

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp)

Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

“Medición de flujo por interferometría de auto-mezclado”

Alumno:

Alan Reyes Sánchez

Director interno:

Dr. Juan Carlos García Castrejón

Director externo:

Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera

Cuernavaca, Morelos.

Noviembre 2021



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 21 de septiembre de 2021.

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
ENCARGADO DE DESPACHO
DE LA DIRECCIÓN DEL CIICAp
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: "Medición de flujo por interferometría de auto-meزلado", que presenta el alumno **Alan Reyes Sánchez**, para obtener el título de **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO

DR. RAFAEL ALBERTO MÉNDEZ SÁNCHEZ

DR. VÍCTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN

Se adiciona efirma UAEM



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ | Fecha: 2021-09-21 14:12:02 | Firmante
WTKOrY82vMrsEksQuq3bfhPAN+YRwEeMvnZLz/f5mjXz9pl+bwq56Lc3oSiS4c7kDQHsM0X3MkeXNBt9vHhc81LbGnrfaOpc3CDcZqD2jflolHn945fDxmwcwkEcpZQSSfEm
ea24NYVM3BCs6EHV8WTckQhdbsg+aM3bbQz5Rj5Qz9iab619gzL5xK2GDjYvOng6j039XnHhOZWR8aE3pQsQu+G7bqWfgcWm8FG3Lwjae4KqG6ZrkFkNbn1485Ei/HDSp
gfJGe+HlMh3xYB7ha4FOQy4HO84ebrwFGLhG6O4pptnotbtEdRPhnxP5rojAEvy9fxV1g==

VICTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA | Fecha: 2021-09-30 16:59:37 | Firmante
NoG.JNTG.JhInXcwEbhXoXCGUo778lmxUhbKb/7G41+KritqIT8TnzRg/Sof1u/zQRndasFeHqGNSCoZP52w7x58poVKgRH7ZQYz+Oo2Hv4PQ6cPhz+n4sSyW+I97eS6SqtQ
zmzU+dazOz9S9lqfZsDI65Uf7EHIOYmDial0vhOznd/jYTBZcxzJWNWZlaoyPxDXvkO3HMg3N0H5YQossT6dhXwaJgb6td23RbanGYhkGnh8FAvDXatmTptzYJoe/ZfSdmG3
38+D5g6Uj6vUp6en4YV+UX90lIXQGT1cF6GSeoF09qaQ/p76dRNIKqAFVkvzCqR7xPAHdg==

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha: 2021-10-11 11:51:42 | Firmante
ngnbfmUOidX7LwISGGf0erOanawKGlE5xRP/inSPD8Eur4u7zRneJQwLr7VtspJ/dG2Pq2sqhQVYgdZKuj3vqSOmWsbGawInXTZ9TC5PVUHT7ya50/ce9nnuqUlr0LgN9jBWA3w
+y3SQuN11hyhRCC9G5QuQRaOR7Qedl3uZNEIQ5ykrmmajk45ynP.JxUDD5P90KieU3MwAbbL+yJ1FWkmeqTKTYGvLnBOEH52JIAPOJGzlh+pFij8Eyxcq6de8MYAHz53oJ/G+H5
6+XDdQWoc8B8J7DUwihXDLdJ6EcHqYouTs+WOECMw01+f1Yczd3zckidnLFR6Zg/NQ==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha: 2021-10-20 12:52:46 | Firmante
nqN5O+J3RNE2Wx4UjIOYsuFckJ3zJ6HSu4v4uovpDjBv+NeA6v+cY7RHAAtulsNCGT8EzRd3SHJTFWjyV0lukMJYdosMP/CZSwelkoK0xnFbm1ie4RWQGD/Rsjn+maWM/odnl3T5
MeNszZCwqQrQir39MabztuqXLUgIEptv1S50igOk42D3SsP5ZmwaC1MBYOHHPx4xIly+fbOFVs7pbYONhh6cYi3a7Y5VKrKDSavHO1hGcXXPIHXnz7A/j3HQVBMxLFIcZ7i6NuQ7
kKNXZk7fH9BKrtYZhRcerjD+D3cbuTdsC0kqwfz02UmHld2MdwLFtzSWPnwgcqYQEXg==

RAFAEL ALBERTO MÉNDEZ SÁNCHEZ | Fecha: 2021-10-25 15:51:02 | Firmante
CNWSJTf/dad1VW9Gvdo7PFMmZ3nuOw8eMEKMTA+d+n6huvAO3sF5Q4tOGRPIHOppqBDP80Fjbe0Ttr9BGJh0Ek/QnzxqcMHvC1x1kve/fzduPSaRZOzFZchjop1ej3GsnOW
OCyY8s/CzhS4Pih4lfg9dBUteAfe4Dv9lvt4PmTEXCZKBRS5hsJzZDnYnkW4uQ/N82lramnSJ9OWheTcj9SRU5/P8n9RzyKDWswV3F7c/WRDwabZ9z1o6ZmarNlbfAFxjKw7
9eliAPzMX/9jRlNyxw9SXpTwYVnzp4x8qB1ac2m4tVNVSSNcGBZRFCaLHHHv01Ees9217mpg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



YHNVMEfk3

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/sPznZiFZNwLngg58MP7yFioWcyYBZ2>

Agradecimientos

Al proyecto IN109221 del programa UNAM-PAPIIT por el apoyo recibido para la adquisición del equipo y material necesario para este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT-México) le agradezco la beca recibida durante el posgrado.

Al Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera por su amistad, instrucción, paciencia, dedicación, colaboración y sobre todo sus enseñanzas.

Al Dr. Juan Carlos García Castrejón por su confianza, enseñanza, colaboración e instrucción en este proyecto de tesis.

Al resto de los miembros del jurado de tesis por sus correcciones y por su interés en este trabajo.

A mi familia, novia y amigos por apoyarme en todo momento.

Contenido

RESUMEN	11
1 Introducción	13
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Hipótesis	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos particulares	15
1.4 Justificación.....	15
2 Marco teórico	16
2.1 Interferometría de auto-mezclado (SMI).....	17
2.2 Medición de velocidad con SMI.....	20
2.3 Medición de flujos con SMI	38
3 Metodología experimental.....	46
3.1 Arreglo experimental	46
3.1.1 Obtención de señal AM	48
3.1.2 Obtención de señal FM.....	49
3.1.3 Factor de amplificación de MZI con otras técnicas.....	50
3.2 Diseño y construcción de túnel de viento	52
3.3 Procesamiento de señal.....	57
4 Resultados y discusión	59
4.1 Comparación señal ESMI-MZI contra SMI convencional	59



4.2	Validación de mediciones de velocidad con el chopper óptico.....	62
4.3	Medición de velocidad de aire.....	66
4.3.1	Determinar rango de velocidades de trabajo del túnel de viento	66
4.3.2	Determinación de distancias de medición.	70
4.3.3	Amplitud de la señal vs caudal de vapor	73
5	Conclusiones	75
6	Trabajo futuro	75

Índice de figuras

Figura 1. Detección FM de SMI por medio de una celda de absorción de acetileno [3].....	22
Figura 2. Señal SMI (a), (c) y ESMI (b), (d) en función del tiempo y frecuencia respectivamente [3]. Las señales corresponden a la medición de una velocidad de 1.93 m/s.....	23
Figura 3. Comparación de SNR en ESMI y SMI medidas con las mismas condiciones experimentales. El experimento se realizó al medir un objeto rotando y atenuando el haz de láser por medio de filtros de densidad neutra variable [3].	24
Figura 4. Rejilla volumétrica de Bragg de reflexión, el ancho espectral de un haz de entrada es filtrado angularmente permitiendo seleccionar modos longitudinales al variar el ángulo de entrada [2].	25
Figura 5. Conversión de señal FM-IM por rejilla volumétrica de Bragg (VBG) utilizando un láser Fabry-Perot [2].	26
Figura 6. Arreglo experimental de un diseño de prototipo de vibrómetro basado en ESMI por VBG.	27
Figura 7. (a) y (b) señales SMI y ESMI en función del tiempo. (c) y (d) señales SMI y ESMI en función de la frecuencia. Las señales se obtuvieron al medir vibración de una bocina con las mismas condiciones experimentales. La bocina fue alimentada con una señal senoidal de 5 kHz y 1 Vpp [2].....	28
Figura 8. Perfil de transmisión y conversión FM-IM por rejilla volumétrica de Bragg en fibra óptica. [12].	29
Figura 9. Arreglo experimental de FBG ESMI [12].	30

Figura 10 Comparación de señal SMI y FBG ESMI. En la imagen (a) se observa la señal SMI al medir la velocidad de un objeto a 100 mm/s, mientras (b) y (c) corresponden a mediciones de velocidades de 100 mm/s y 86 mm/s respectivamente, con FBG ESMI [12]..... 31

Figura 11. Comparación de señales SMI convencional y FBG ESMI, en función de la frecuencia. [12] 31

Figura 12. Configuraciones para la detección FM por interferómetros, en línea y fuera de línea respectivamente [13]..... 32

Figura 13. Arreglo experimental para la comparación de SMI convencional y SMI con doblado de franjas por FPI [15]..... 33

Figura 14. Mapeo de frecuencia modulada de SMI, en intensidad modulada y franjas duplicadas por medio del perfil de transmisión de FPI [15]..... 34

Figura 15. Comparación SMI convencional (a) y SMI con franjas duplicadas por FPI (b) [15]. 35

Figura 16. Interferómetro de Mach-Zehnder como filtro óptico (MZI). 36

Figura 17. Arreglo experimental en fibra óptica de SMI con detección FM por medio de un interferómetro Mach Zehnder [4]..... 38

Figura 18. Resultados obtenidos al medir diferentes velocidades de flujo de sangre [17]..... 40

Figura 19. Gráfica de calibración de resultados obtenidos al medir con SMI vs los datos reales configurados en la bomba [17]. 41

Figura 20. Arreglo experimental para la medición de partículas en flujo de aire [18]. 42

Figura 21. a) Representación de la amplitud de la señal con respecto al tamaño de partículas y b) representa la FFT de los 35 bloques demostrando la medición de una partícula en un solo bloque [18].	43
Figura 22. Amplitud de la señal con respecto a la distancia de medición [18].	43
Figura 23. Alineación de láser y ventana de borde. Al colocar LDM con un ángulo de 5°, el haz de salida de la ventana de borde es paralelo a la placa de pruebas.	47
Figura 24. Fotografía de arreglo experimental ESMI-MZI.	48
Figura 25. Señal SMI proveniente de un objeto en movimiento, obtenida por un fotodiodo integrado en el encapsulado del láser.	49
Figura 26. Obtención de señal AM por un fotodetector externo dividiendo el haz con un divisor de haz (BS).	49
Figura 27. Diagrama de arreglo experimental ESMI-MZI.	50
Figura 28. Al igualar los FWHM del perfil de transmisión del MZI (imagen de la derecha) con el de la celda de acetileno [7] (imagen de la izquierda), ambos perfiles tienen la misma amplificación, es decir, producen la misma relación de cambios de intensidad (Δi) con respecto a cambios de frecuencia (Δf).	52
Figura 29. Componentes principales de un túnel de viento [20].	53
Figura 30. Cálculo de longitud del difusor [20].	54
Figura 31 Túnel de viento diseñado para la medición de velocidad de aire con SMI basado en MZI.	55
Figura 32. Túnel de viento impreso en 3D con material ABS y elevado con postes para objetos de óptica.	56
Figura 33. Método de procesamiento de la señal obtenida por el fotodetector.	58

Figura 34. Experimento para comparación de señal SMI (AM) y ESMI-MZI (FM).	60
Figura 35. Obtención de señal AM al bloquear el haz proveniente de uno de los brazos del MZI.	61
Figura 36. Comparación de señal SMI (AM) vs ESMI-MZI (FM).	62
Figura 37. Disco de chopper óptico, se muestra la dirección de giro y la dirección de la velocidad normal en la misma línea de acción del láser.	63
Figura 38. Comparación de velocidad proporcionada por el chopper óptico y velocidad medida con ESMI-MZI.	65
Figura 39. Experimento para medición de velocidad de aire en túnel.	66
Figura 40. Inyección de partículas de agua en túnel de viento por medio de humidificador ultrasónico	67
Figura 41. Señales de velocidad del túnel de viento medidas con el sensor LIDAR.	69
Figura 42. Gráficas de amplitud contra velocidad para determina el rango de medición en distancia y velocidad	71
Figura 43. Inyección de partículas de agua en el túnel de viento.	72
Figura 44. Gráfica de caudal vs amplitud de señal.	73

RESUMEN

La interferometría de auto mezclado –self-mixing interferometry (SMI)– es una técnica simple para aplicaciones metrológicas, en la cual, la interferencia se produce cuando parte de la luz de un haz láser es retro-reflejado por una muestra y se acopla en la cavidad láser, produciendo una modulación en amplitud (AM) y una modulación en frecuencia (FM). En la técnica SMI convencional la señal se obtiene directamente de la potencia del láser, al acoplar un haz de luz proveniente del láser a un fotodetector, que convierte la modulación AM en corriente eléctrica modulada para su análisis posterior. Recientemente se han desarrollado metodologías para demodular la señal del canal FM y amplificarla respecto al canal AM, incrementando la sensibilidad de SMI hasta en dos órdenes de magnitud. En las metodologías reportadas en la literatura científica, la detección del canal FM se lleva a cabo a través de una conversión o mapeo de la señal FM en señal modulada en intensidad (IM), a través de técnicas ópticas de absorción o interferencia.

En este trabajo se implementó un interferómetro Mach Zehnder (MZI) como técnica para demodular la señal FM de SMI debido a que es una de las técnicas interferométricas que alcanzan mayores factores de amplificación. Una vez mejorada la sensibilidad de la técnica se investiga su desempeño en el monitoreo de velocidades de aire en un túnel de viento en el que se introduce vapor de agua para retro-esparcir luz a la cavidad láser. El arreglo experimental descrito en este trabajo representa una nueva alternativa de sensor lidar Doppler para medir velocidad de aire, de menor costo que un sensor lidar convencional, ya que utiliza un diodo láser multimodo de 25 mW de potencia máxima.

Abstract

SMI represent a rising technology for metrology applications, broadly used to measure velocity and vibrations. In which, a part of the laser beam is reflected by a moving object and reenter to the laser cavity, then producing amplitude modulation (AM) and frequency modulation (FM). To get the conventional SMI signal, variation of the potential is measure directly through the photodiode, converting the laser beam amplitude modulated in to current variations to analyzed. Lately have been present new methodologies to FM detection, this has allowed to improve the sensibility until two magnitude orders in relation to AM detection. In the methodologies that have been reported in scientific literature, FM detection is accomplished by conversion or mapping of FM into intensity modulated (IM) through optical absorption or interferometric techniques.

In this work we implement a Mach Zehnder interferometer (MZI) as a technic to demodulate SMI FM signal with the argument that MZI is one of the techniques that allow a better amplification factor. Once the sensitivity of the technique has been improved, we investigate its performance in wind speed measurement of a tunnel wind, using water steam to backscatter laser light towards the cavity. The experimental set-up of this work represents a low-cost Doppler lidar alternative to measure wind speed because it uses a 25-mW maximum power multimode laser diode.

1 Introducción

En el presente trabajo de tesis se implementa un sensor lidar Doppler para medir velocidad de aire, utilizando la técnica interferometría de auto mezclado (SMI acrónimo del inglés self-mixing interferometry). SMI es una técnica metrológica utilizada en medición de vibraciones, desplazamientos, distancias y velocidad, funciona por el efecto Doppler y originalmente detecta modulación de amplitud (AM) [1]. Sin embargo, sus aplicaciones más comunes son mediciones de objetos sólidos reflejantes. Por otra parte, es posible detectar la señal FM de SMI, la cual se ha demostrado que bajo determinadas condiciones experimentales tiene mayor amplitud y mejor relación señal a ruido (SNR) que detectando la señal AM. Es posible demodular la señal FM de SMI por medio de rejillas de Bragg [2], Celdas de absorción [3] o interferómetros [4]. En este trabajo se utiliza un interferómetro de Mach Zehnder con componentes en aire para demodular la señal FM de SMI, debido a que utilizando un MZI es posible ajustar un factor de ampliación de señal FM con respecto a la señal AM al modificar la diferencia de distancia entre ambos brazos del MZI, de esta forma es posible igualar y mejorar la amplificación de otras técnicas y también medir velocidad de aire.

El sistema lidar Doppler tiene como ventajas principales no ser intrusivo y ser preciso y exacto, sin embargo, los lidar convencionales presentan algunas desventajas como la alineación del láser, su alto costo [5], pueden representar un peligro para el ojo humano si emiten longitudes de onda que penetran hasta la retina con potencias altas, entre otras. En este proyecto se implementó una nueva alternativa de sistema lidar Doppler de un costo menor al de los comerciales por medio de interferometría de auto mezclado, gracias a que es posible utilizar un diodo láser de bajo costo.

1.1 Planteamiento del problema

Los sistemas lidar Doppler comerciales tienen altos costos de adquisición y mantenimiento. De acuerdo con la referencia [6] el costo de adquisición del sensor lidar para una granja eólica es de 120 000 dólares, a estos lidar se les realiza un mantenimiento con una frecuencia de 2 años y tiene un costo de 12 000 dólares, además estos lidar tienen una vida útil de 10 años. Sin embargo, a pesar de tener altos costos, tienen un mejor costo-beneficio. Este costo-beneficio podría mejorar con el uso de otras técnicas que requieran componentes más económicos, por ejemplo, la técnica SMI, con la cual es posible utilizar un diodo láser, el cual es más económico que otros tipos de láser empleados en sensores lidar.

Existe área de oportunidad con la técnica SMI aplicada en sensores lidar. Las aplicaciones de SMI en medición de velocidad de aire están poco exploradas, como muestra de esto, solo existe una publicación donde midieron la velocidad de una partícula fluyendo en aire [7]. Dicha publicación se describe en la sección de estado del arte.

1.2 Hipótesis

Este trabajo se pretende implementar una alternativa de sensor lidar basado en la técnica SMI y la detección de su señal FM, debido a que la señal FM supera en sensibilidad a la señal AM de SMI. La hipótesis de este trabajo es que dicha señal FM es lo suficientemente sensible para medir velocidad de aire bajo condiciones experimentales específicas. Para detectar la señal FM se utilizará un MZI con componentes en aire, con la finalidad de ajustar el factor de amplificación de la señal FM con respecto a la señal AM, tomando como referencia el factor de amplificación de una técnica reportada con la cual se logró medir velocidad de aire.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Implementar una alternativa de un sistema lidar Doppler basado en la técnica SMI empleando la detección de señal FM y caracterizar su desempeño en la medición de velocidad de aire.

1.3.2 Objetivos particulares

- Implementar el arreglo experimental SMI, de detección FM con un **interferómetro de Mach Zehnder**, integrado por componentes en aire.
- Comparar la señal FM amplificada contra la señal AM.
- Determinar las distancias de operación del sistema lidar Doppler.
- Medir en condiciones controladas la velocidad de aire en un túnel de aire.

1.4 Justificación

Los sistemas lidar Doppler convencionales son eficaces para medir velocidades de objetos sólidos y flujos sin contacto físico, sin embargo, el costo elevado de estos dispositivos limita sus aplicaciones en áreas científicas e industriales. Un sensor lidar basado en técnicas simples como la interferometría de auto mezclado podría representar una alternativa atractiva debido a que requiere de instrumentación más simple y económica, lo que reduciría los costos del dispositivo y permitiría su uso para un mayor número de aplicaciones.

2 Marco teórico

Lidar – **L**ight **D**etection and **R**anging – es una técnica de medición remota análoga al radar, con la diferencia de que utiliza luz láser. Los sensores lidar convencionales miden el tiempo de vuelo de un pulso láser entre el sensor y el objetivo [8]. Otro tipo de lidar es el anemómetro lidar o lidar Doppler utilizado para medir velocidad de aire, a partir del esparcimiento de luz que producen las partículas contenidas en el aire. Los lidar Doppler se pueden clasificar en pulsados y continuos, ambos dirigen luz en una región de interés y la luz retro esparcida con corrimiento de frecuencia por efecto Doppler es recolectada y mezclada con un haz de referencia, posteriormente es enviada a un detector [9]. Este trabajo se enfocará en los lidar Doppler de onda continua.

La medición de velocidades con lidars tiene origen con Y. Yeh y H. Z. Cummins en el año 1964, al medir por primera vez velocidad de un fluido con un interferómetro Mach Zehnder con un láser He-Ne de 5 mW. En el experimento reportado el haz de prueba se dirige a una cámara con flujo de agua y partículas de poliestireno. La luz esparcida por el poliestireno se combina con el haz de referencia para producir la interferencia y posteriormente se detecta la señal con un tubo fotomultiplicador [1].

En 1965 se reportó la primera medición de velocidad de aire con lidar. En el experimento se utilizó un interferómetro de dos brazos con un láser He-Ne de 5 mW con el que midieron flujo de aire a través de un tubo conectado a un extractor, al cual se le inyectó humo para producir esparcimiento de luz. Esta luz se recolectó con un lente que la enfocaba en un fotocátodo, en el cual interfería con el haz de referencia. La señal de interferencia con el corrimiento de frecuencia f_d se analizó con un medidor de frecuencia analógico. Como resultado lograron medir con exactitud una velocidad máxima de 1 m/s.

Posteriormente se reportaron numerosos experimentos de medición de velocidad de fluidos con láser. Sin embargo, fue hasta 1995 cuando Donati, Giuliani y Merlo desarrollaron el primer prototipo de interferómetro de un solo brazo denominado interferómetro de retroalimentación láser (Interferómetro de automezclado) [10]. Este interferómetro representó una alternativa más simple y económica para medir vibraciones y velocidad, incluyendo velocidad de fluidos.

2.1 Interferometría de auto-mezclado (SMI)

La interferometría de auto mezclado –self-mixing interferometry (SMI)– representa una técnica simple para aplicaciones metrológicas en donde la interferencia se lleva a cabo cuando parte de la luz de un haz láser es retro reflejado por una muestra y se acopla a la cavidad láser, produciendo una modulación en amplitud (AM) y una modulación en frecuencia (FM) y por lo tanto de la potencia. La modulación es controlada por los cambios de fase $2ks(t)$, donde k es el vector de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ es la longitud de onda del láser y s el vector de posición del objetivo [3].

En SMI la señal del efecto Doppler resultante de la velocidad, vibración o desplazamiento de un objeto, se obtiene por la superposición de dos ondas con frecuencias casi iguales, la onda del láser dentro de la cavidad y la onda del haz retro-reflejado, produciendo un fenómeno llamado batido de ondas, y la señal AM se obtiene al medir directamente la potencia del láser (P):

$$P = P_0[1 + m F(2ks)], \quad (1)$$

donde P_0 es la potencia del láser sin perturbar y m es el índice de modulación que depende directamente de la atenuación del campo $A^{-\frac{1}{2}}$:

$$m = A^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{c}{2s(\gamma - \frac{1}{\tau})} \right], \quad (2)$$

donde: γ es la ganancia por unidad de tiempo en el medio, τ es el tiempo de vuelo de haz de ida y vuelta $\tau = \frac{2L}{c}$. La forma de onda $F(2ks)$ es una función periódica de la fase $\phi = 2ks$ con un ciclo completo cada vez que el cambio en distancia es $\Delta s = \frac{\lambda}{2}$ y la forma de la función F depende del parámetro de retro alimentación C :

$$C = (1 + \alpha^2)^{\frac{1}{2}} A^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{\epsilon(1-R_2)}{\sqrt{R_2}} \right] \frac{s}{n_{las} L_{las}}, \quad (3)$$

donde α es el factor de mejora del ancho de línea del láser, ϵ es el coeficiente de coincidencia de la superposición del haz de luz reflejado y el haz principal, sus valores típicos son de 0.1 a 0.8, n_{las} es el índice de refracción del medio y L_{las} es la longitud del camino óptico.

En 2002, G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati et al., publicaron una revisión sobre aplicaciones de SMI en metrología con objetos sólidos, como: medición de desplazamiento, velocidad y distancia. A continuación se describe brevemente la metodología reportada en dicha publicación para utilizar SMI en distintas aplicaciones.

Desplazamiento: Para medir desplazamiento el haz se enfoca en la superficie del objeto, la cual debe ser capaz de reflejar una fracción del haz de regreso a la cavidad, y dependiendo el porcentaje de reflexión se agrega un atenuador óptico. Esta reflexión debe mantenerse en el régimen de retroalimentación óptica de $c > 1$ [1], para obtener señal tipo diente de sierra, la cual determinara la dirección del desplazamiento de acuerdo con la dirección del diente. El valor del desplazamiento se obtiene a partir de la señal de interferencia, gracias al efecto Doppler, con una resolución de $\lambda/2$. Después se deriva la señal analógica SMI, posteriormente se cuentan los pulsos positivos y negativos de la señal derivada.

Velocidad: Con SMI también es posible medir velocidad de un objeto (v), por ejemplo, un disco girando. En este caso también se obtiene una señal en función del corrimiento de frecuencia por efecto Doppler. La medición se realiza al apuntar el láser a un objeto con velocidad constante y la señal obtenida es una señal periódica de 2π . Esta señal está en función de una componente de la velocidad normal del objeto [1]. En los experimentos realizados midieron la velocidad de un auto, al apuntar el láser en la carretera. Se obtuvieron con éxito mediciones de hasta 55.5 m/s con un error máximo de 5%, este error se puede reducir al aumentar el tiempo de adquisición de la señal.

Distancia: También es posible medir la distancia de un objeto fijo. Esto se logra modulando la emisión del láser en una forma de onda triangular, a esta modulación se superpone la reflexión del objeto fijo. En consecuencia el número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, será una variación $\Delta k = -\frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda^2}$. Finalmente considerando el número de franjas (N) de interferencia por la modulación de emisión del láser, se obtiene la distancia del objeto como $s = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} N$.

Vibraciones: La medición de vibraciones sin contacto es una técnica para medir desplazamientos con respecto a un origen. Esta técnica es utilizada en aplicaciones científicas e industriales, donde es importante tener alta sensibilidad y poca o nula invasión, por ejemplo: análisis modales, pruebas de ruido y vibración, caracterización de altavoces y piezoeléctricos, entre otros. Con la técnica SMI se ha demostrado capacidad de desempeñar estas aplicaciones, midiendo vibraciones con amplitudes mayores a $\frac{\lambda}{2}$ mediante la técnica denominada conteo de franjas.

La referencia [1] demuestra la versatilidad de la técnica SMI y su potencial uso a distintas aplicaciones metrológicas. Este trabajo se enfoca en aplicar la técnica SMI como sensor lidar Doppler para la medición de velocidad de aire, debido a que las

aplicaciones de los sensores lidar Doppler podrían extenderse si el costo de estos dispositivos fuera menor. Algunas aplicaciones comunes de sensores lidar son:

- Validación de modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Medición de velocidades en túneles de viento para pruebas de aerodinámica.
- Mediciones de velocidad en granjas eólicas.

2.2 Medición de velocidad con SMI

Para medir velocidad de un objeto sólido con SMI, se enfoca el haz en el objeto de medición. Si el objeto está en movimiento la reflexión difusa de luz presenta un corrimiento de su frecuencia que puede medirse si el haz reflejado interfiere con luz dentro de la cavidad láser (auto-mezclado). Cuando se mide la velocidad de un fluido, no se consideran reflexiones debido a la ausencia de interfases (aire-sólidos), sino el esparcimiento de luz producido por partículas presentes en el fluido que pueden ser introducidas deliberadamente. Si el diámetro de las partículas se encuentra en el orden de $\frac{1}{10}\lambda$, se denomina esparcimiento Rayleigh donde la potencia esparcida es proporcional a $\frac{1}{\lambda^4}$. Este tipo de esparcimiento se produce generalmente por átomos y moléculas debido a que cumplen la condición del tamaño, sin embargo, para la medición de velocidad de fluidos no se detecta el esparcimiento Rayleigh debido a que la luz esparcida es muy baja en el rango visible-infrarrojo que se utiliza generalmente en aplicaciones lidar; y esto se traduce a una relación señal a ruido muy baja (SNR). Para medir velocidad de fluidos con sensores lidar las partículas utilizadas son mayores a $\frac{1}{10}\lambda$, por ejemplo: aerosoles de entre 1 μm y 5 μm como polvo, humo, gotas de agua, etc. El esparcimiento producido por partículas de dimensiones similares o mayores a la longitud de onda de la luz esparcida se denomina Mie. En general, el esparcimiento es mayor en las direcciones de propagación de la luz incidente y en la dirección contraria (retro-esparcimiento), lo cual resulta ventajoso para la técnica SMI.

Para medir velocidad con SMI, el cambio de fase por efecto Doppler es:

$$2ks(t) = 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) (L \pm vt) \quad (4),$$

donde: L es la distancia entre el láser y el objetivo y v es la velocidad del objeto en la misma línea de emisión del láser. El cambio en la frecuencia (Δf_D) es:

$$\Delta f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos\theta \quad (5),$$

donde: θ es el ángulo del objetivo con respecto al haz de láser.

Métodos de detección de señal FM en SMI

En la técnica SMI convencional se adquiere la amplitud modulada de la señal (AM), la cual se obtiene al medir directamente la potencia del láser, sin embargo, se ha demostrado que la modulación en frecuencia (FM) en SMI puede ser más intensa en comparación con AM en determinadas condiciones. La señal FM no se puede medir directamente debido a que la frecuencia modulada se encuentra en el orden de THz y los dispositivos electrónicos no son capaces de detectar THz. Sin embargo, recientemente se han publicado métodos ópticos para demodular la señal FM de SMI los cuales se describen a continuación.

Método de absorción

En 2015 Contreras et al. publicaron por primera vez la detección de la señal FM en SMI, utilizando una celda de acetileno ($C_2H_{2\text{cell}}$). Esto se logró mapeando la señal FM en intensidad modulada (IM) mediante el borde del perfil de un pico de absorción de acetileno (C_2H_2). A esta técnica que utiliza la demodulación de la señal FM en SMI se le denominó ESMI (Enhanced Self-Mixing Interferometry). La demodulación del canal FM ocurre si el ancho espectral del láser ($\Delta\nu_{\text{láser}}$) es más estrecho que el ancho espectral del perfil de absorción ($\Delta\nu_{\text{line}}$), si esto ocurre los cambios de frecuencia ($\Delta\nu$) producen cambios en la transmisión, los cuales son posibles de

medir con fotodetectores. La señal de ESMI se puede derivar de la ley de Lambert-Beer:

$$I = I_0 \exp[-LN\sigma(v)] \quad (3),$$

donde L representa la longitud del camino óptico, N es la densidad numérica (cantidad de moléculas) y $\sigma(v)$ es la sección transversal del perfil de absorción. $\sigma(v)$ se puede aproximar a una función lineal cuando un pico de la emisión del láser coincide con el borde del filtro de absorción:

$$\sigma(v) = mv \quad (4),$$

donde m representa la pendiente de la aproximación lineal del perfil de absorción (m^2/Hz) y v representa la frecuencia de absorción. El factor de amplificación es directamente proporcional a m , entre más pronunciada sea la pendiente (perfiles de absorción más angostos), mayor será la amplificación de la señal.

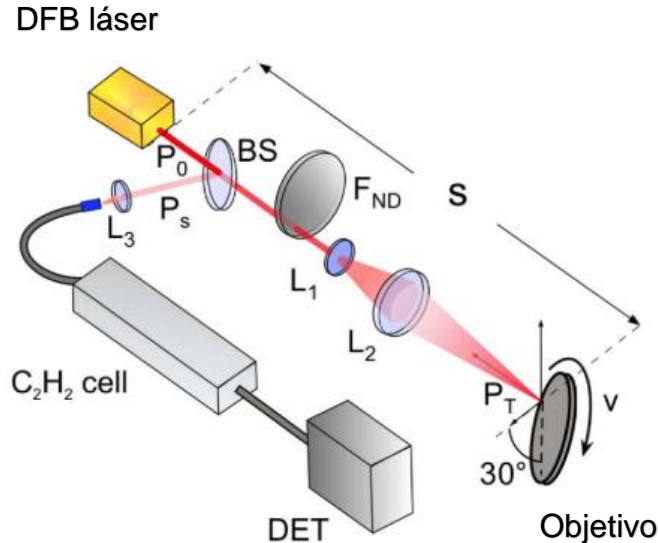


Figura 1. Detección FM de SMI por medio de una celda de absorción de acetileno [3].

El arreglo experimental para la detección de AM y FM (Figura 1), utilizó un láser de $\lambda = 1532 \text{ nm}$ y una ventana de borde como divisor de haz (BS). El haz del láser transmitido por el BS es enfocado en un disco rotando por medio de un sistema telescópico de lentes. El disco se colocó con un ángulo de 30° con respecto a la línea de emisión del láser. Se colocó un filtro de densidad neutra variable (F_{ND}) para controlar la intensidad del haz. El haz reflejado por el BS con una potencia aproximada del 2% de la potencia original del láser, es enfocado por L3 en una fibra óptica y enviado a la celda C_2H_2 (Figura 1). Finalmente, el haz que sale de la celda C_2H_2 es enviado a un fotodetector (DET) para obtener una señal eléctrica en función de la luz que recibe.

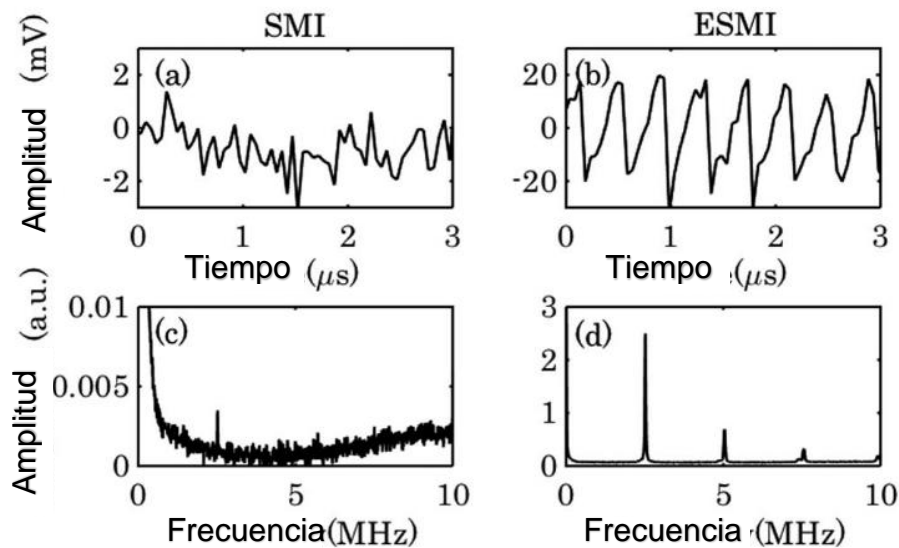


Figura 2. Señal SMI (a), (c) y ESMI (b), (d) en función del tiempo y frecuencia respectivamente [3]. Las señales corresponden a la medición de una velocidad de 1.93 m/s .

Se realizaron experimentos para comparar la amplitud y la relación señal a ruido (SNR) de AM y FM. Para comprar la amplitud se midió la velocidad de un objeto rotando, al obtener la señal se observó una mejora de aproximadamente 2 órdenes de magnitud en amplitud en función de la frecuencia, como se muestra en la Figura 2. Para comparar SNR con las mismas condiciones experimentales, se midió la

velocidad de un disco rotando a 3 m del láser y se atenuó gradualmente la potencia del láser con un filtro de densidad neutra variable. Como resultado se observa en la Figura 3 que ESMI es mejor por 2 órdenes de magnitud en SNR que SMI y la mejora fue constante al atenuar la potencia del láser. Las señales fueron obtenidas con un osciloscopio utilizando un tiempo de muestreo de 50 milisegundos y un ancho de banda de 20 MHz, permitiendo detectar hasta una velocidad máxima de 7.6 m/s.

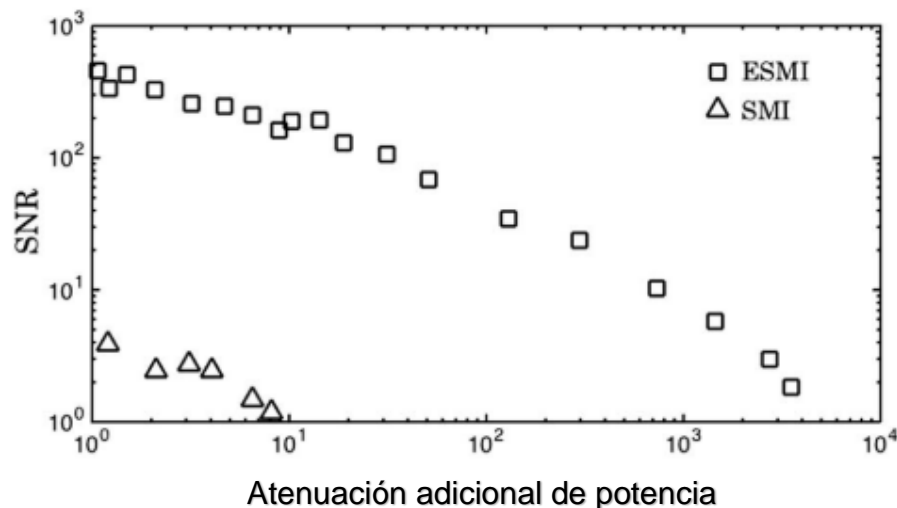


Figura 3. Comparación de SNR en ESMI y SMI medidas con las mismas condiciones experimentales. El experimento se realizó al medir un objeto rotando y atenuando el haz de láser por medio de filtros de densidad neutra variable [3].

La principal desventaja de este método es que la longitud de onda del láser debe sintonizarse a la longitud de onda de una de las bandas de absorción del gas contenido en la celda. La sintonización de la longitud de onda se logra al variar la temperatura o la corriente del diodo láser. Sin embargo, la mejora de señal de SMI por celda de absorción de acetileno fue el primer método publicado para convertir la señal FM-IM, con un diseño que aporta un amplio rango de operación y la posibilidad de utilizarse con las longitudes de onda de luz en los rangos de absorción de las celdas de absorción comerciales.

Métodos de interferencia (Difracción)

Rejillas de Bragg en aire

Las rejillas volumétricas de Bragg (VBG) son rejillas de difracción con una modulación periódica del índice de refracción a través del volumen de un material fotosensible [2]. La función de las VBG es el filtrado angular del ancho espectral del haz incidente (Figura 4). Si el haz del láser contiene modos longitudinales, se puede seleccionar un modo gracias a su relación con el ángulo de entrada a la VBG (Figura 5). Distintos modos longitudinales pueden seleccionarse al variar el ángulo de entrada de la VBG. Es decir, cuando los modos longitudinales coinciden con un ángulo específico, de acuerdo con la ley de Bragg, serán transmitidos o reflejados permitiendo seleccionar entre un modo u otro [11]. De esta manera, la señal FM es mapeada en IM y amplificada de en función del ancho del perfil de la VBG.

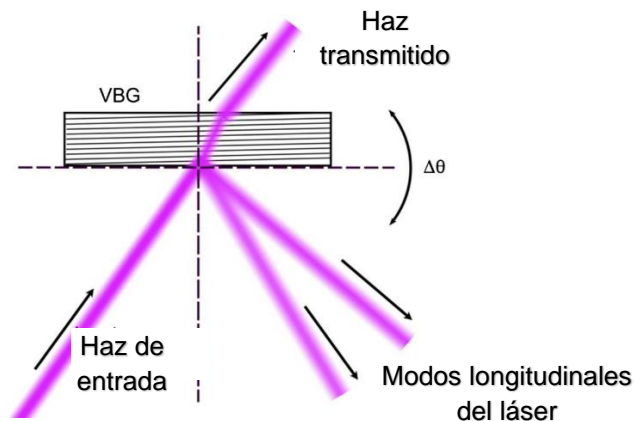


Figura 4. Rejilla volumétrica de Bragg de reflexión, el ancho espectral de un haz de entrada es filtrado angularmente permitiendo seleccionar modos longitudinales al variar el ángulo de entrada [2].

En la referencia [2] se reportó por primera vez la técnica ESMI de detección FM por VBG, la cual se puede aplicar para cualquier longitud de onda de láser. Para demostrar la detección FM se implementó un arreglo experimental con un láser de 405 nm y una VBG del mismo rango espectral de láser, la VBG utilizada tiene un perfil de transmisión con un FWHM de aproximadamente 70 pm. El láser utilizado

emite modos longitudinales con una separación de 70 pm, por lo que al incidir el haz en la VBG más de un modo longitudinal es mapeado por el perfil de transmisión (Figura 5). Por lo tanto, el haz a la salida de la VBG contenía más de un modo longitudinal, sin embargo, fue posible filtrarlo con el uso de un sistema optomecánico denominado iris, al colocarlo frente a la VBG. El arreglo experimental, mostrado en la Figura 6, consiste en un láser modelo L405P20 de la marca Thorlabs con una potencia máxima de 20 mW. El haz del láser es colimado y posteriormente dirigido a un divisor de haz (BS). El haz transmitido por BS es enfocado en la superficie de una bocina, la cual fue controlada por un generador de ondas con una onda senoidal de 5 kHz y 1 Vpp. Por otra parte, el haz reflejado por el BS es dirigido a la VBG, dicho haz contiene aproximadamente el 4% de la potencia del haz principal. Se ajusto el ángulo con el que incide el haz a la VBG para seleccionar el modo longitudinal con mayor intensidad, de esta forma se obtuvo la frecuencia modulada mapeada a intensidad modulada. Posteriormente se utilizó un fotodetector para analizar la señal con un osciloscopio [2].

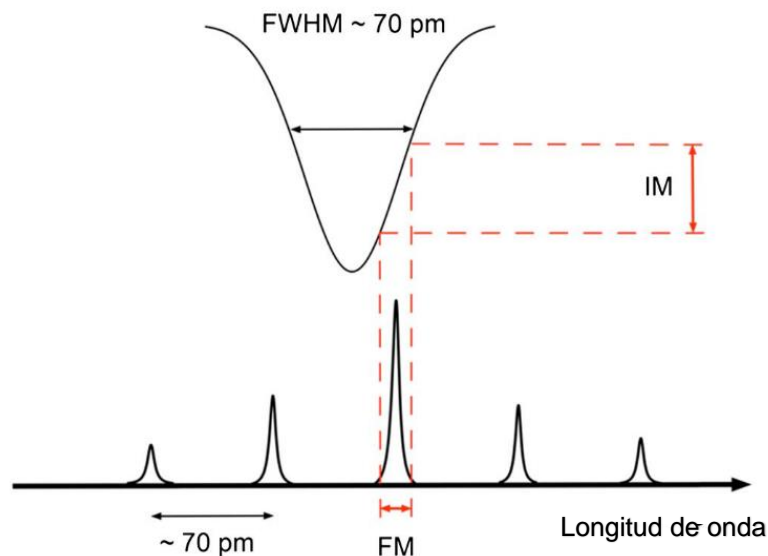


Figura 5. Conversión de señal FM-IM por rejilla volumétrica de Bragg (VBG) utilizando un láser Fabry-Perot [2].

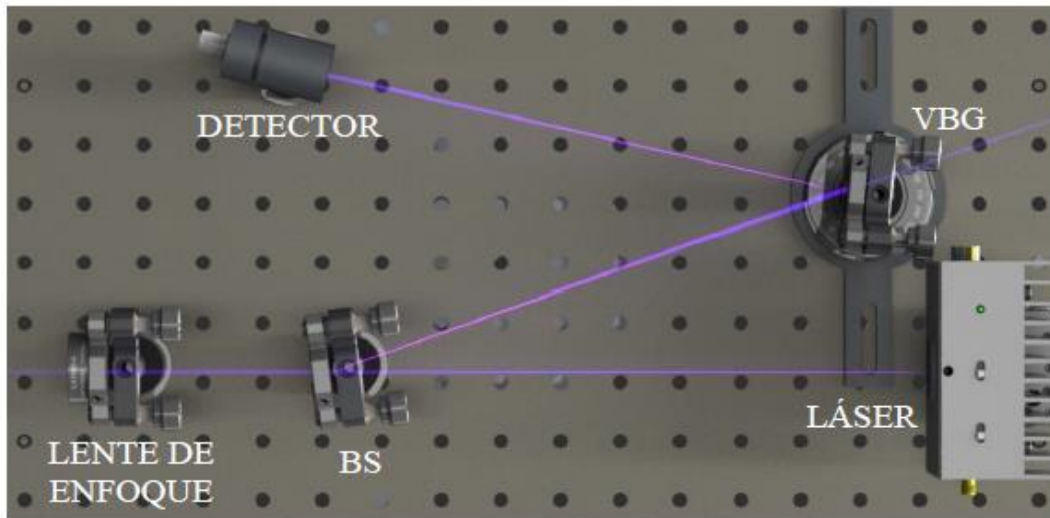


Figura 6. Arreglo experimental de un diseño de prototipo de vibrómetro basado en ESMI por VBG.

En la comparación de señal de SMI vs ESMI con en el arreglo experimental de la Figura 6, para obtener AM se colocó un espejo frente a la VBG y de esta forma se logró comparar ambas señales con las mismas condiciones. Para obtener las mismas condiciones se igualo el voltaje DC de AM y FM, para tener la misma cantidad de luz en la entrada en el detector. Para la señal FM se seleccionó el modo longitudinal más brillante, correspondiente a 404.75 nm de longitud de onda con las condiciones de corriente y temperatura establecidas en los experimentos. Ambas señales se obtuvieron en función del tiempo y frecuencia. En la Figura 7 (a) y (b) se muestran las señales en función del tiempo en un rango de 6 milisegundos y (c) y (d) en función de la frecuencia. Al analizar las señales se obtuvo una mejora de una orden de magnitud en amplitud y SNR a favor de ESMI.

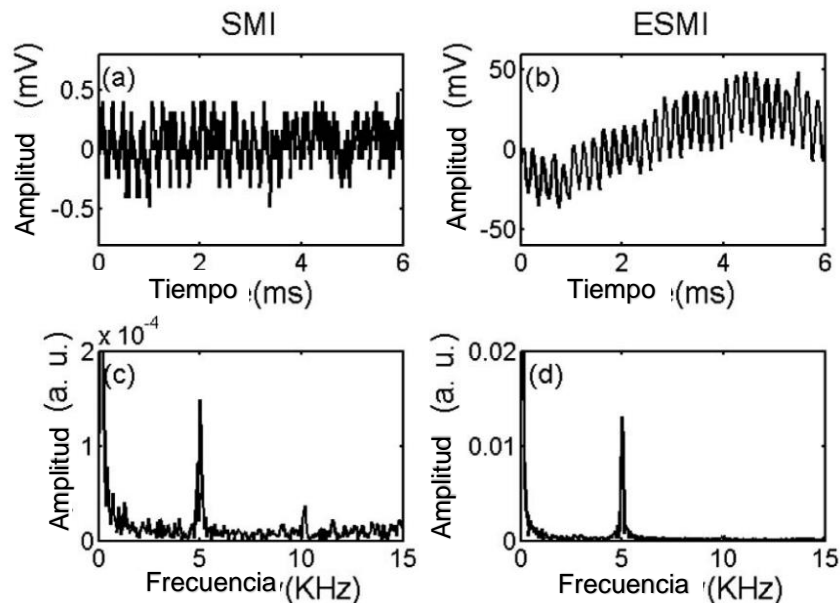


Figura 7. (a) y (b) señales SMI y ESMI en función del tiempo. (c) y (d) señales SMI y ESMI en función de la frecuencia. Las señales se obtuvieron al medir vibración de una bocina con las mismas condiciones experimentales. La bocina fue alimentada con una señal senoidal de 5 kHz y 1 Vpp [2].

Se concluyó que se pueden tener factores de mejora inversamente proporcionales al ancho medio de los perfiles de transmisión/reflexión las VBG, es decir, mientras más estrechos los perfiles la amplificación es mayor. La principal ventaja de las VBG es que se pueden diseñar con cualquier longitud de onda, permitiendo utilizar cualquier longitud de onda de láser. Sin embargo, la mejora depende de las limitadas capacidades de diseño del ancho del perfil de la VBG.

Rejillas de Bragg en fibra óptica

En 2018 Hao Lin et al. publicaron una alternativa para medir la velocidad de un objeto rotando mediante la técnica ESMI con VBG. Se realizó un arreglo experimental integrado completamente con fibras ópticas (Figura 9), incluyendo la VBG (FBG). A la técnica con fibras ópticas le denominaron FBG ESMI. Con FBG ESMI reportaron una mejora de 40 veces en la amplitud de la señal FM con respecto a AM. La demodulación de la señal FM sucede cuando coincide la longitud de onda

del láser con el borde del perfil de transmisión de la FBG. Sin embargo, la amplificación depende del ancho del perfil de la FBG, como se muestra en la Figura 8. Con una FBG con un FWHM de 30 pm (color azul) no hay amplificación, sin embargo, al utilizar una FBG con un FWHM de 15 pm se obtiene una amplificación de 40 veces.

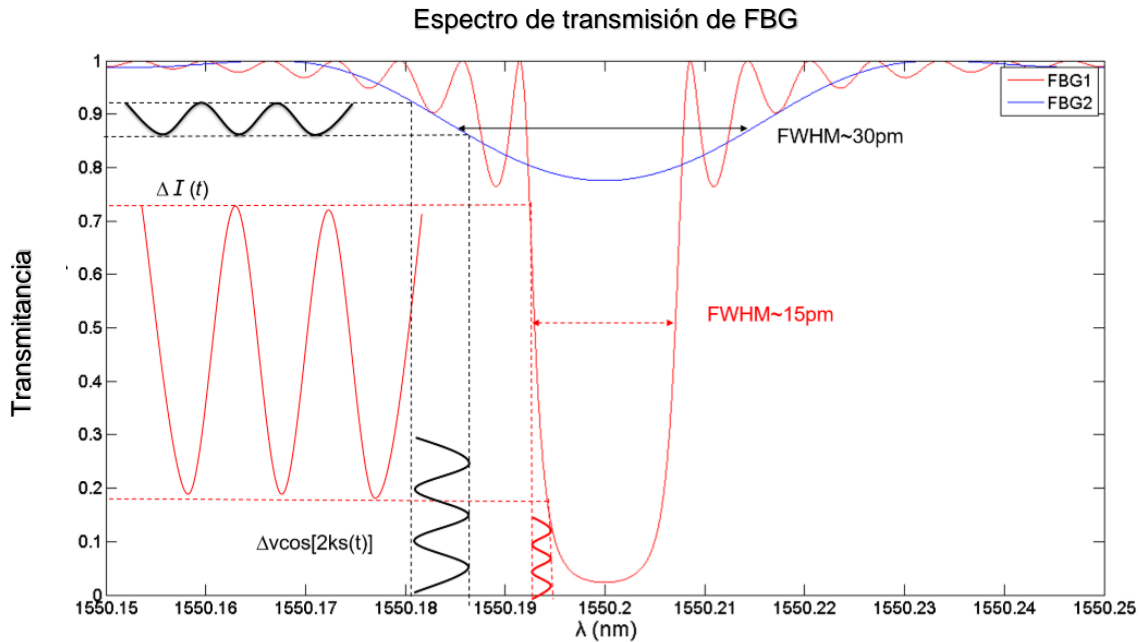


Figura 8. Perfil de transmisión y conversión FM-IM por rejilla volumétrica de Bragg en fibra óptica. [12].

En el experimento se utilizó un láser con una potencia de $P = 20$ mW y $\lambda = 1550.20$ nm, con la posibilidad de ajustar finamente λ con una resolución de 5 pm, al cambiar la temperatura o de la corriente de operación del diodo láser. Una porción del haz fue dirigida a un analizador de espectro para monitorear. Mientras el haz principal fue dirigido a un disco rotando acoplado un motor DC, controlando la velocidad del disco al variar el voltaje del motor. Otra porción del haz principal fue dirigida a la FBG, con la cual se transmite un modo longitudinal con un pico centrado $\lambda = 1550.20$ nm. Posteriormente el haz saliente de FBG fue dirigido a un fotodetector para

obtener una señal eléctrica proporcional a la potencia del haz y poder analizarlo (Figura 9).

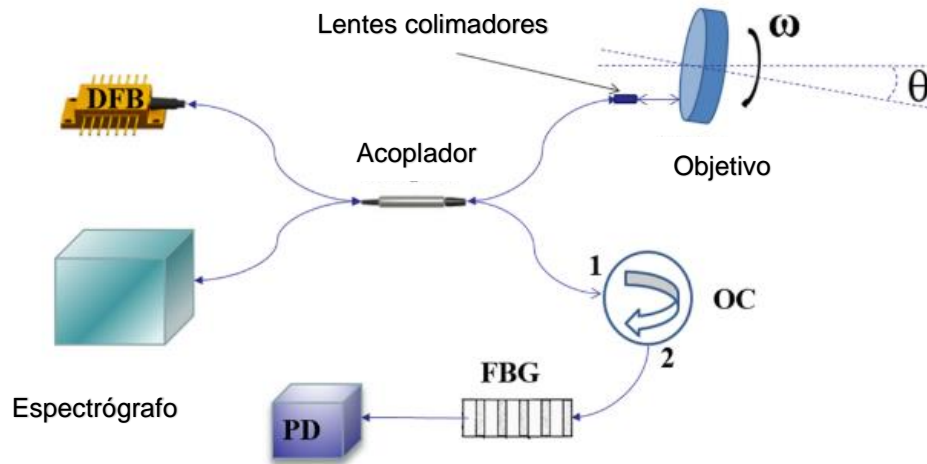


Figura 9. Arreglo experimental de FBG ESMI [12].

En la Figura 10 (b) (c) se observan señales de FBG ESMI al medir velocidades de 100 mm/s y 86 mm/s respectivamente, dichas señales contienen una mejora con respecto a la señal de la Figura 10 (a), esta señal corresponde a SMI al medir una velocidad de 100 mm/s. Por otra parte, en la Figura 11 (a) y (b) se muestra la comparación de señales SMI y FBG ESMI, respectivamente, en función de la frecuencia. Se observa un pico con amplitud máxima en 14 kHz que corresponde a 100 mm/s, mientras en la Figura 11 (c) se observa un pico con amplitud máxima en 12 kHz, el cual corresponde a 86 mm/s. De este resultado concluyeron que la amplitud de la señal SMI se mejora cuando el haz de láser es filtrado por medio de la rejilla de Bragg en fibra óptica. Adicionalmente se concluyó que FBG ESMI puede tener un amplio rango de aplicaciones en medición de velocidad en la ingeniería, gracias a la facilidad de fabricación.

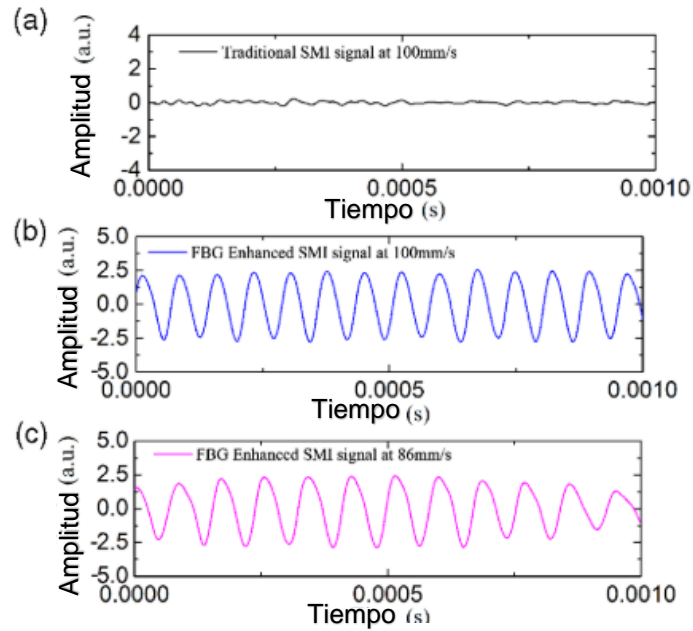


Figura 10 Comparación de señal SMI y FBG ESMI. En la imagen (a) se observa la señal SMI al medir la velocidad de un objeto a 100 mm/s, mientras (b) y (c) corresponden a mediciones de velocidades de 100 mm/s y 86 mm/s respectivamente, con FBG ESMI [12].

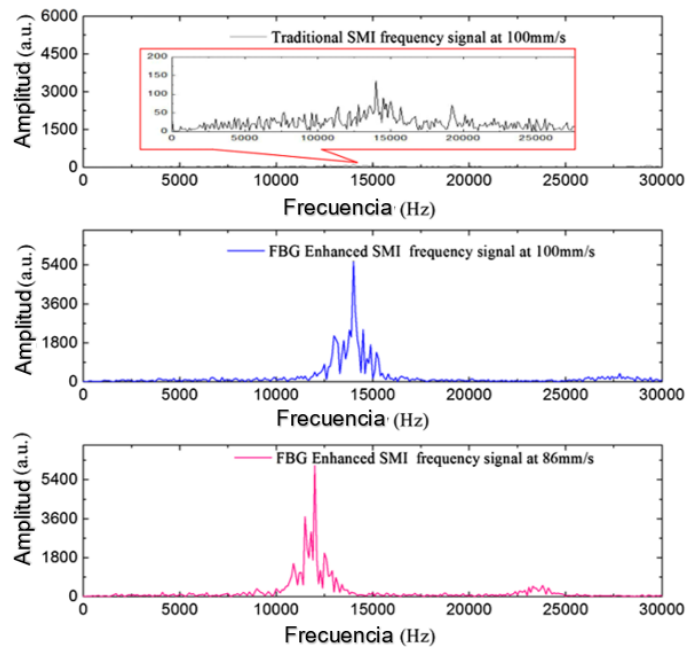


Figura 11. Comparación de señales SMI convencional y FBG ESMI, en función de la frecuencia. [12]

Métodos de interferencia (Interferómetros)

Otro método para demodular la señal FM de SMI es por medio de interferómetros. De acuerdo con la referencia [13], existen 2 posibles formas de acoplar un interferómetro a SMI como filtro óptico. Una forma es acoplar el sistema con fibras ópticas y otra es acoplarlo en aire, es decir, utilizando espejos y divisores de haz. El acople del sistema en aire se puede realizar de dos maneras:

- 1.- Acoplar el interferómetro en línea con el sistema, es decir, en la misma línea de acción del láser y utilizando el detector integrado en el encapsulado del láser (Figura 12 superior).
- 2.- Acoplar el interferómetro fuera de la línea de emisión del láser, es decir, dividir el haz y dirigirlo al interferómetro, el haz en la salida del interferómetro es dirigido a un detector externo (Figura 12 inferior).

En esta subsección se presentan los antecedentes del uso de interferómetros como método de demodulación FM de SMI, comenzando por el interferómetro de Fabry-Perot y seguido del interferómetro de Mach Zehnder.

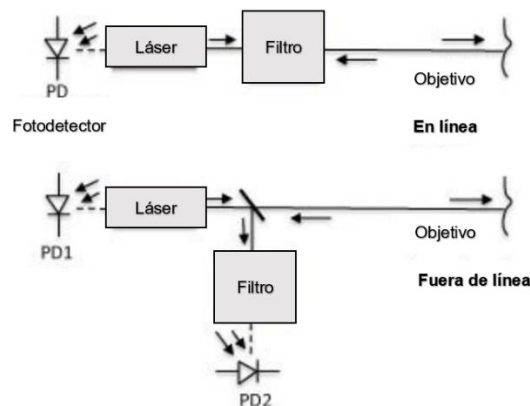


Figura 12. Configuraciones para la detección FM por interferómetros, en línea y fuera de línea respectivamente [13].

Fabry-Perot

El interferómetro Fabry-Perot, también conocido como interferómetro de haces múltiples, consta de dos superficies planas, paralelas, separadas por una distancia específica y altamente reflejantes, las cuales forman una cavidad resonante [14]. Generalmente estas superficies planas o son espejos o vidrios semi-plateados o aluminizados. Su funcionamiento se basa en introducir un haz de láser en la cavidad resonante, la cual producirá múltiples reflexiones dentro del espacio, estas reflexiones producen interferencia [14].

En 2020 Jumbao Chen et al. publicaron un método para duplicar las franjas de SMI con un interferómetro Fabry-Perot (FPI) y de esa forma aumentar la resolución de las mediciones con la técnica. El arreglo experimental de la Figura 13 se utilizó para comparar la señal SMI convencional y SMI con franjas duplicadas, el arreglo consistió en un láser (LD), un divisor de haz (BS) que divide el haz principal. El haz transmitido por BS es enviado a un espejo móvil y el haz reflejado es enviado a un fotodetector (PD2) donde se mide directamente la señal SMI convencional. El haz reflejado por el espejo móvil, se divide nuevamente por BS y el haz reflejado por BS es enviado al FPI. La señal a la salida del FPI es detectada por PD1 y posteriormente analizada electrónicamente.

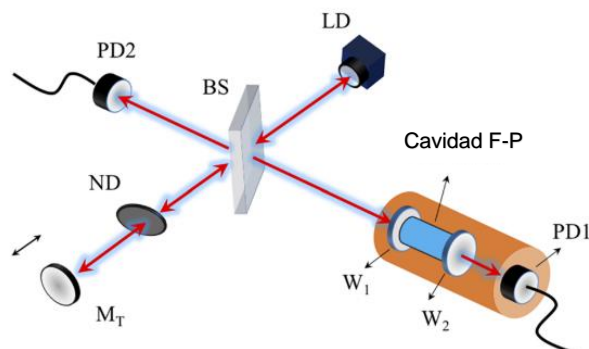


Figura 13. Arreglo experimental para la comparación de SMI convencional y SMI con doblado de franjas por FPI [15].

La señal FM es mapeada en IM por el espectro de transmisión del FPI, como se muestra en la Figura 14. Como consecuencia las franjas de interferencia de SMI se duplican debido a que el punto de operación 1 se encuentra en el mismo valor de la FM del láser.

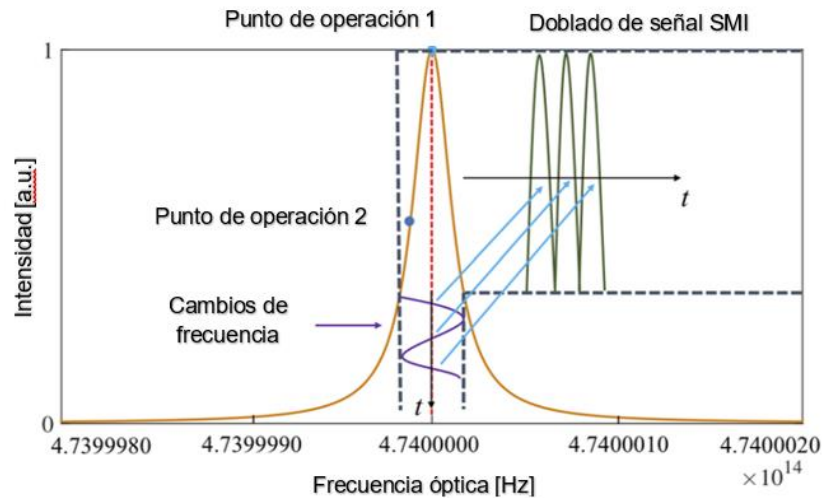


Figura 14. Mapeo de frecuencia modulada de SMI, en intensidad modulada y franjas duplicadas por medio del perfil de transmisión de FPI [15].

En la Figura 15 se muestran los resultados obtenidos de la comparación de SMI convencional y SMI con franjas duplicadas por FPI en ambas imágenes se observa una muestra de señal con respecto a un tiempo de 100 milisegundos que corresponde a una fase completa de la frecuencia de vibración de 10 Hz. En la Figura 15 (a) en media fase se observan 3 franjas, mientras que en la Figura 15 (b) se observan 6 franjas en la mitad de la fase.

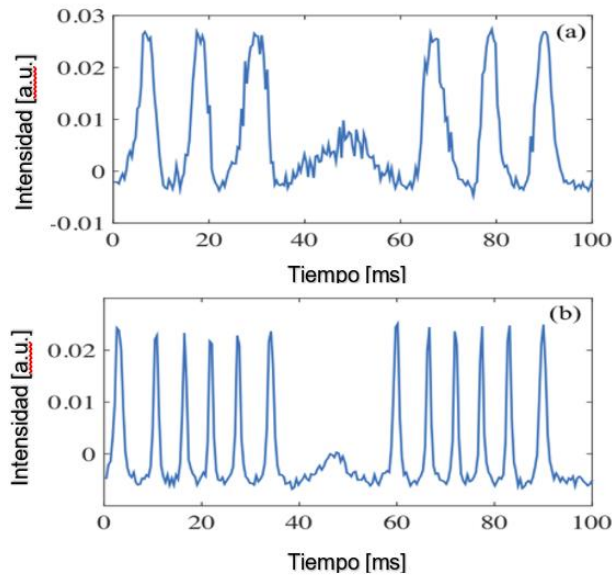


Figura 15. Comparación SMI convencional (a) y SMI con franjas duplicadas por FPI (b) [15].

Hay 3 posibles casos para el funcionamiento del FPI, ya que no existe certeza de que punto de operación este posicionado en el pico del perfil de transmisión del FPI. Un posible caso es que el punto de operación este posicionado en el borde del perfil, como el punto de operación 2 de la Figura 14, en este caso el FPI funcionaría como filtro de borde para mejorar la señal, sin duplicar las franjas.

Algunas conclusiones de este trabajo fueron: La presentación de un método para duplicar las franjas de SMI por medio del FPI utilizado como filtro óptico, con aplicación en mediciones de velocidad y desplazamiento. Como consecuencia del doblado de franjas, el sensor tendrá una resolución de $\lambda/4$ en lugar de $\lambda/2$ para medición de desplazamiento. Para mediciones de velocidad la función es $f = 4v/\lambda$.

Mach Zehnder en aire

El interferómetro de Mach Zehnder (MZI) es un dispositivo que funciona al dividir la amplitud de un haz de luz. Este dispositivo está compuesto por dos divisores de haz (generalmente 50/50) y dos espejos completamente reflejantes. Gracias a estos

componentes el haz de luz se divide en 2 haces que recorran caminos ópticos diferentes (ΔL) y posteriormente se combinan para generar interferencia. Al combinarse, si las fases de ambos haces llegan igual se dice que hay interferencia constructiva, por lo tanto, la señal de salida es igual a la señal de entrada. Por otra parte, si al combinarse los haces tienen una diferencia de fase igual a π , hay interferencia destructiva y la señal de salida es cero [16].

Es posible utilizar un MZI como técnica para demodular la señal FM (Figura 16). Las ventajas de esta técnica son: se puede utilizar con cualquier longitud de onda, es posible igualar y mejorar la amplificación de las técnicas mencionadas anteriormente y su sensibilidad es controlada al variar ΔL , si ambos espejos son colocados en un sistema mecánico de traslación.

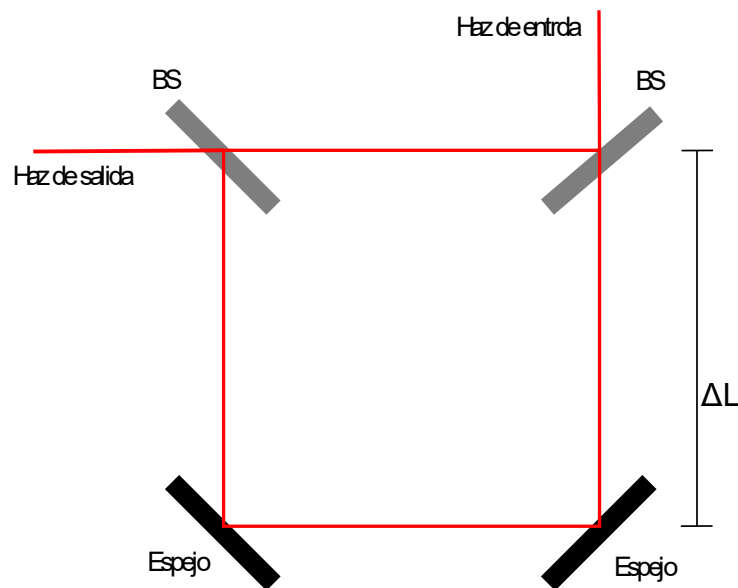


Figura 16. Interferómetro de Mach-Zehnder como filtro óptico (MZI).

La conversión FM-IM se lleva a cabo gracias a que la transmisión del MZI como filtro óptico, es una función periódica de la frecuencia [4]. La función de transmisión del MZI (T) en función de la frecuencia ν se escribe como:

$$T(\lambda, \Delta L) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi v n \Delta L}{c} \right) \right] \quad (5),$$

Donde T es la transmisión del MZI, v es la frecuencia de la fuente de luz, c es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción (en el aire $n \approx 1$). Para este trabajo n se mantiene constante, por lo tanto, no se considerará en las ecuaciones siguientes.

La periodicidad de la frecuencia (Δv_{MZI}) es:

$$\Delta v_{MZI} = \frac{c}{\Delta L} \quad (6).$$

La conversión de la señal FM (Δv_p) en amplitud (ΔP_{FM}) se obtiene con una regresión lineal:

$$\Delta P_{FM} = P_0 S \Delta v_p \quad (7),$$

donde S representa la pendiente de la función de transmisión y se determina a través de:

$$S = \frac{2\pi n \Delta L}{c} \quad (8).$$

Mach Zehnder en fibra óptica

En 2017 Norgia et al. publicaron el uso de un interferómetro Mach Zehnder como método para demodular la señal FM en SMI, además de las ventajas ya mencionadas del MZI en aire, la configuración en fibra óptica del MZI (Figura 17) tiene la ventaja de que no requiere alineación. Al igual que Mach Zehnder en aire, la función de transmisión es la misma, sin embargo, se considerará el índice de refracción de la fibra óptica, por lo tanto, se obtendrá un perfil de transmisión diferente y con pérdidas de potencia.

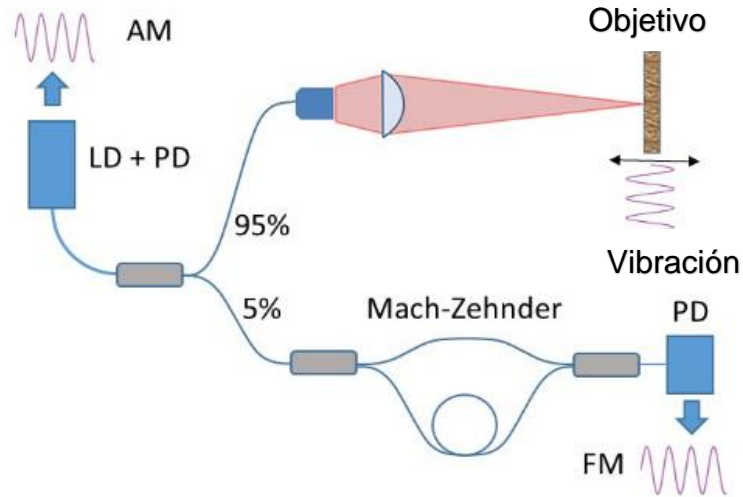


Figura 17. Arreglo experimental en fibra óptica de SMI con detección FM por medio de un interferómetro Mach Zehnder [4].

Realizaron una comparación de AM y FM midiendo la vibración de un objeto, bajo las mismas condiciones experimentales y en los resultados obtenidos se obtuvo una mejora de 70 veces a favor de la señal FM obtenida con el MZI en fibra óptica. La señal FM obtenida posee una amplitud de 1.4 Vpp, mientras que AM posee una amplitud de 20 mVpp.

Como conclusión en la referencia [4] se presentó una alternativa para la detección FM de SMI con un factor de mejora de 70. Esta técnica puede operar con cualquier longitud de onda, al igual que la técnica de demodulación por VBG, adicionalmente la posibilidad de modificar el factor de mejora.

2.3 Medición de flujos con SMI

En el 2010 Norgia et al. presentaron un instrumento de costo bajo para medir el flujo de sangre en tiempo real basado en SMI con un costo total aproximado de 50 euros. Este instrumento fue aplicado a sistemas de circulación de sangre extracorporales y hemodiálisis, para un rango del flujo de 400 mL/min. Este instrumento es una

alternativa económica a los instrumentos utilizados comúnmente en la aplicación mencionada.

En el arreglo experimental se utilizó un lente para colimar el haz y otro lente para enfocar el haz dentro del flujo de sangre, con un ángulo con respecto a la línea de emisión del láser. El esparcimiento se produjo por la sangre, principalmente por la presencia de eritrocitos, una parte del esparcimiento, regreso a la cavidad del láser donde se produjo la señal de interferencia de SMI. La señal de SMI fue obtenida con el fotodetector integrado en el encapsulado del láser. Esta señal se amplificó con un amplificador de transimpedancia con un ancho de banda igual a 1.25 MHz. Posteriormente fue adquirida con un osciloscopio capaz de calcular FFT.

En los experimentos se utilizó un conducto de 4.3 mm de diámetro conectado a una bomba, en el cual fluía solución acuosa para simular la sangre. La finalidad de este experimento fue medir la velocidad media del flujo. Como referencia la bomba utilizada produce flujo por encima de los 400 mL/min. Las mejores señales se obtuvieron al medir al centro del tubo y aproximadamente 2 mm adentro, con ángulos entre 10° y 30° con respecto a la línea de emisión del láser.

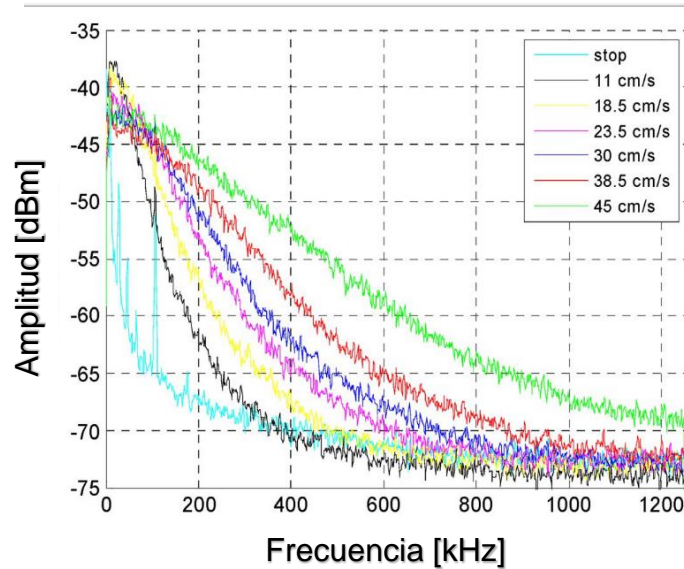


Figura 18. Resultados obtenidos al medir diferentes velocidades de flujo de sangre [17].

En la Figura 18 se observan los espectros obtenidos al medir velocidades de 0 a 45 cm/s con un ángulo de 30° . La amplitud de los espectros depende directamente del esparcimiento y del ángulo del haz con respecto al flujo. Como resultado, al modificar estos parámetros se obtuvo repetibilidad en el valor de frecuencia obtenido. También se observó que cuando el flujo está en reposo (señal de color azul en la Figura 18) hay una frecuencia a 100 kHz y se mantiene durante todas las mediciones, sin embargo, la amplitud de la señal de la velocidad es mayor por lo que se consideró como ruido.

Otro experimento fue realizar 11 mediciones con distintas velocidades para obtener una gráfica de calibración de la señal con respecto a la velocidad conocida del fluido. En la Figura 19 se graficó la calibración con desviación estándar y barras de error, de las 11 mediciones, demostrando linealidad y repetibilidad, así como el correcto funcionamiento del sensor.

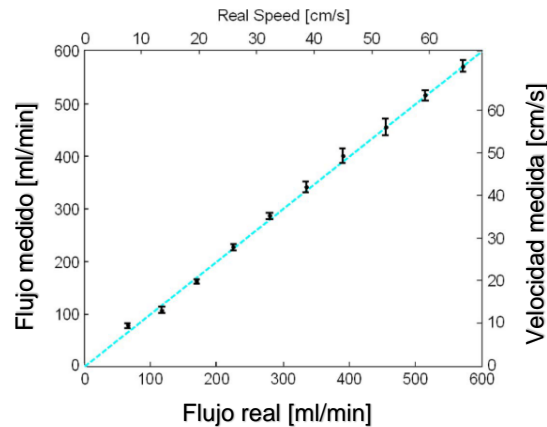


Figura 19. Gráfica de calibración de resultados obtenidos al medir con SMI vs los datos reales configurados en la bomba [17].

En 2016 Contreras et al. presentaron un arreglo experimental basado en ESMI para la medición de partículas individuales en flujo de aire. Para la demodulación de la señal FM se utilizó el método de absorción por celda de acetileno descrito en este capítulo. Las partículas utilizadas en los experimentos median desde $1\mu\text{m}$ hasta $10\mu\text{m}$, estas partículas fueron detectadas en distancias de 2.5 m, sin embargo, las partículas de $10\mu\text{m}$ se lograron detectar hasta en una distancia de 10m. La distancia de detección también está limitada por la densidad de partículas. La detección de partículas implica un mayor reto que la medición de sólidos, ya que al medir partículas se involucra esparcimiento Mie en lugar de reflexión.

En el arreglo experimental mostrado en la Figura 20, se utilizó un láser de retroalimentación distribuida (DFB) con una potencia $P_0= 330\text{ mW}$. La longitud de onda de este láser puede ser configurada con resoluciones por debajo de picómetros, en este experimento se ajustó a 1532 nm ajustando la temperatura y la corriente de alimentación. En este arreglo experimental, el haz principal fue dirigido a una ventana de borde como divisor de haz (BS). El haz transmitido por BS fue enfocado en la sección de prueba por un sistema telescópico de lentes. El haz reflejado por BS es enviado a la celda de acetileno para la demodulación FM y después es enviado al fotodetector (DET) por medio de fibra óptica. La señal fue

adquirida con un osciloscopio utilizando un tiempo de muestreo de 10 s y un ancho de banda de 12.5 MHz, este ancho de banda permite un análisis espectral de hasta 6.25 MHz, el cual corresponde a una velocidad máxima de 4.6 m/s. Finalmente la señal fue procesada, el primer paso fue dividir el archivo obtenido con el osciloscopio en 61036 bloques de 163 μ s, a cada bloque se le aplicó la FFT. Como la señal no es constante se discriminaron los bloques que estaban por debajo de 5 veces la señal de ruido y los bloques con señal se promediaron para obtener una FFT con un valor de frecuencia promedio.

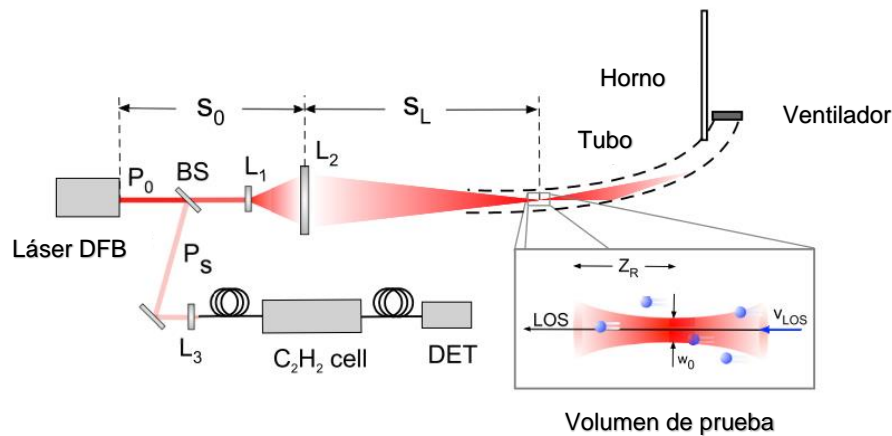


Figura 20. Arreglo experimental para la medición de partículas en flujo de aire [18].

Como primer resultado se demostró la detección de una partícula, para esta demostración se monitoreó la distribución del tamaño y densidad de las partículas en el flujo de aire con un medidor de partículas modelo 3321 de TSI (APS). Aseguraron la detección de partículas y el valor de la densidad con el APS, antes y después de las mediciones, al inyectar 5 muestras de cada tamaño. La densidad de partículas se ajustó en 5 partículas por cm^3 para aumentar la probabilidad de detectar una partícula. En la Figura 21 (a) se muestran las amplitudes de las señales obtenidas con respecto a los tamaños de las partículas. Se realizaron mediciones con partículas de 1 μ m, 1.5 μ m y 2 μ m, con las cuales la amplitud de la señal apenas sobrepasaba la amplitud del ruido y con partículas 3 μ m y 10 μ m presentaron

mayores amplitudes en la señal. Una señal temporal compuesta por 35 bloques consecutivos que sumaban un total de aproximadamente 6 milisegundos, como se observa en la Figura 21 (b), demuestra que es suficiente un bloque para detectar una partícula, conocer su velocidad y demostrar que en realidad se está midiendo una sola partícula.

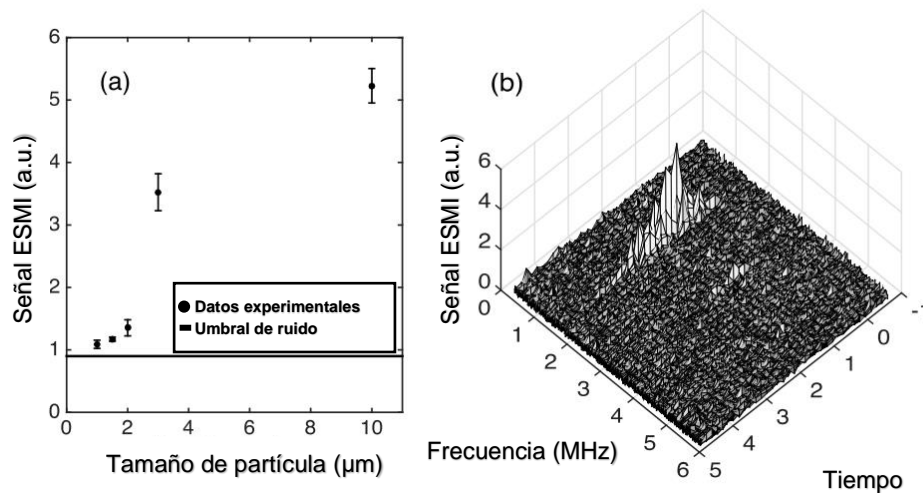


Figura 21. a) Representación de la amplitud de la señal con respecto al tamaño de partículas y b) representa la FFT de los 35 bloques demostrando la medición de una partícula en un solo bloque [18].

Otro resultado fue demostrar la dependencia de la amplitud de la señal con respecto a la distancia de medición. Para demostrar esta dependencia se midieron eventos de una partícula en distancias de 2.5 m, 4 m, 6 m y 10 m y se compararon las amplitudes de las señales de dichos eventos. En la Figura 22 se observa que la amplitud de la señal decrece cuadráticamente al aumentar la distancia de medición. En este resultado se concluye que se pueden realizar mediciones a distancias de hasta 10 m con partículas de 10 μm de diámetro con el arreglo experimental descrito.

Figura 22. Amplitud de la señal con respecto a la distancia de medición [18].

En este capítulo se presentó el marco teórico, así como las variantes de SMI para detección de señal FM y sus aplicaciones en medición de fluidos. Con SMI convencional se presentaron mediciones de fluidos líquidos, con aplicación en biomedicina, de hasta 0.45 m/s [17]. Las variantes reportadas para la detección de señal FM de SMI son por medio de: celda de C_2H_2 , VBG, FBG, MZI en fibra óptica y FPI. En la Tabla 1 se describen las características principales de las variantes con detección FM de SMI descritas en este capítulo.

Tabla 1. Técnicas para detección de señal FM en SMI.

Técnicas de detección de señal FM en SMI	$P_{\text{láser}}$ (mW)	$\lambda_{\text{láser}}$ (nm)	Factor de amplificación (FA)	Aplicaciones reportadas
Celda de C_2H_2	330	1532	10^2	Velocidad de aire Velocidad de sólidos [3]
VBG	20	405	10^1	Velocidad de sólidos [2]
FBG	20	1550.20	10^1	Velocidad de sólidos [12]
FPI	10	635	10^0	Aumentar resolución [15]
MZI (Fibra óptica)	20	1550	70	Vibraciones [4]

De las variantes mostradas en la Tabla 1, la que presenta mayor amplificación de señal es la que utiliza la celda de C_2H_2 [7], con un FA de 2 órdenes de magnitud de la señal FM con respecto a la señal AM. El MZI en fibra óptica presenta FA de 70 debido a que no es posible modificar su ΔL , sin embargo, es posible igualar y



superar el **FA** de 2 órdenes de magnitud al utilizar un MZI con componentes en aire. También es importante señalar que solamente con la variante que utiliza la C_2H_2 se publicaron mediciones de velocidad de aire, por lo que tomamos como referencia su **FA** para igualarlo con el **FA** del MZI del sensor lidar de este trabajo.

3 Metodología experimental

Este capítulo describe la metodología para la implementación del arreglo experimental del sensor LIDAR, el procesamiento de señal y la obtención de resultados. Así mismo, el capítulo presenta el procedimiento seguido para la construcción de un túnel de viento impreso en 3D. Dicho túnel es necesario para realizar mediciones de velocidad de aire de flujos laminares bajo condiciones controladas. También se presenta la metodología para la obtención de la señal AM en el mismo arreglo experimental, con el propósito de comparar con la señal FM bajo las mismas condiciones.

3.1 Arreglo experimental

En esta sección se describe el arreglo experimental empleado para medir velocidad de aire. Adicionalmente, el arreglo se empleó para comparar la señal de los canales AM y FM. Dicho arreglo se integró con éxito en el Laboratorio de Óptica Aplicada del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM

(<https://www.fis.unam.mx/laboratorios/42/laboratorio-de-optica-aplicada>).

En la Figura 24 se muestra la integración del arreglo experimental sobre una placa de pruebas ópticas [19]. En dicha placa se instalaron los elementos ópticos utilizando componentes de sujeción opto-mecánicos. Las características y modelos de los componentes de sujeción, montura y elementos ópticos se muestran en el apéndice. A continuación, se describe el proceso de integración.

Primero conectamos el diodo láser en la montura (LDM9T, Thorlabs) que, además de fijar al láser permite controlar la corriente suministrada por medio de un controlador externo (LDC205C, Thorlabs) y la temperatura gracias a su enfriador termoeléctrico integrado. La parte frontal de la montura permite fijar una lente para colimar o enfocar el haz emitido. Una vez montado el láser y el lente colimador, colocamos una ventana de borde en la placa de pruebas como divisor de haz, con

la finalidad de evitar acoplamiento de la reflexión fantasma en el MZI. La ventana de borde tiene dos caras con un ángulo de 0.5° , como consecuencia, el haz que se transmite en la segunda cara tendrá una desviación del mismo ángulo. Para contrarrestar la desviación provocada por la ventana de borde, colocamos la montura LDM con un ángulo de 0.5° con respecto al patrón de orificios de la placa de pruebas como se muestra en la Figura 23. Este ajuste permite utilizar el patrón de orificios como guía en la alineación del haz transmitido por la ventana de borde y todos los elementos posteriores del arreglo experimental.

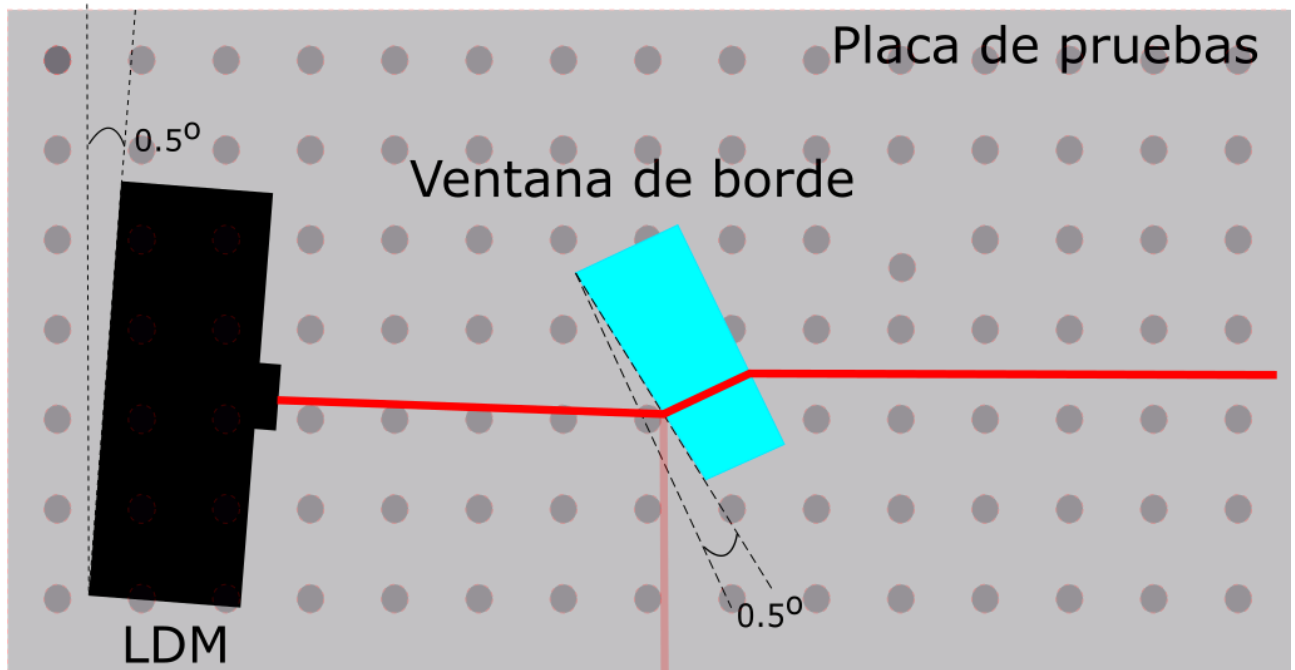


Figura 23. Alineación de láser y ventana de borde. Al colocar LDM con un ángulo de 5° , el haz de salida de la ventana de borde es paralelo a la placa de pruebas.

Posteriormente integramos y alineamos los elementos del interferómetro BS1, M1, M2, BS2 y el detector (DET) respectivamente. El divisor de haz BS2 se monta en una placa traslacional (PT1, Thorlabs) para alinear con precisión micrométrica su posición debido a que en este elemento interfieren ambos brazos del MZI. Los

espejos M1 y M2 se montan conjuntamente en otra placa traslacional (PT1, Thorlabs) para variar la longitud de uno de los brazos del interferómetro MZI, sin desalinearse o desajustar el sistema. Posteriormente integramos el sistema telescópico de enfoque construido con las lentes L1 y L2. L2 se monta en una placa traslacional con la finalidad de modificar la distancia focal según sea requerida.

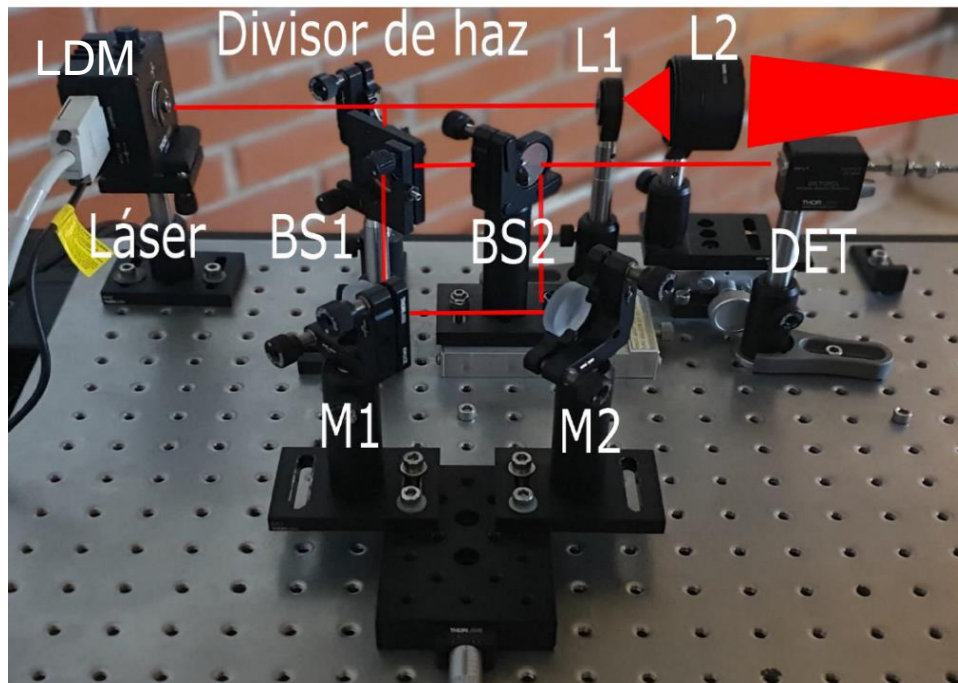


Figura 24. Fotografía de arreglo experimental ESMI-MZI.

3.1.1 Obtención de señal AM

Generalmente la señal AM se obtiene al monitorear la potencia del láser por medio de un fotodiodo integrado en el encapsulado del láser (Figura 25). Otro método para obtener la señal AM es dividir el haz emitido y dirigir una parte del haz a un fotodetector externo como se muestra en la Figura 26. Con la finalidad de comparar las amplitudes de los canales AM y FM bajo las mismas condiciones medimos la señal utilizamos el método del fotodetector externo. Esto se logra con el mismo

arreglo experimental al obstruir uno de los brazos del MZI, como se describe con más detalles en la sección de resultados.

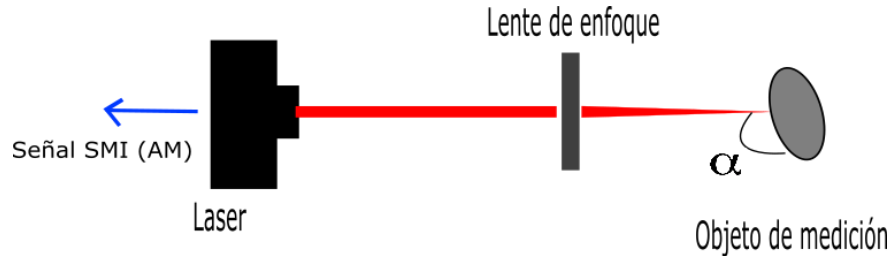


Figura 25. Señal SMI proveniente de un objeto en movimiento, obtenida por un fotodiodo integrado en el encapsulado del láser.

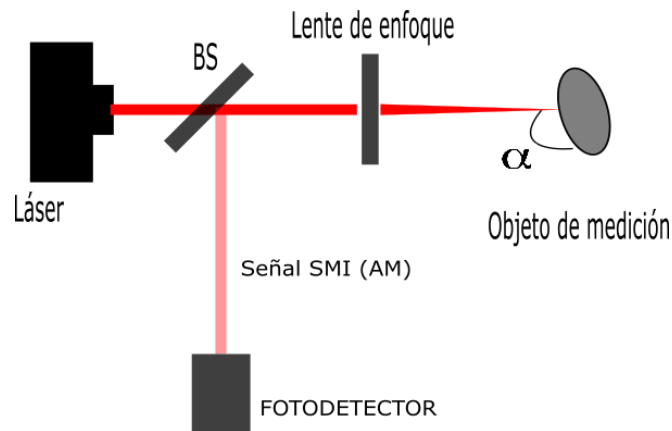


Figura 26. Obtención de señal AM por un fotodetector externo dividiendo el haz con un divisor de haz (BS).

3.1.2 Obtención de señal FM

La demodulación de la señal FM se obtiene al dividir el haz en la salida del láser con una ventana de borde, del cual la fracción reflejada (4%) se dirige al interferómetro de Mach-Zehnder (MZI) que consta de dos divisores de haz (Transmisión/reflexión: 50/50) y dos espejos [16]. Dentro del MZI, el haz transmitido por BS1 recorre el camino óptico marcado con flechas verdes al reflejarse en los espejos M1 y M2, y posteriormente por el divisor BS2, donde se mezcla con el haz reflejado por BS1 (flechas azules). En BS2 se obtienen dos haces, sin embargo, en la Figura 27 solo se representa uno debido a que el otro haz no tiene relevancia en

este trabajo. Uno de los haces obtenidos en BS2 es enviado a un fotodetector. En este arreglo experimental se incluye un sistema telescópico de dos lentes (L1 y L2) para enfocar el haz transmitido por la ventana de borde (96% de la potencia total) en diferentes distancias para los experimentos que se presentan en la sección de resultados.

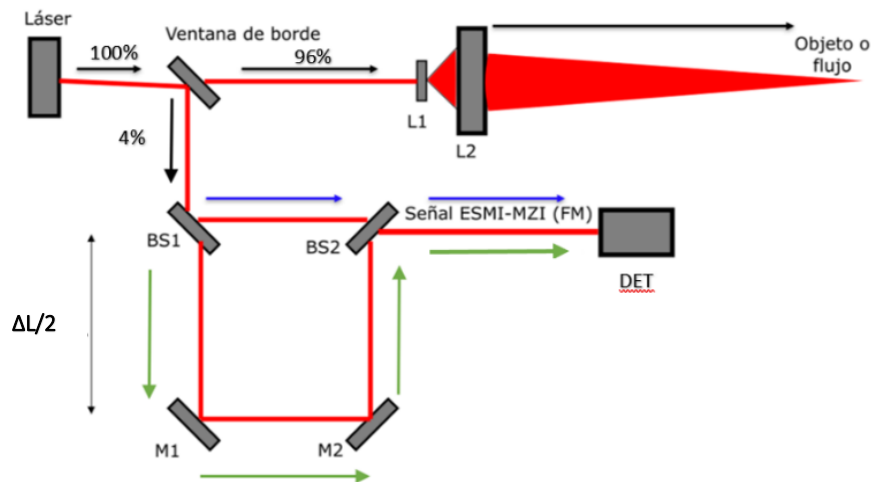


Figura 27. Diagrama de arreglo experimental ESMI-MZI.

3.1.3 Factor de amplificación de MZI con otras técnicas.

Para determinar la sensibilidad de la señal FM demodulada por el MZI necesaria para medir velocidad de aire, se tomará como referencia la amplificación de la señal FM obtenida del perfil de absorción de la referencia [7], que se utilizó en otra investigación para medir velocidad de aire. La amplificación de la señal depende directamente de la pendiente en la mitad del valor máximo del perfil de absorción o transmisión de acuerdo con la técnica empleada, mientras mayor sea la pendiente mayor será la amplificación, por consecuencia al reducir el ancho medio (FWHM) la amplificación es mayor.

Ajustamos el FWHM del MZI ($FWHM_{MZI}$) al FWHM del perfil de absorción utilizado en la referencia [7], denominado de aquí en adelante como $FWHM_{cell}$. El $FWHM_{cell}$

es de aproximadamente 7 pm mientras que el $FWHM_{MZI}$ es posible variarlo al modificar el rango de espectro libre (FSR) del interferómetro. El FSR es la distancia entre dos máximos del perfil de transmisión del MZI y depende directamente de la longitud de onda de la fuente de luz y la diferencia de caminos ópticos (ΔL) del MZI. El FSR se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{\Delta L} \quad (9).$$

El $FWHM_{MZI}$ es aproximadamente la mitad del FSR, por lo tanto:

$$FWHM = \frac{\lambda^2}{2\Delta L} \quad (10).$$

Para determinar la relación (F) de $FWHM_{cell}$ con $FWHM_{MZI}$ en función de ΔL se obtiene:

$$F = \frac{FWHM_{MZI}}{FWHM_{cell}} \quad (11),$$

sustituyendo la ecuación 10 en la 11:

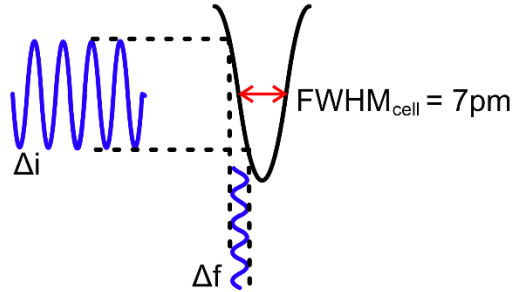
$$F = \frac{\lambda^2}{2\Delta L FWHM_{cell}} \quad (12),$$

al despejar ΔL :

$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{2 F FWHM_{cell}} \quad (13).$$

Fijamos el factor $F=1$ para empatar el rango espectral del MZI con el $FWHM_{cell}$ con que se logró medir velocidad de aire en la referencia [7]. Con estas condiciones se obtiene $\Delta L = 160$ mm. La condición $FWHM_{cell} = FWHM_{MZI}$ se representa esquemáticamente en la Figura 28.

Perfil de absorción celda de acetileno



Perfil de transmisión MZI

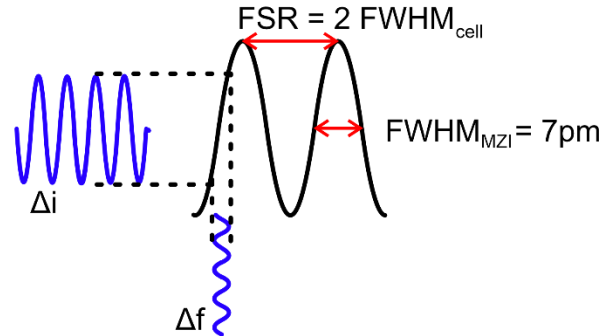


Figura 28. Al igualar los FWHM del perfil de transmisión del MZI (imagen de la derecha) con el de la celda de acetileno [7] (imagen de la izquierda), ambos perfiles tienen la misma amplificación, es decir, producen la misma relación de cambios de intensidad (Δi) con respecto a cambios de frecuencia (Δf).

También es posible relacionar $FWHM_{MZI}$ con los perfiles de otras técnicas cambiando $FWHM_{cell}$ por el FWHM del perfil deseado.

3.2 Diseño y construcción de túnel de viento

Para medir velocidad de aire con el arreglo experimental se construyó un túnel de viento de tipo circuito abierto y aspirado. Dicho túnel está basado en la referencia [20]. Las partes principales del túnel de viento son:

- Toma de aire: las tomas de aire en túneles de viento toman aire del exterior y lo introducen en el túnel y al mismo tiempo aceleran el flujo de aire a una velocidad deseada gracias a la ley de conservación de la energía $Q_1 = Q_2$.
- Sección de prueba: La sección de prueba es una parte del túnel con área de sección transversal constante donde se realizan los experimentos o mediciones.
- Difusor: La función del difusor es regresar el aire al exterior con una presión similar a la ambiental.

Dichos componentes se muestran en la Figura 29 donde la sección de color rojo representa la toma de aire, la de color amarillo es la sección de pruebas y la de color azul es el difusor.

El procedimiento descrito en la referencia [20] menciona que para diseñar un túnel de viento primero es necesario conocer la longitud. La longitud del difusor depende de 2 variables: el diámetro de la sección de prueba y la relación con del área del difusor (AR). El valor típico de AR es de 3 con un ángulo de 3°.

$$AR = \frac{A_4}{A_3} = 3,$$

donde A3 es el área de la sección de pruebas, definida por el diseñador y A4 es el área del difusor. En este paso es posible calcular la longitud del difusor L conociendo las distancias R3 y R4 mostradas en la Figura 30 al despejarla de la tangente del ángulo de $\theta = 3^\circ$.

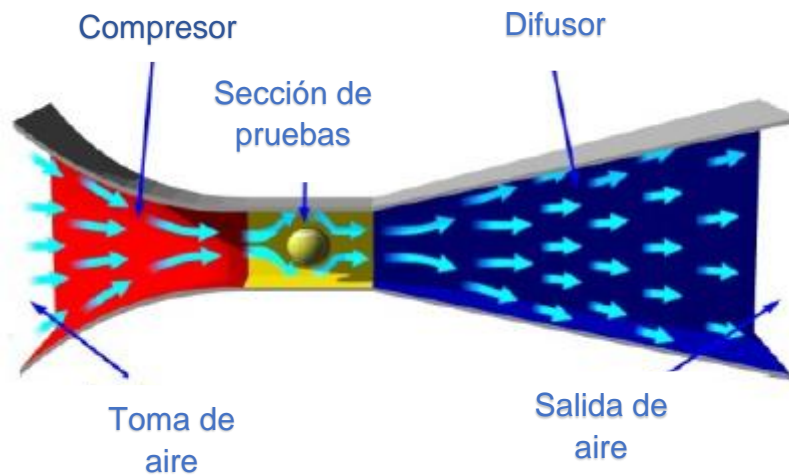


Figura 29. Componentes principales de un túnel de viento [20].

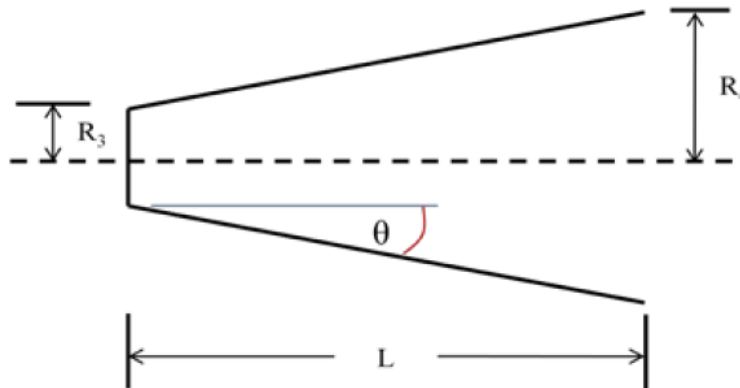


Figura 30. Cálculo de longitud del difusor [20].

La relación de área con la toma de aire también es establecida por el diseñador tomando valores entre 7 y 12, en este caso se utilizará 7,

$$CR = 7 = \frac{A_2}{A_3},$$

donde A_2 es el área del difusor.

En este trabajo utilizamos un ventilador de PC con las siguientes características: dimensiones de 60 mm x 60 mm, flujo es de $Q \approx 24.71$ cfm y voltaje máximo de 12 V. Debido a que primero seleccionamos el ventilador, se realizó inversamente procedimiento de la referencia [20].

Para tener más probabilidades de producir flujo laminar, de acuerdo con bases empíricas, decidimos construir el túnel con secciones circulares. Primero calculamos A_3 a partir de $A_4 = 2827$ mm², obteniendo $A_3 = 942$ mm². Al ser de sección circular el diámetro de la sección de pruebas es aproximadamente $d_3 = 30$ mm, conociendo estos valores obtuvimos el valor de L :

$$tg(3) = \frac{60-30}{L}, \text{ por lo tanto, } L = 286.2.$$

Para la toma de aire utilizamos una relación de área de 7 obteniendo $A_2 = 6600 \text{ mm}^2$, lo que resulta en un diámetro de 91.6 mm. De acuerdo con la referencia [20] el diseñador también propone la longitud de la toma de aire, en este caso decidimos una longitud de 100 mm.

El diseño terminado se muestra en la Figura 31. En la sección de prueba decidimos incorporar dos ventanas para colocar portaobjetos de microscopio, con la finalidad de asegurar que es completamente plana para no deformar el haz de láser. Se eligieron ventanas de vidrio porque es un material transparente a longitud de onda del láser utilizado. También acoplamos un enderezador de flujo con espesor de 20 mm y perforaciones de 2.5 mm. En total el túnel tiene una distancia de 100 mm.

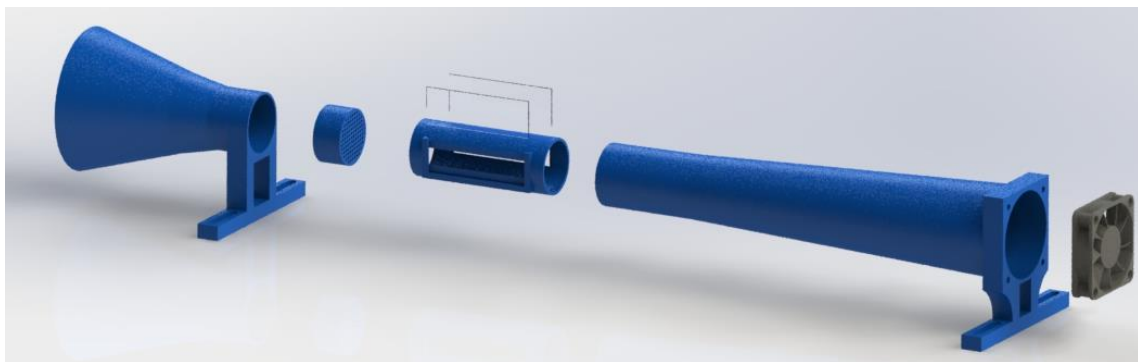


Figura 31 Túnel de viento diseñado para la medición de velocidad de aire con SMI basado en MZI.

Imprimimos el túnel de viento en material ABS como se muestra en la Figura 32. El túnel se fija a componentes opto mecánicos que permiten fijarlo a distintas alturas y acoplarlo a una placa de pruebas ópticas. Esta placa de pruebas es independiente a la del arreglo experimental, lo que permite colocar el túnel a las distancias requeridas.

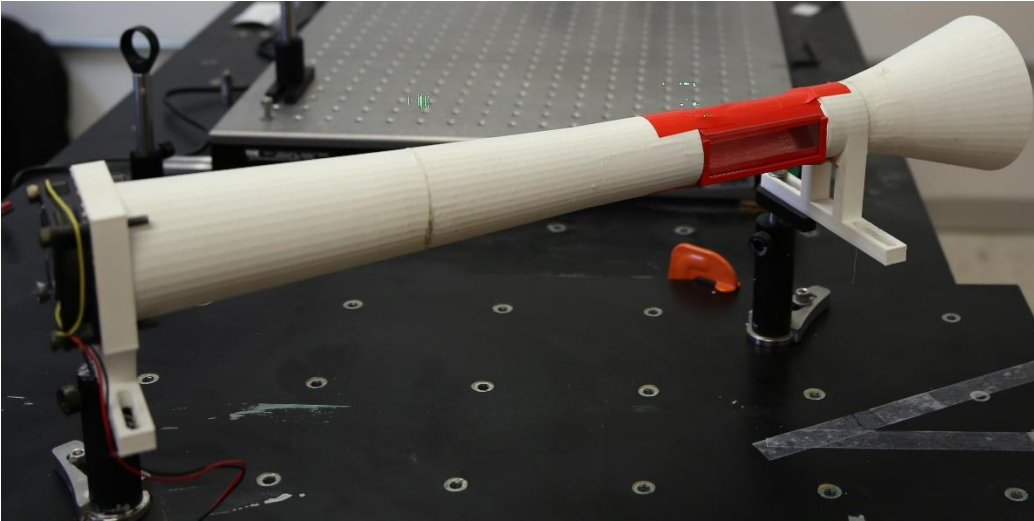


Figura 32. Túnel de viento impreso en 3D con material ABS y elevado con postes para objetos de óptica.

Para conocer la velocidad ideal máxima esperada en la sección de pruebas utilizamos la ecuación de continuidad:

$$Q_2 = Q_3 = Q_4 = 24.71 \text{ CFM} = 0.01166 \frac{\text{m}^3}{\text{s}},$$

por lo tanto,

$$U_2 A_2 = U_3 A_3 = U_4 A_4 = 0.01166 \frac{\text{m}^3}{\text{s}},$$

donde U_2 , U_3 y U_4 son las velocidades en la toma de aire, la sección de pruebas y el difusor, respectivamente. Al despejar U_3 obtuvimos un valor de velocidad máxima:

$$U_3 = \frac{0.01166 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.000942 \text{ m}^2} = 12.37 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Consideramos que la velocidad ideal máxima del túnel de viento U_3 es suficiente para los experimentos que realizamos, ya que el principal objetivo es medir velocidad de aire. Por otra parte, U_3 sobrepasa el valor máximo de velocidad que decidimos adquirir de acuerdo con la siguiente sección.

3.3 Procesamiento de señal

El método de procesamiento de señal se representa esquemáticamente en la Figura 33 y tiene la finalidad de obtener un valor numérico de velocidad proporcional a la señal obtenida por el fotodetector. La velocidad máxima que se puede procesar está limitada por el muestreo de adquisición de la señal, por ejemplo, para el muestreo que utilizamos habitualmente en los experimentos de 10 MHz/s, la frecuencia máxima que podemos obtener de la señal es de 5 MHz, por lo tanto, la velocidad máxima correspondiente a este valor es de 3.875 m/s.

Para extraer información de velocidad del corrimiento de la frecuencia de la luz del láser, es necesario procesar digitalmente la señal amplitud-tiempo adquirida con el osciloscopio. La señal de 100 milisegundos a una tasa de muestreo de 10 MHz se procesa con el software Matlab al dividirla en bloques de 0.1 milisegundos. Aplicamos la transformada rápida de Fourier (FFT) a cada bloque. Después realizamos el promedio de todos los bloques para obtener la velocidad media durante el tiempo de adquisición de datos y aumentar la señal a ruido, en una cantidad proporcional a la raíz cuadrada del número de bloques. La relación señal a ruido (SNR) es proporcional a la sensibilidad de la metodología, debido a que la amplitud del corrimiento de frecuencia se mantiene en la misma escala para cada bloque, mientras que el ruido aleatorio disminuye con el promedio de bloques [9].

Una vez obtenida la señal promediada la sustituimos en la ecuación de efecto Doppler descrita anteriormente, y de esta forma obtenemos los valores de velocidad promedio correspondientes.

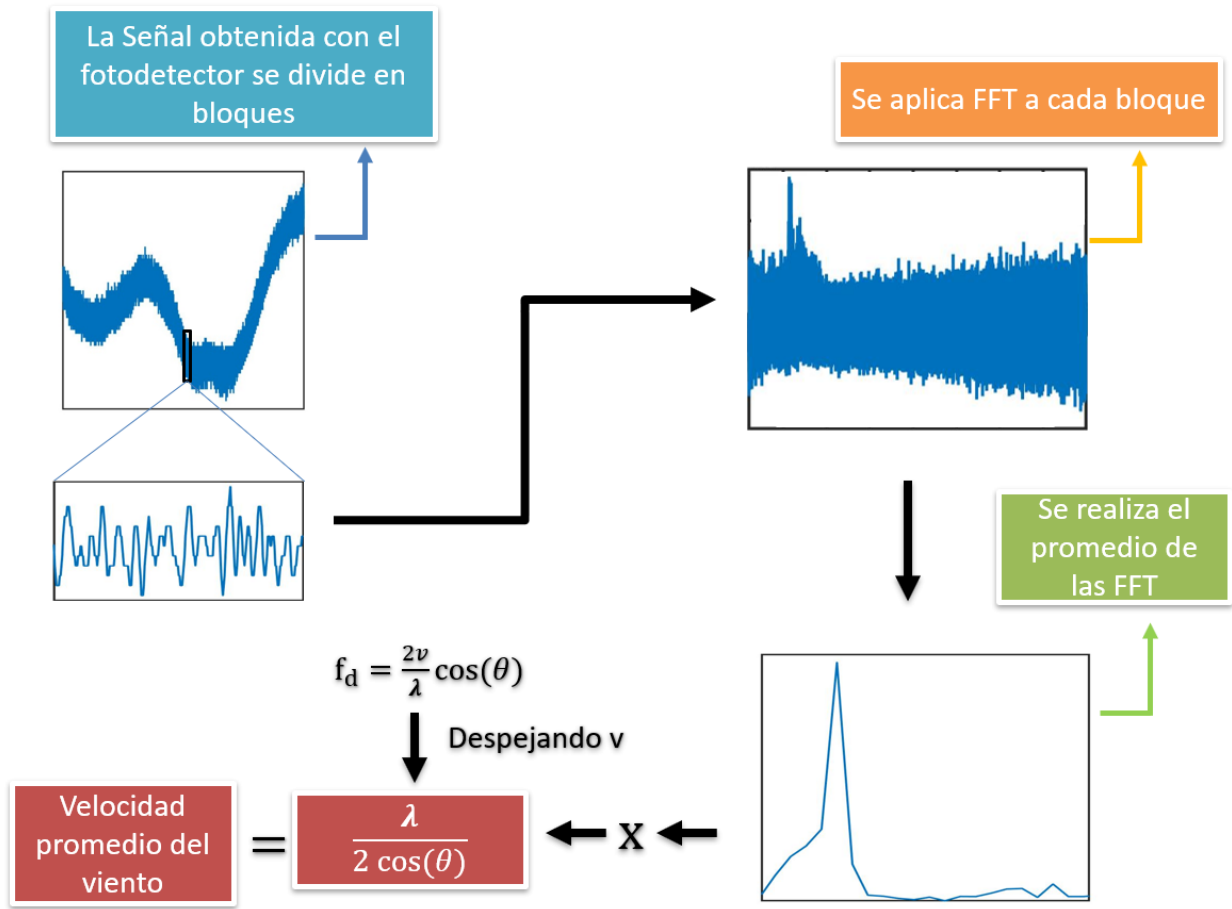


Figura 33. Método de procesamiento de la señal obtenida por el fotodetector.

4 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados y discusión de los experimentos realizados con el sensor Lidar. La primera sección de este capítulo muestra los resultados obtenidos de la comparación de ESMI-MZI contra la técnica SMI convencional. La segunda sección presenta los resultados de la validación de las mediciones de velocidad del sensor Lidar, donde se comparó la velocidad entregada con el sensor contra la velocidad configurada de un chopper óptico. La tercera sección muestra los resultados de 4 experimentos realizados para obtener las mediciones de velocidad de aire en el túnel.

4.1 Comparación señal ESMI-MZI contra SMI convencional

Se compararon las señales FM y AM para validar que la amplitud de la señal del canal FM, demodulada con el MZI, es superior a la señal del canal AM. Para esta comparación se fijaron los parámetros experimentales que permiten obtener una mejora de dos órdenes de magnitud respecto al canal AM como se describe en la sección 2.1. Los resultados se obtuvieron al comparar los canales AM y FM del interferómetro bajo las mismas condiciones experimentales, midiendo la velocidad de un chopper óptico (Figura 5) a 0.6 m desde L2, como se muestra en la Figura 34, posteriormente se ajustó la distancia focal del telescopio dirigiendo el haz hacia el extremo superior del disco del chopper (Figura 37).

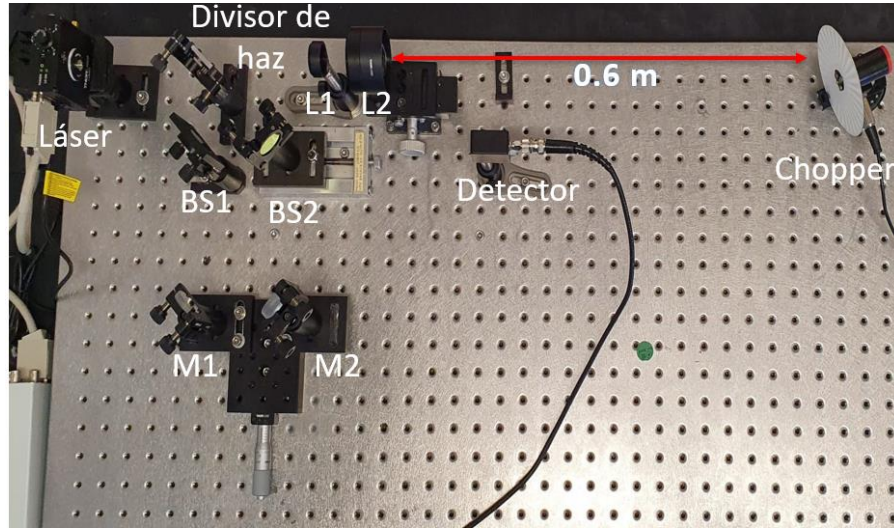


Figura 34. Experimento para comparación de señal SMI (AM) y ESMI-MZI (FM).

Para detectar la señal AM se dirigió solo el haz de uno de los brazos del MZI al detector, se obstruyó el haz del otro brazo como se muestra en la Figura 35 y posteriormente ajustando la corriente del láser a 75.15 mA debido a que era la corriente mínima con la cual se observó la señal de velocidad con el osciloscopio. Como consecuencia de bloquear el haz de luz de uno de los brazos de MZI se obtiene el 50% de la potencia recibida por el fotodetector.

Para medir las señales AM y FM en este experimento, se cubrió con papel bond blanco la superficie del disco del chopper con el objetivo de aumentar la reflexión difusa proveniente del chopper en movimiento. En estas mediciones la velocidad se mantuvo constante para obtener la señal en una frecuencia específica. Por otra parte, esta medición preliminar fue de provecho para conocer el valor de Δf_D que se encontró en aproximadamente 0.23 MHz, conociendo este valor establecimos los parámetros de adquisición de señal, específicamente para este experimento.

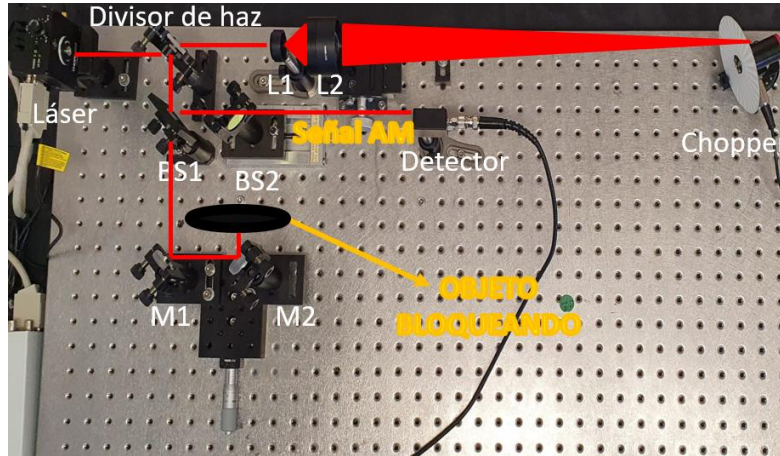


Figura 35. Obtención de señal AM al bloquear el haz proveniente de uno de los brazos del MZI.

Posteriormente realizamos la adquisición de señal AM tomando una de referencia con el motor del chopper óptico apagado y posteriormente una señal con el motor encendido. Este proceso se repitió análogamente para la señal FM, sin embargo, no fue posible ajustar la corriente en la mitad de utilizada para obtener AM, por lo cual, se ajustó la corriente en 30 mA, este valor de corriente se determinó debido a que, si se superaba este valor la señal obtenida en el osciloscopio se saturaba. Para el espectro de la señal FM se observaron armónicos de hasta 1.2 MHz. Durante la visualización de la señal AM se observó una amplitud apenas sobresaliente del ruido y con base en experiencia se empleó un tiempo de adquisición de 100 milisegundos y el muestreo más aproximado en las opciones del osciloscopio fue de 10×10^6 Muestras/s.

Finalmente, se obtuvieron los resultados (Figura 36) de la comparación de las señales AM y FM obtenidos mediante el software Matlab donde se dividieron las señales temporales de 100 milisegundos en bloques de 0.1 milisegundos y se aplicó FFT a cada bloque, posteriormente se obtuvo el promedio de estos bloques y se restó la señal de referencia.

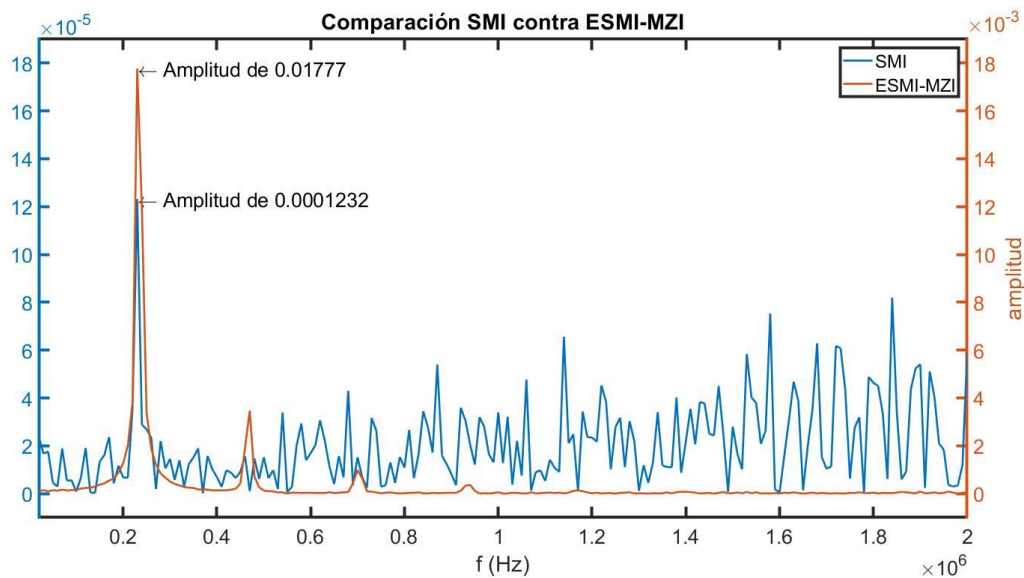


Figura 36. Comparación de señal SMI (AM) vs ESMI-MZI (FM).

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la señal FM posee una mejora en amplitud y SNR con respecto a la señal AM, esto permite tener mayores rangos de medición [13]. Este experimento demostró que con la técnica de detección de señal SMI-FM por medio un interferómetro de Mach Zehnder con componentes en aire es posible mejorar en amplitud y SNR con respecto a SMI-AM. Otro aspecto importante a resaltar en este experimento es la relación de amplificación, calculado en el capítulo anterior, de la técnica de detección FM por MZI y la técnica de la referencia [3] ya que en este resultado se observa un factor de mejora de 144 en la señal FM con respecto a la señal AM.

4.2 Validación de mediciones de velocidad con el chopper óptico

Se verificaron las mediciones de velocidad con el sensor lidar, por medio de una comparación de la velocidad entregada por el chopper óptico y la velocidad medida con el sensor lidar. Es importante mencionar que el controlador del chopper entrega en un display un valor denominado frecuencia de modulación (FM), que es la frecuencia con la que se obstruye el paso de la luz a través del disco. Para este

experimento se seleccionó un disco con 30 ranuras y se colocó como se muestra en la Figura 34 a 0.6 m de distancia desde L2 y con un ángulo de 30° con respecto a la línea de emisión del láser. Se enfocó el haz de láser en el borde superior del disco, como se muestra en la Figura 37, el cual tiene una superficie lisa lo cual evita detectar señales resultantes de la rugosidad que podrían confundirse con la señal de velocidad. Se dirigió el haz en la parte superior del disco por simplicidad para realizar el cálculo de la componente de velocidad en el mismo eje de acción del láser.

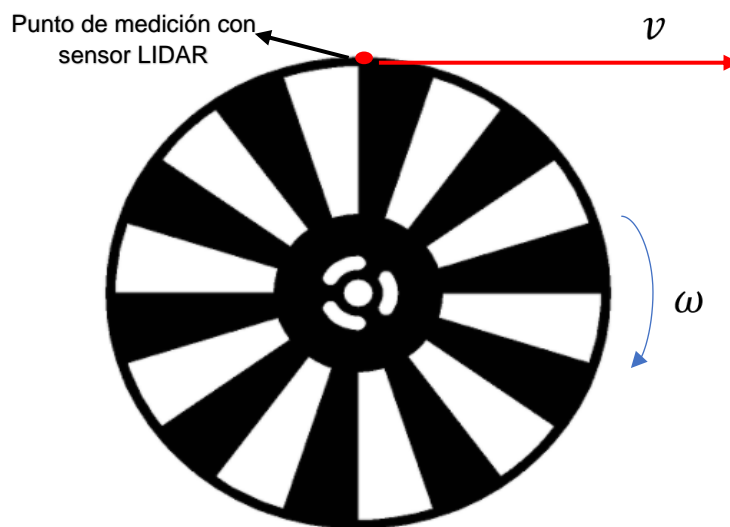


Figura 37. Disco de chopper óptico, se muestra la dirección de giro y la dirección de la velocidad normal en la misma línea de acción del láser.

Posteriormente se adquirieron señales guardando una señal de referencia con el motor apagado y después una con el motor encendido. La primer medición comenzó con la primer frecuencia de funcionamiento del chopper la cual fue de 30 Hz y las siguientes cada 10 Hz hasta llegar a 100 Hz. Las señales obtenidas se analizaron con el software Matlab siguiendo el procedimiento de procesamiento de señal mencionado anteriormente. Después se calculó la velocidad normal en el punto medido del disco con el siguiente procedimiento:

- Se obtuvo la velocidad angular en función de la frecuencia de modulación:

$$\omega = \frac{2\pi(f_m)}{n_{ranuras}},$$

donde:

ω = velocidad angular,

$f_{chopper}$ = frecuencia del chopper,

$n_{ranuras}$ = número de ranuras del disco (30).

- Se obtuvo la velocidad normal en el borde del disco:

$$v = \omega r,$$

donde:

v = velocidad normal

r = radio del disco = 51 mm.

Se graficó, en la Figura 38, los valores obtenidos de velocidad del chopper contra la velocidad obtenida por el LIDAR y se dibujó una línea a 45° ya que idealmente los valores obtenidos en esta comparación deberían ser coincidentes con la misma. A los valores de velocidad se agregaron barras de error en la velocidad del chopper, de acuerdo con el fabricante la variación de frecuencia es de +/- 0.1%, sin embargo, no se notan a simple vista debido a que su tamaño era similar al punto que indica los valores de velocidad en ambos sistemas.

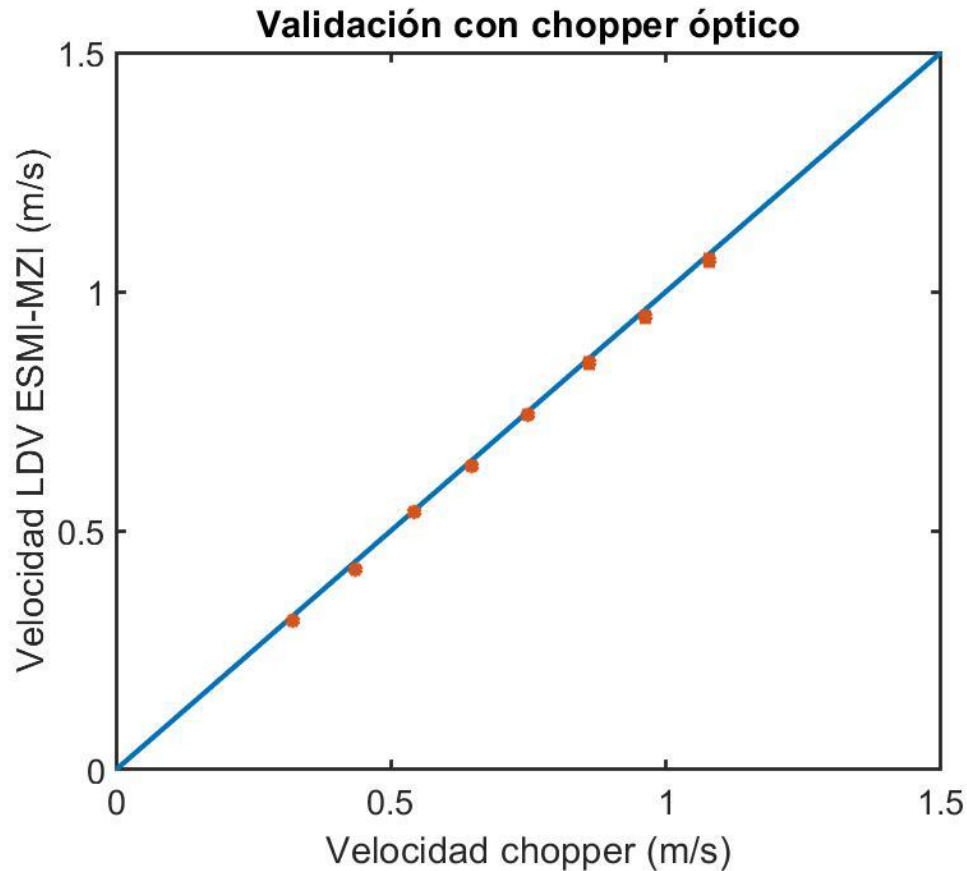


Figura 38. Comparación de velocidad proporcionada por el chopper óptico y velocidad medida con ESMI-MZI.

La Figura 48 sugiere que el sensor lidar es capaz de determinar velocidades de manera precisa, ya que se obtiene una línea recta de 45° , lo que implica que los valores determinados son iguales a los calculados con el chopper de referencia. Además, los resultados graficados sugieren que el sensor tiene un alto grado de exactitud de medición ya que las barras de error que representan la desviación estándar tienen una amplitud de 0.02 m/s. Sin embargo, es importante mencionar que pudo haber imprecisiones en la validación. Por ejemplo, si el punto de medición es un punto del borde del disco donde la dirección de la velocidad normal del disco no es paralela a la línea de acción del láser.

4.3 Medición de velocidad de aire

Posterior a la validación del lidar, se realizaron mediciones de velocidad de aire en el túnel de viento descrito en el capítulo anterior. Se realizaron 3 experimentos independientes. Para el primer experimento se midieron velocidades en el túnel de viento en función del voltaje aplicado al ventilador. El segundo experimento se realizó para determinar el rango de medición del lidar al variar la distancia de enfoque del sistema telescópico y enfocar dentro del mismo túnel de viento mencionado al variar su posición. Se realizó un tercer experimento para analizar la amplitud de la señal con respecto al caudal de partículas de agua en el túnel de viento. Los resultados obtenidos en estos experimentos se discuten a continuación.

4.3.1 Determinar rango de velocidades de trabajo del túnel de viento

Para determinar el rango de amplitudes de velocidad de trabajo a una distancia media, se colocó el túnel de viento a una distancia de 1.1 m medida desde el último lente del arreglo experimental, L2, El túnel se alineó a un ángulo de 33° con respecto a la línea de acción del láser y se enfocó el haz en el centro de la sección de pruebas, como se muestra en la Figura 39. El ventilador del túnel de viento se conectó a una fuente de voltaje variable.

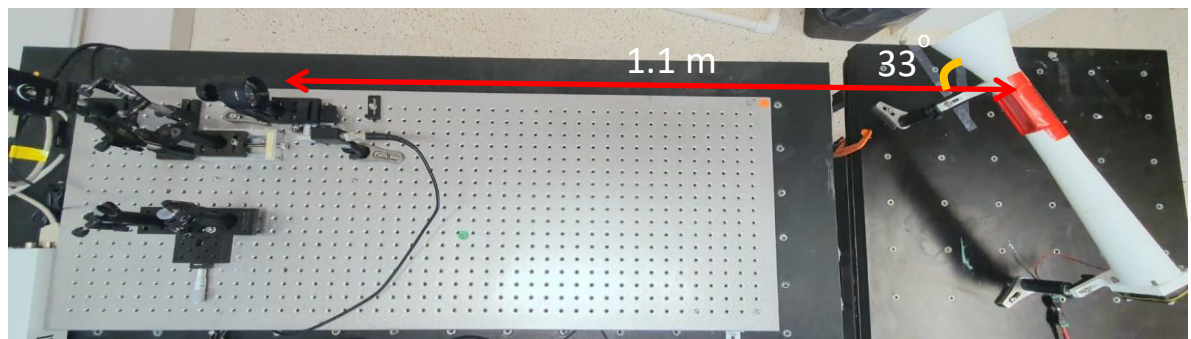


Figura 39. Experimento para medición de velocidad de aire en túnel.

Para producir esparcimiento de luz y generar señal de interferencia se inyectaron partículas de agua al túnel por medio de un humidificador ultrasónico marca Vitallys

modelo VUH-5, como se muestra en la Figura 40. El humidificador tiene la capacidad de modificar la cantidad de partículas producidas, pero no contiene especificaciones de la cantidad de partículas o el flujo, por esta razón se realizó una estimación del caudal con respecto al nivel de la perilla utilizado para los experimentos. Para dicha estimación se cargaron 500 mL de agua en el tanque y se puso en operación durante 1 hora, posteriormente se midió la cantidad de agua en el depósito para estimar la cantidad eyectada del humidificador y el flujo, dando como resultado un caudal de 1.25 mL/min. Suponiendo que el humidificador produce neblina, de acuerdo con la clasificación de tamaño de gotas de The American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), las partículas de neblina tienen un diámetro de hasta 25 μm . Suponiendo que todas las partículas tienen diámetro de 25 μm su volumen es 8.18×10^{-9} mL, por lo tanto, la densidad de partículas es de aproximadamente $257.201 \times 10^6 \frac{\text{partículas}}{\text{seg}}$.

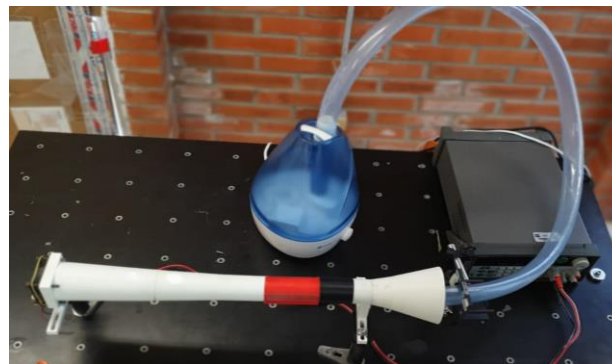


Figura 40. Inyección de partículas de agua en túnel de viento por medio de humidificador ultrasónico

Se adquirió una señal de referencia con el humidificador apagado y las señales con el humidificador encendido variando el voltaje del ventilador del túnel de 3 V hasta 6.5 V con intervalos de 0.5 V. Se tomaron 3 mediciones de para cada voltaje con un muestreo de 100 Ms/s durante un tiempo de 10 milisegundos. La tasa de muestreo permite medir frecuencias máximas de 5 MHz que corresponden a la detección de velocidades máximas de 3.875 m/s. La señal se divide en bloques de 1000 puntos,

que equivalen a una resolución de 5 KHz. Para el análisis de velocidades se sustrajo la señal de referencia a la señal con partículas para eliminar frecuencias que no corresponden al flujo de partículas de la neblina. La Figura 41 muestra las gráficas de distribución de velocidades de los experimentos descritos en esta sección. El eje y representa la probabilidad de distribución de velocidad (unidades arbitrarias) y el eje horizontal representa el rango de velocidad de aire de 0 a 3 m/s. De dichas gráficas se observa que, para voltajes bajos de operación del ventilador, la distribución de velocidades es angosta y el máximo se encuentra desplazado al límite de velocidades mayores. Por ejemplo, para 3 V, el máximo de la distribución corresponde con el límite inferior en aproximadamente 0.5 m/s. Conforme se aumenta la velocidad del aire dentro del túnel al aumentar el voltaje de su ventilador, la distribución de velocidades se ensancha, y se recorre a velocidades mayores. A partir de velocidades promedio mayores a 1 m/s se observa más de un máximo en las distribuciones de velocidad.

El ensanchamiento de la distribución lo asociamos a la presencia de más de una velocidad de partículas o que las partículas fluyen con diferentes direcciones dentro del túnel, por lo que la componente vectorial de la velocidad paralela a la dirección de propagación del láser estará variando. Con respecto a la amplitud de la señal, se observa que existe una velocidad con mayor amplitud por lo que se puede denominar velocidad principal ya que al fluir más partículas en una misma dirección y con una misma velocidad, el promedio del esparcimiento producido por estas partículas será mayor que el esparcimiento producido por partículas que fluyen en otras direcciones o con diferentes velocidades.

A partir de velocidades promedio mayores a 1.5 m/s la señal decrece a niveles de ruido. Para detectar velocidades mayores, se debe aumentar el esparcimiento de luz en el volumen de prueba, por ejemplo, se puede aumentar la potencia del láser,

y/o aumentar el número o el tamaño de partículas, o reducir el ángulo entre el eje de simetría del túnel y el eje de propagación del láser.

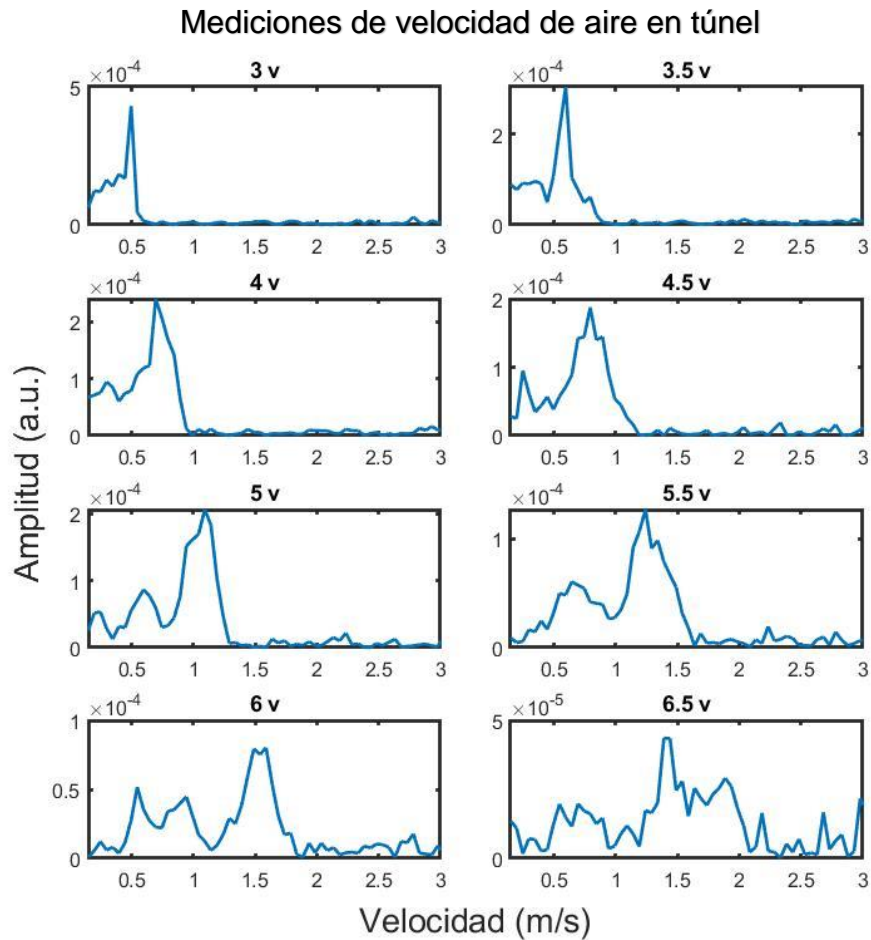


Figura 41. Señales de velocidad del túnel de viento medidas con el sensor LIDAR.

Este experimento demuestra la posibilidad de medir velocidad de aire bajo las condiciones experimentales descritas, utilizando el sensor LIDAR implementado en este trabajo. Es importante resaltar que no se encontró alguna publicación

disponible donde se utilice un diodo láser de baja potencia (20 mW) para medir velocidad de aire.

4.3.2 Determinación de distancias de medición.

Para conocer las distancias y velocidades de medición en el túnel de viento, con las condiciones experimentales utilizadas en este trabajo, se colocó túnel de viento en las distancias seleccionadas aleatoriamente de: 60 cm, 130 cm y 230 cm. El sistema telescópico se ajustó para enfocar al láser en estas distancias. Posteriormente se inyectaron partículas y se adquirieron señales con voltajes de alimentación del ventilador del túnel de viento desde 3 V hasta 6.5 V con un intervalo de 0.5 V tomando una señal de referencia (sin partículas) en cada medición. Después se procesaron las señales con el software Matlab restando las señales de referencia a las señales con partículas. Se tomó como velocidad principal la mayor amplitud en las señales y se determinó la incertidumbre de la amplitud, calculando la desviación estándar de 3 mediciones para cada voltaje.

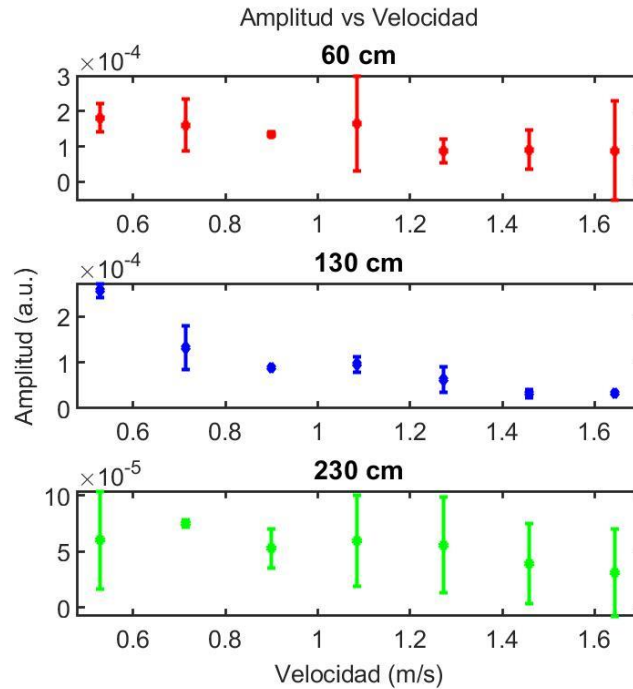


Figura 42. Gráficas de amplitud contra velocidad para determina el rango de medición en distancia y velocidad

En la Figura 42 se muestran 3 gráficas correspondientes a las distancias de medición de 60 cm, 130 cm y 230 cm respectivamente, en cada gráfica se observa un comportamiento hacia una menor amplitud cuando la velocidad aumenta. En estas gráficas los puntos representan la velocidad y las barras de error representan su desviación estándar.

Se logró detectar velocidades de aire a una distancia de hasta 230 cm desde L2. Para distancias mayores no fue posible la detección debido posiblemente a que la longitud de coherencia del láser utilizado se encuentra cerca de los 2 m. A la distancia de 2.3 m se logró medir velocidades de partículas de agua de hasta 1.65 m/s, este límite se puede relacionar con la cantidad de partículas por unidad de tiempo (Figura 43) el cual disminuye al aumentar la velocidad de aire, por lo tanto, el esparcimiento producido por las partículas en esta velocidad no es suficiente para detectar señal. Los parámetros que pueden contribuir a aumentar la sensibilidad del

dispositivo presentado en este trabajo son el factor de amplificación del MZI, reducir el ancho espectral del láser (parámetro inversamente proporcional a la longitud de coherencia) y utilizar un diodo láser de mayor potencia de emisión para aumentar la cantidad de luz retro-reflejada a la cavidad.

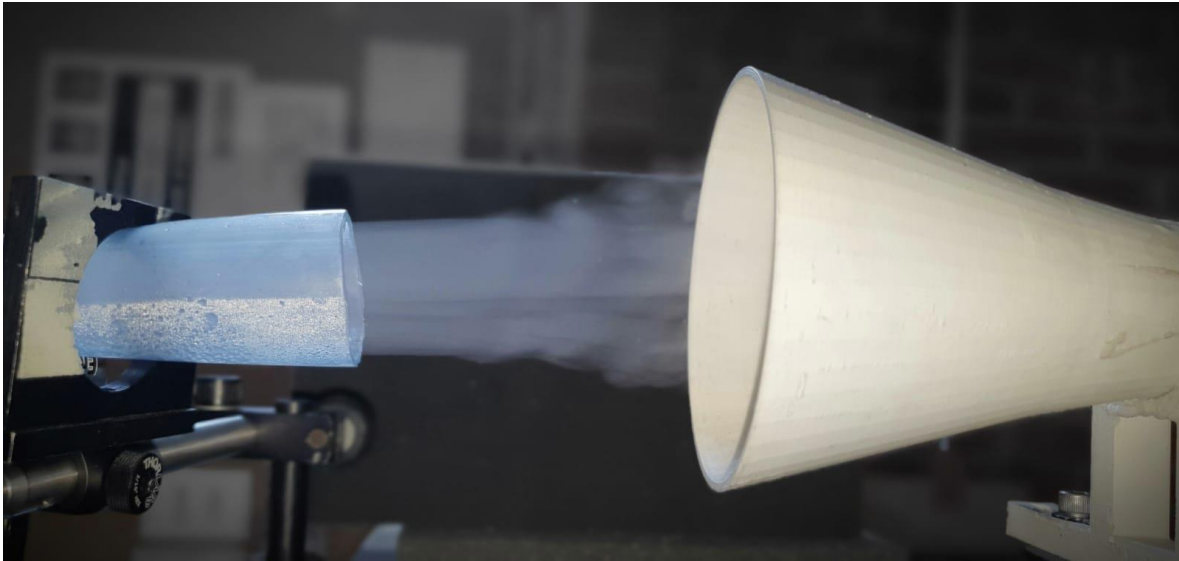


Figura 43. Inyección de partículas de agua en el túnel de viento.

Los límites de velocidad reales de este sensor LIDAR aun no son explorados, es por esta razón que en futuros trabajos se sugiere realizar experimentos con diferentes condiciones como túneles de viento de mayores dimensiones o en el exterior. El siguiente paso para poder realizar los experimentos mencionados puede ser crear un armazón que proteja los componentes del sensor para poder transportarlo. También se recomienda utilizar un láser con un ancho espectral menor al utilizado en este trabajo para tener estabilidad en la amplitud de las señales, posiblemente aumentar el factor de amplificación con el MZI y como consecuencia poder realizar comparaciones con otros sistemas lidar.

4.3.3 Amplitud de la señal vs caudal de vapor

Con la finalidad de demostrar que la amplitud de la señal está relacionada con la cantidad de partículas, se realizaron mediciones en el túnel de viento colocándolo a 0.6 m desde L2 con un ángulo de 33° y el ventilador se hizo funcionar con un voltaje constante de 3.5 V. Se inyectaron diferentes cantidades de partículas en el túnel de viento tomando como referencia los niveles impresos alrededor de la perilla del humidificador y se relacionaron con el caudal calculado anteriormente. Se realizó la adquisición de señales tomando una señal de referencia y una con partículas iniciando con un caudal de 1 mL/min hasta 3 mL/min con un intervalo de 0.4 mL/min. Se procesaron las señales con el software Matlab, restando la señal de referencia a las señales con partículas y se agregaron barras de incertidumbre de la amplitud donde se utilizó el valor calculado en el experimento anterior con las mismas condiciones de voltaje y distancia. La gráfica obtenida se observa en la Figura 44.

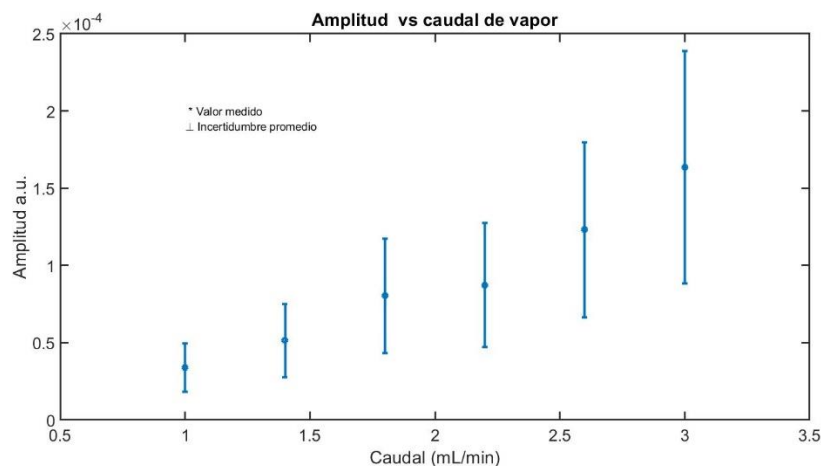


Figura 44. Gráfica de caudal vs amplitud de señal.

Se demostró que la amplitud de la señal está relacionada directamente con la cantidad de partículas inyectadas debido a la presencia de un mayor número de partículas esparciendo luz en el volumen de prueba en la misma unidad de tiempo. Con el valor de los caudales utilizados es posible calcular valores de humedad

absoluta en la sección de pruebas obteniendo $4.94 \frac{kg}{m^3}$ para $1 \frac{mL}{min}$ y $14.84 \frac{kg}{m^3}$ para $3 \frac{mL}{min}$, comparados con valores de humedad absoluta en el ambiente los cuales se encuentran entre $0.1 \frac{kg}{m^3}$ a $0.2 \frac{kg}{m^3}$ con $25^{\circ} C$ y presión atmosférica de 1 bar. Además de partículas de agua, en la atmósfera existen otras partículas como polvo, polen y otros tipos de materia orgánica con lo cual sería suficiente para obtener señal de velocidad al medir directamente en el ambiente.

5 Conclusiones

Se logró implementar una alternativa de un sistema Doppler lidar basado en la técnica SMI con demodulación de la señal FM con un MZI integrado por componentes en aire. También se realizó exitosamente la comparación de la señal FM amplificada con la señal AM. Se determinaron las distancias de operación del lidar y se logró medir velocidad de aire. Además, con el sistema lidar Doppler de este trabajo se concluyó que, de acuerdo con el estado del arte revisado y los resultados obtenidos, es la primera vez que se mide velocidad de aire utilizando un diodo láser de una potencia máxima de 25 mW. Se logró medir en una distancia máxima de 230 cm con las condiciones experimentales del laboratorio inyectando partículas de agua en el túnel de viento con una densidad de aproximadamente $257.201 \times 10^6 \frac{\text{partículas}}{\text{seg}}$.

6 Trabajo futuro

Es posible mejorar las señales mostradas en la sección de resultados al aumentar el valor de ΔL del MZI, pero es necesario utilizar un diodo láser con un ancho de línea más estrecho al utilizado en este trabajo ya que esto permitiría aumentar el FSR del MZI sin afectar la demodulación de la señal FM. Por otra parte, el sensor lidar de este trabajo se puede implementar para medir velocidad del aire en el exterior, para esto es necesario agregar una fase a la etapa de procesamiento de señal para discriminar bloques de medición que no tengan señal de velocidad de aire y de esta forma solamente promediar los bloques con señal, ya que en el exterior el flujo de partículas es aleatorio y la señal depende de estas. Para uso externo del laboratorio se recomienda utilizar una tarjeta de adquisición de datos y un HMI o una laptop para reemplazar el uso del osciloscopio ya que es un equipo delicado.

Apéndice (Lista de equipo)

#	Cantidad	Nombre	Marca	Modelo	Descripción	Link	Visualización
1	1	Diodo láser	Wavespectrum®	WSLD-1550-020m-1-PD	P = 20 mW $\lambda = 1550$ nm Top = -40 °C ~ 30 °C Empaquetado tipo TO18	http://www.wavespectrum-laser.com/product/productInfo_102.html	
2	1	Montura para diodo láser	Thorlabs®	LDM9T	Montura para láser con controlador de temperatura integrado Corriente máxima de 200 Ma Temperaturas de operación entre 10 y 30 °C	https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5583&pn=LDM9T#5583	
3	1	Adaptador para lente colimador	Thorlabs®	S1TM09	Adaptador para el lente colimador a la montura del láser SM1 a M9 x 0.5	https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1749&pn=S1TM09#5071	
4	1	Lente colimador	Thorlabs®	C230TMD-C	El lente esférico para colimar se obtuvo de acuerdo con el cálculo de la distancia focal para obtener un haz colimado con un diámetro aproximado de 3 mm Distancia focal de 4.5 mm Longitudes de onda de operación entre 1050 y 1700 nm	https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=C230TMD-C	
5	1	Lentes de enfoque	Thorlabs®	LSC01	Rangos de operación entre 350 nm y 2000 nm Distancias focales desde 15 mm hasta 2500 mm	https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=688	
6	1	Ventana de borde	-	-	Utilizada como divisor de haz, permite obtener 2 haces de aproximadamente el 4 % de la potencia total	-	

7	2	Divisores de haz	Thorlabs®	BSW12	Divisor de haz 50:50 Diámetro: 1in Longitudes de onda de 1200 nm a 1600 nm	https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=139&pn=BB1-E04	
8	2	Espejos	Thorlabs®	BB1-E04	Espejo con diámetro de 1in Longitudes de onda de operación de 1280 nm a 1600 nm	https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=139&pn=BB1-E04#2147	
9	1	Fotodetector	Thorlabs®	DET08CL	Material InGaAs	https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DET08CL#ad-image-0	
10	1	Osciloscopio	Teledyne	3000z	Osciloscopio digital	https://teledyneleeroy.com/oscilloscope/oscilloscopemodel.aspx?modelid=11006	
11	1	Controlador de corriente	Thorlabs®	LDC205C	Controlador de corriente de hasta 500 mA	https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LDC205C	
12	1	Humidificador	Vitalys®	VUH-5	Humidificador ultrasónico	https://www.sanborns.com.mx/producto/19528/humidificador-ultrasonico-5l-vuh-5-vitalys-plus/	

Bibliografía

- [1] G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati, and T. Bosch, "Laser diode self-mixing technique for sensing applications," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 4, no. 6, 2002.
- [2] V. Contreras, J. Toivonen, and H. Martinez, "Enhanced self-mixing interferometry based on volume Bragg gratings and laser diodes emitting at 405-nm wavelengths," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 11, p. 2221, 2017.
- [3] V. Contreras, J. Lonqvist, and J. Toivonen, "Edge filter enhanced self-mixing interferometry," *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 12, p. 2814, 2015.
- [4] M. Norgia, S. Member, D. Melchionni, S. Donati, and L. Fellow, "Exploiting the FM-signal in a laser-diode SMI by means of a Mach-Zehnder filter," no. 2, pp. 0–3, 2017.
- [5] M. Bennett, "Doppler lidar for boundary-layer measurements: must it be expensive?," *12th Int. Sch. Quantum Electron. Laser Phys. Appl.*, vol. 5226, no. 0, p. 249, 2003.
- [6] R. Bakhshi and P. Sandborn, "Optimizing the Use of LIDAR in Wind Farms: Minimizing Life-Cycle Cost Impact of Yaw Error," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1452, no. 1, 2020.
- [7] V. Contreras, J. Lonqvist, and J. Toivonen, "Single micro-particle scattering detection based on edge filter enhanced self-mixing interferometry," *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, vol. 417, no. 2011, p. 33101, 2014.
- [8] D. and J. B. D. Ralph O., "Lidar Remote Sensing for Forestry," *J. For.*, vol. 98, no. 6, pp. 44–46, 2000.
- [9] C. Slinger, M. Harris, N. Power, T. O. Barns, F. Farm, and N. L. Hr,

- “Introduction to continuous-wave Doppler lidar,” *Proc. Summer Sch. Remote Sens. Wind Energy*, pp. 1–32, 2012.
- [10] S. Donati, G. Giuliani, and S. Merlo, “Measurement of Displacements without Ambiguity,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 113–119, 1995.
- [11] Charles Kittel, *Introducción a la física del estado sólido*, 3rd ed. Barcelona: Reverté, 1997.
- [12] H. Lin, J. Chen, W. Xia, H. Hao, D. Guo, and M. Wang, “Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating,” *Opt. Eng.*, vol. 57, no. 05, p. 1, 2018.
- [13] S. Donati, L. Fellow, M. Norgia, and S. Member, “Self-Mixing Interferometer With a Laser Diode : Unveiling the FM Channel and Its Advantages Respect to the AM Channel,” vol. 53, no. 5, 2017.
- [14] E. Hecht, *Óptica*, 3rd ed. Madrid, 2000.
- [15] J. Chen, M. Wang, W. Xia, H. Hao, and D. Guo, “Fringe double for self-mixing interference based on the narrow transmission spectrum mapping Fringe double for self-mixing interference based on the narrow transmission spectrum mapping,” vol. 095002, no. May, 2020.
- [16] M. C. E. Boquera, *Comunicaciones ópticas Conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Madrid, 2005.
- [17] M. Norgia, A. Pesatori, and L. Rovati, “Low-cost optical flowmeter with analog front-end electronics for blood extracorporeal circulators,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 5, pp. 1233–1239, 2010.
- [18] V. Contreras, J. Lönnqvist, and J. Toivonen, “Detection of single microparticles in airflows by edge-filter enhanced self-mixing interferometry,” *Opt. Express*,

vol. 24, no. 8, p. 8886, 2016.

- [19] “Honeycomb Optical Breadboards.” [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=44.
- [20] P. J. Arslanian and P. Matin, “Undergraduate research on conceptual design of a wind tunnel for instructional purposes,” *ASEE Annu. Conf. Expo. Conf. Proc.*, no. May 2005, 2012.