículos para carreteras, el cual se basa en un interferómetro Mach Zehnder de fibra óptica. Este detector de ejes de vehículos posee un principio de detección bastante sencillo. Debido a esto, el sistema puede estar conformado por componentes económicos y confiables, lo que lo hace una opción muy atractiva para su aplicación en el sistema de transporte, en comparación con los detectores de ejes de vehículos convencionales.

- ♣ Nedoma, Jan; Zboril, Ondrej; Fajkus, Marcel; et al, «Fiber optic system design for vehicle detection and analysis,» *Proc. SPIE* 9889, 2016.

En esta publicación se aborda el tema de los interferómetros de fibra óptica, los cuales son dispositivos altamente sensibles y precisos que permiten medir pequeñas variaciones en diferentes tipos de deformaciones, tales como cambios de presión, temperatura, vibración, entre otros. La base de su actividad es evaluar el número de franjas a lo largo del tiempo que no presenten cambios en la intensidad de la señal óptica.

- ♣ Kepak, Stanislav; Cubik, Jakub; Zavodny, Petr ; et al, «Fibre optic track vibration monitoring system,» *Opt Quant Electron*, vol. 48, n° 354, 2016.

En este artículo, se ha propuesto, demostrado y probado un sistema alternativo para monitorear las vibraciones de una sola vía férrea en el sistema de metro de Praga. En el cual, se utilizaron dos sistemas de detección pasiva colocados a una distancia de 50 m y 1,3 km de la sala de control, con el fin de medir las vibraciones del túnel generadas por el paso de los trenes, sin verse afectadas por la interferencia electromagnética no relacionada existente en el interior del túnel del metro.

- ♣ Nedoma, Jan; Stolarik, Martin; Fajkus, Marcel; et al, «Use of Fiber-Optic Sensors for the Detection of the Rail Vehicles and Monitoring of the Rock Mass Dynamic Response Due to Railway Rolling Stock for the Civil Engineering Needs,» *Applied Sciences*, vol. 9, p. 134, 2019.

Este trabajo presenta los resultados originales de un estudio comparativo entre una estación sísmica estándar y un novedoso sensor interferométrico para su aplicación en necesidades de

ingeniería civil. Los resultados presentados indicaron que el uso de un interferómetro de fibra óptica puede ser una alternativa viable para la implementación de mediciones sísmicas mediante estaciones sísmicas estándar.

- ♣ *Mu, Jie; Zhao, Wei; Wang, Jia; Xu, Jin-tao, «New Scheme of Sagnac Interferometric Fiber-Optic Current Sensor Insensible to Mechanical Vibration,» 2010.*

En esta publicación se presenta un nuevo esquema de interferómetro Sagnac de sensor de corriente de fibra óptica insensible a vibraciones mecánicas donde se elimina el efecto Sagnac responsable de la sensibilidad a la vibración. Según los resultados experimentales obtenidos, se sugiere que el sensor de corriente de fibra óptica utilizando un interferómetro Sagnac de nueva estructura presenta un rendimiento significativamente mejor en comparación con el diseño convencional, especialmente en situaciones de fuertes vibraciones mecánicas a aceleraciones de hasta 20 g y frecuencias de 10 a 400 Hz.

- ♣ *M. J. Villareal Aguirre, «INTERFERÓMETRO DE SAGNAC CON FIBRA DE ALTA BIRREFRINGENCIA EN EL LAZO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PID,» UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO, 2019.*

En esta tesis se presenta un modelo teórico y resultados experimentales del interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia en el lazo, el cual permite hacer un ajuste fino en el desplazamiento en longitud de onda del espectro de transmitancia de este a través de la variación de la temperatura sobre la fibra de alta birrefringencia. Además, se construye un sensor de temperatura completamente de fibra óptica basado en el efecto Sagnac.