

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS



INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL (IHD) PARA LA EVALUACIÓN DE VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN EN GASOLINAS COMERCIALES

Daniela Paola López Betancur

Tesis de Maestría

presentada a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.
de acuerdo a los requerimientos de la Universidad para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ORIENTACIÓN: PROCESAMIENTO DE SEÑALES Y MECATRÓNICA

Directores de tesis:

Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya y Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Zacatecas, Zac., 08 de Agosto de 2016

APROBACIÓN DE EXAMEN DE GRADO



Se aprueba por unanimidad el Examen de Grado de Daniela Paola López Betancur
presentado el 08 de Agosto de 2016 para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ORIENTACIÓN: PROCESAMIENTO DE SEÑALES Y MECATRÓNICA

Jurado:

Presidente: Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya _____

Primer vocal: Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera _____

Segundo vocal: Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel _____

Tercer vocal: M.C.I. Carlos Alejandro Guerrero Méndez _____

Cuarto vocal: Dr. Arturo Moreno Báez _____

RESUMEN

La Interferometría Holográfica Digital (IHD), es una técnica óptica que permite comparar interferométricamente dos o más frentes de ondas provenientes de un mismo objeto, registrados en diferentes lapsos de tiempo o estados físicos del objeto. Convirtiéndose así, en una poderosa técnica de no contacto, no invasiva, no destructiva, con información de campo completo, y cuya exactitud se encuentra en el orden de la longitud de onda.

Por tal motivo, en esta investigación se presenta un arreglo óptico basado en los principios de la IHD, capaz de detectar con alta sensibilidad cambios en las propiedades químicas en muestras líquidas de gasolinas comerciales. En el arreglo óptico se utiliza una cámara monocromática, una fuente de luz láser de 532 nm , y fibras ópticas que permiten obtener un sistema más compacto. El arreglo se prueba con muestras de gasolinas adicionadas con parafina y muestras de gasohol. Los resultados experimentales muestran el potencial metrológico del sistema para caracterizar muestras de gasolinas, en donde los datos experimentales obtenidos han demostrado ser más exactos que los datos obtenidos por otros métodos de caracterización de gasolinas.

Palabras claves: Óptica, Interferometría Holográfica Digital, metrología, gasolina.

ABSTRACT

Digital Holographic Interferometry (DHI) is an optical technique that allow the interferometrically comparison of two or more wavefronts from the same object, recorded at different periods of time or physical states of the object. Becoming it in a powerful technique non-contact, non-invasive, non-destructive, with information of full field, and whose accuracy is in the order of the wavelength.

Therefore, in this research is presented an optical arrangement based on the principles of DHI, that can detect with high sensitivity, changes in the chemical properties from liquid samples of commercial gasoline. In the optical arrangement is used a monochromatic camera, a laser light source of 532 *nm*, and optical fibers which allow a more compact setup. The optical arrangement is tested with gasoline samples with paraffin, and gasohol samples. The experimental results show the metrological potential of the system for characterization of gasoline samples, where experimental data have proven more accurate than data obtained by other methods of characterization of gasoline.

Keywords: Optics, Digital Holographic Interferometry, metrology, gasoline.

A mis Padres, Abercio López y Luz Dary Betancur, a mis hermanos, Diana y Juan Diego, a mi pequeña sobrina Mariangel, a la familia Betancur Delgado y a la familia Guerrero Méndez, que a pesar de la distancia y el tiempo lejos de ellos, me apoyan y alientan incondicionalmente cada día para seguir adelante.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Zacatecas a través de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, división de Posgrado, por ser la institución que me dio la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

Al Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera, al Dr. Domingo José Gómez Meléndez y a la Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel por confiar en mí, y abrirme las puertas en México y en la Universidad Autónoma de Zacatecas.

Al Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya por brindarme su apoyo y consejos para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Enrique De la Rosa Miranda †, que a pesar de que se nos adelantó, deja sabias enseñanzas en mi crecimiento académico.

A mis amigos y compañeros de la Maestría en especial a Carlos Guerrero, Mireya Moreno y Gustavo Espinoza por apoyarme, y ser mi familia Mexicana.

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), a la Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) por su apoyo económico para la realización de mis estudios de Maestría.

Contenido General

	Pag.
Resumen	ii
Abstract	iii
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 Interferometría Holográfica Digital	2
1.1.2 Gasolina	3
1.2 Estado del arte de la Interferometría Holográfica Digital y gasolina	5
1.3 Planteamiento del problema y Justificación	7
1.4 Hipótesis	8
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo General	8
1.5.2 Objetivos Específicos	8
2 Marco teórico	10
2.1 Gasolina	10
2.1.1 Parafina	10
2.1.2 Etanol	11
2.1.3 Gasohol	11
2.2 Conceptos básicos de la óptica	12
2.2.1 Óptica	12
2.2.2 Luz	12
2.2.3 Índice de refracción	13
2.2.4 Irradiancia	14
2.2.5 Interferencia	14
2.2.6 Coherencia	16
2.2.7 Difracción	19
2.3 Holografía	20
2.3.1 Tipos de Hologramas	21

2.4	Interferometría Holográfica	28
2.4.1	Interferometría Holográfica de tiempo real	28
2.4.2	Interferometría Holográfica de doble exposición	29
2.5	Holografía Digital	32
2.6	Método de la Transformada de Fourier para la recuperación de fase	34
3	Interferometría Holográfica Digital (IHD) en muestras líquidas	38
3.1	Variaciones de índice de refracción usando IHD	39
3.2	Cálculo de diferencias de fase mediante una aproximación a la región central	42
4	Trabajo realizado y resultados	46
4.1	Diseño del sistema óptico	46
4.1.1	Sistema óptico implementado en el laboratorio	48
4.2	Dispositivos utilizados	49
4.2.1	CCD	49
4.2.2	Láser	49
4.2.3	Bomba de infusión	50
4.2.4	Elementos ópticos	50
4.3	Calculo de las diferencias de fase de las muestras de Gasolina con parafina o etanol	51
4.4	Calibración del sistema	51
4.5	Muestras de gasolina con parafina	53
4.6	Concentraciones de Gasohol utilizadas	53
4.7	Diferencias de fase calculadas	54
4.8	Aproximación a la región central para el cálculo de las variaciones del índice de refracción	56
4.9	Variaciones de concentración en gasolinas comerciales, relacionadas a variaciones del índice de refracción	58
	Conclusiones	60
	Apéndices	
	Apéndice A: Códigos de Matlab	62
	Apéndice B: Fichas técnicas de las Gasolina Mexicanas	71
	Apéndice C: Modificaciones requeridas para que un motor de gasolina convencional pueda operar con las distintas mezclas de etanol	75
	Referencias	76

Lista de figuras

Figura	Pag.
2.1 Onda electromagnética	13
2.2 Patrón de Interferencia	16
2.3 Interferómetro de Michelson	17
2.4 Interferómetro de Young	18
2.5 Principio de Huygens-Fresnel	20
2.6 Sistema óptico utilizado para grabar hologramas en línea.	22
2.7 Sistema óptico utilizado para la reconstrucción de imagen en un holograma en línea, que muestra la formación imágenes dobles.	23
2.8 Etapa de grabado	24
2.9 Etapa de reconstrucción	26
2.10 Interferometría holográfica de tiempo real	29
2.11 Etapa de grabado con el objeto en su estado inicial	30
2.12 Etapa de grabado con el objeto en un estado modificado	31
2.13 Etapa de grabado con el objeto en su estado inicial	33
2.14 Espectro de Fourier	36
2.15 Lóbulo seleccionado y trasladado al origen	36
3.1 (a) Grabado del primer holograma con la muestra en un estado inicial, (b) Grabado del segundo holograma donde la muestra ha sido modificada.	39
3.2 Vista superior del tubo de vidrio	40

Figura	Pag.
3.3 Longitud de camino óptico para un tubo de vidrio cilíndrico con una muestra líquida.	42
3.4 Mapa de fase envuelto	44
3.5 Distribución de fase	45
4.1 Esquema del Sistema óptico	47
4.2 Vista superior del sistema óptico implementado	48
4.3 Vista frontal del sistema óptico implementado	48
4.4 CCD	49
4.5 Láser	49
4.6 Bomba de infusión	50
4.7 Proceso experimental para la obtención de la diferencia de fase. Donde a) son los hologramas correspondientes a la muestra 1 y 2, b) los espectros de Fourier, c) el filtrado de uno de los lóbulos del espectro de Fourier, d) la transformada inversa de Fourier, e) la fase y f) la diferencia de fase entre las dos muestras.	51
4.8 Diferencia de fase de referencia	52
4.9 a) Simulación de diferencia de fase. b) Aproximación con la línea central	52
4.10 a) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y la gasolina Magna; b) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y gasolina Premium con 0.10g de parafina; c) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y gasolina Premium con 0.11g de parafina; d) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y gasolina Premium con 0.12g de parafina	54
4.11 a) Diferencia de fase E0.4; b) Diferencia de fase E0.5; c) Diferencia de fase E0.6; d) Diferencia de fase E0.7	55
4.12 a) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina Magna; b) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina premium con 0.10g de parafina; c) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina premium con 0.11g de parafina; d) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina premium con 0.12g de parafina	56

Figura	Pag.
4.13 a) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.4; b) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.5; c) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.6; d) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.7	57

Lista de tablas

Tabla	Pag.
4.1 Dimensiones del brazo haz objeto	47
4.2 Dimensiones del brazo haz de referencia	48
4.3 Muestras de gasolina Premium con parafina comercial	53
4.4 Composición de las muestras de Gasohol	53
4.5 Índice de refracción obtenido para la gasolina Magna	58
4.6 Índices de refracción obtenidos para muestras de 40ml de gasolina Premium con las cantidades de parafinas especificadas	58
4.7 Índices de refracción obtenidos para las diferentes muestras de gasohol	59

Capítulo 1

Introducción

La holografía es una técnica óptica que hace posible el grabado y posteriormente la reconstrucción de toda la información contenida en un frente de onda. Esta información incluye tanto amplitud como fase, y no solo intensidad como lo hace una fotografía comúnmente [1]. La holografía es esencialmente una combinación entre la interferencia y la difracción, dos fenómenos basados en la naturaleza ondulatoria de la luz. Por consiguiente, la Interferometría Holográfica (IH) permite la comparación interferométrica de dos o más frentes de ondas, grabados en diferentes instantes de tiempo o estados físicos del objeto de fase. La comparación entre estos frentes de onda, nos da como resultado patrones de interferencia que se relacionan con las variaciones de fase del objeto de estudio, y a su vez con variaciones del índice de refracción, analizados como cambios de longitudes del camino óptico en el objeto de fase.

Por su parte, la Interferometría Holográfica Digital (IHD), es una técnica metroológica óptica basada en el principio de la holografía [2], que además de registrar, reconstruir y comparar interferométricamente dos o más frentes de onda, abre la posibilidad de almacenar digitalmente hologramas, haciendo uso de dispositivos electrónicos como los CCD (Charge-Coupled Device), los cuales almacenan digitalmente las imágenes o en este caso los hologramas en forma de matrices computacionales. Abriendo así, la posibilidad de reconstruir por medio de métodos numéricos los frentes de onda objeto, y dejando de lado el uso de placas fotográficas y procesos químicos de revelado.

La IHD, es una técnica muy poderosa de no contacto, no invasiva, no destructiva, de campo

completo, y de alta sensibilidad (del orden de nanómetros). Entre sus aplicaciones encontramos: el análisis de deformaciones y vibraciones en objetos sólidos, mediciones de forma, investigaciones sobre variaciones del índice de refracción en medios transparentes, y entre otras más [3].

En esta tesis de Maestría, se presenta un arreglo óptico que se compone principalmente de un láser, una cámara monocromática y fibras ópticas, para medir variaciones de concentración en gasolinas comerciales.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Interferometría Holográfica Digital

La holografía es esencialmente una combinación de interferencia y difracción, dos fenómenos basados en la naturaleza ondulatoria de la luz. La difracción fue notada por primera vez por F.M. Grimaldi (1618-1663), como la desviación de la propagación rectilínea, que se produce cuando la luz se encuentra con bordes, aberturas y pantallas. Por otro lado, la interferencia generada por las películas delgadas fue observada y descrita por R. Hooke (1635-1703), y posteriormente, I. Newton (1642-1727), descubre la composición de la luz blanca y Chr. Huygens (1629-1695), fundamenta las bases matemáticas de la teoría de las ondas.

Los principios de interferencia introducidos por Th. Young (1773-1829) y los principios de Huygens fueron utilizados por A. J. Fresnel (1788-1827) para calcular los patrones de difracción de diferentes objetos, y desde mediados de 1850, la visión de la luz como una onda transversal ganó contra la teoría corpuscular [1].

Pero solo hasta 1947, Dennis Gabor (1900-1979), descubre la holografía como un proceso sin lentes para la formación de imágenes, mediante la reconstrucción de frentes de ondas. Su objetivo era mejorar la resolución y definición del microscopio electrónico, usando esta nueva aproximación para evitar las aberraciones en él [4], pero no obtuvo éxito, sin embargo había generado el primer holograma a través de un nuevo método para formar imágenes. Aunque eran imágenes de baja calidad, y la imagen virtual y real, generadas por la reconstrucción del frente de onda, estaban traslapadas.

Años más tarde, la holografía es reinventada con la aparición del láser en 1960 [5] por E. N. Leith and Y. Upatnieks, quienes entre 1962 y 1963 utilizaron la coherencia del láser para crear una nueva técnica holográfica conocida como "fuera de eje", en donde se resolvía el problema de doble imagen, encontrado en el arreglo en línea de Gabor, obteniendo una imagen virtual completa y separada de la imagen virtual [6]. Esta nueva técnica holográfica es utilizada por Robert L. Powell y Karl A. Stetson para desarrollar la Interferometría Holográfica en 1965 [7]. La IH, compara interferométricamente dos o más frentes de ondas provenientes de un mismo objeto, registrados en diferentes lapsos de tiempo o estados físicos del objeto, obteniendo como resultado de esta comparación, un patrón de interferencias (franjas oscuras y blancas) que implican un cambio de fase en el objeto. Las aplicaciones de la IH, varían desde la medición de desplazamientos dinámicos y estáticos de un objeto con alta precisión, hasta la identificación de variaciones de longitud del camino óptico en medios transparentes, que se encuentran relacionadas con variaciones del índice de refracción. Luego, en 1976, N Bochner and J Pipman aplican la IH, en la medición de constantes de difusión en mezclas transparentes [8], y en 1987, J. D. Trolinger calculan el índice de refracción en líquidos a través de la IH [9].

Todo lo anterior, se implementaba en laboratorios ópticos, utilizando películas fotosensibles y procesos químicos para la reconstrucción de los hologramas. Luego, con la aparición de los dispositivos electrónicos, la etapa de grabado se comienza a realizar con cámaras, y la etapa de reconstrucción se realiza en ordenadores de uso general, creando así la Interferometría Holográfica Digital en 1994 por U. Schnars [10]. Desde entonces la IHD ha sido utilizada para el estudio de cambios de fase en diferentes líquidos, por lo cual se considera apropiada esta técnica para la caracterización de combustibles como la gasolina, de la cual veremos su desarrollo evolutivo en la siguiente sección.

1.1.2 Gasolina

La gasolina, se descubrió en 1857, mediante la destilación fraccionada del petróleo y en 1860, Jean Joseph Etienne Lenoir creó el primer motor de combustión interna quemando gas dentro de un cilindro. Ya en 1876, Nikolaus August Otto construyó el primer motor de gasolina de

la historia, de cuatro tiempos, que en 1885 Karl Benz utilizaría en sus primeros prototipos de automóviles. Pero solo hasta 1927, se crea el primer vehículo comercial de combustible flexible, capaz de operar tanto con gasolina como con etanol [11].

Para 1984, Juana Obregón Obregón presenta posibles formas de adulterar una gasolina, entre las cuales se encuentran: mezclado de gasolina con xilol, diésel, petróleo diáfano, compuestos del tipo amina y el mezclado de una gasolina de mayor calidad con una de menor calidad; en el caso de las gasolinas en México esto corresponde al mezclado de gasolina Extra con Nova.

En 1997, I. Litani-Barzilai, I. Sela, V. Bulatov, I. Zilberman y I. Schechter, predicen propiedades de la gasolina mediante espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR) [12]. Luego, F. Santos, L. Sena, M. Ugulino, M. Korn en el 2003, detectan adulteraciones de la gasolina brasileña, usando curvas de destilación [13].

Para el 2005, la norma oficial mexicana “NOM-086-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Secretaría de Energía-SCFI-2005. Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental”, incluye dentro de las zonas críticas a la Zona Metropolitana de Monterrey y la del Valle de México, lo que obliga a que las a efecto de reducir la contaminación ambiental [14].

En el 2008 se publica la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual tiene como objeto la promoción y desarrollo de los Bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano. Luego, en el 2009, se presenta el programa de Introducción de Bioenergéticos, el cual establece metas específicas para la introducción de etanol anhidro como oxigenante en las gasolinas de las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Valle de México, como estrategia para cumplir con el objeto de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos [15].

Posteriormente, se siguen determinando propiedades de la gasolina con ciertas cantidades de etanol, considerando los rangos de solubilidad que el etanol anhidro tiene con la gasolina. Todo esto, a partir de la necesidad de observar los cambios de fase que se presentan según las relaciones de volúmenes de estas soluciones, con el fin de determinar que modificaciones

requieren los motores de combustión interna para el correcto uso del Gasohol (Mezclas de Gasolinas con Etanol Anhidro)

1.2 Estado del arte de la Interferometría Holográfica Digital y gasolina

1948 El científico húngaro Denis Gabor inventa la holografía [4].

1960 Theodore H Maiman, crea el láser, proporcionando una fuente más potente de luz monocromática coherente, requerida para producir hologramas [5].

1958-1962 Emmett Leith y Juris Upatnieks inventan la holografía fuera de eje, utilizando el láser para crear el primer holograma de transmisión laser [6].

1965 Robert L. Powell y Karl A. Stetso, desarrollan la IH [7].

1966 L. Heflinger, R. Wuerker, y R. Brooks, obtiene los primeros cambios de fase en fluidos [16].

1976 N. Bochner y J. Pipman utilizan la IH, para la medición de constantes de difusión en mezclas transparentes [8].

1981 M. Takeda, H. Ina y S. Kobayashi, presentan el método de la Transformada de Fourier para la recuperación de la distribución de fase [17].

1984 Juana Obregón Obregón presenta las posibles formas de adulterar una gasolina [18].

1987 J. D. Trolinger calculan el índice de refracción en líquidos a través de la IH [9].

1994 U. Schnars y W. Jüptner, crean la Holografía Digital [19].

1994 U. Schnars inventa la Interferometría Holográfica Digital [10].

1997 I. Litani-Barzilai, I. Sela, V. Bulatov, I. Zilberman y I. Schechter, predicen propiedades de la gasolina mediante espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR) [12].

- 1999** G. Pedrini, S. Schedin y H. J. Tiziani ponen una apertura entre el objeto opaco y el dispositivo fotosensible para registrar las más altas frecuencias espaciales, que conducen a una mayor resolución espacial [20].
- 2003** F. Santos, L. Sena, M. Ugulino, M. Korn, detectan adulteraciones de la gasolina brasileña, usando curvas de destilación [13].
- 2005** Se crea la norma oficial mexicana “NOM-086-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Secretaría de Energía-SCFI-2005. Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental” que obliga a las gasolinas que se comercialicen en Monterrey y el Valle de México a usar aditivos oxigenantes [14].
- 2006** Arun Anand, Vani K. Chhaniwal, y C. S. Narayanamurthy estudian y visualizan en tiempo real el proceso de difusión en líquidos transparentes con la IHD [21].
- 2007** Sandra Jiménez realiza un control estadístico de calidad en el rango de destilación de la gasolina Magna Resto del País. [22].
- 2007** J. Colombani y J. Bert estudian variaciones de concentración y temperatura en muestras líquidas usando la IHD [23].
- 2008** Se publica la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual tiene como objeto la promoción y desarrollo de los Bioenergéticos en México [15].
- 2009** Se presenta el programa de Introducción de Bioenergéticos, el cual establece metas específicas para la introducción de etanol anhidro como oxigenante en las gasolinas de las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Valle de México [15].
- 2009** H. Aleme, L. Costa y P. Barbeira, determinan a través de curvas de destilación y análisis multivariados, cantidades de etanol y la gravedad específica de la gasolina [24].
- 2011** J. Camarillo y J. Marín, analizan la combustión de mezclas de gasolina-etanol anhidro y hidratado a distintas concentraciones en un motor monocilíndrico de ignición [25].

- 2011** Leonardo A. Díaz M., Lorenzo Mattos V y César O. Torres M, presentan un sensor de fibra óptica para la medición de la adulteración en la gasolina a través de las variaciones de voltaje [26].
- 2012** R. Trujillo y J. Espinosa, determinan la solubilidad de etanol anhidro y etanol acuoso en la gasolina magna y la sintética. [27].
- 2015** A. Kamari, M. Sattari, A. H. Mohammadi, y D. Ramjugernath, realizan el modelado de propiedades de la gasolina, aplicando un robusto esquema matemático (máquinas de vectores de soportes de mínimos cuadrados (LSSVM)) [28].

1.3 Planteamiento del problema y Justificación

Hoy en día, el transporte es una de las actividades más importantes dentro del sistema económico del país. La principal fuente de energía de esta actividad, sigue siendo los derivados del petróleo. En todo el territorio nacional mexicano, exceptuando la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se comercializa la gasolina Premium y Magna. Sin embargo, muchos países proponen la implementación de fuentes alternas de energía como los biocombustibles, los cuales generan una menor contaminación ambiental y poseen una gran eficiencia de combustión. Entre los biocombustibles, se ha destacado el uso del etanol como fuente de energía alterna proveniente de biomásas renovables (caña de azúcar, palma africana, sorgo, yuca, etc.). El etanol puede ser utilizado como oxigenante de la gasolina, elevando así el contenido de O_2 [29]. La mezcla entre etanol y gasolina en distintas proporciones, se le conoce como gasohol, la cual mantiene la eficiencia del combustible en los motores, y además genera una combustión más completa que reduce el nivel de contaminación en comparación al uso exclusivo de combustibles fósiles, sin embargo las proporciones de gasolina y etanol deben ser consideradas, pues dependiendo de estas, es posible que en algunos motores de combustión interna se requiera de modificaciones [30].

Es por tal motivo, que se presenta esta investigación como una nueva alternativa, capaz de evaluar las variaciones de concentración en las gasolinas que se comercializan hoy en día,

pero además capaz de caracterizar biocombustibles, que paulatinamente se empiezan a comercializar en México, mediante la evaluación de diferencias de concentraciones entre gasolina Premium y Magna, la caracterización de las proporciones de volumen del gasohol e identificando cuando una gasolina ha sido añadida con sustancias miscibles, como la parafina.

Todo esto, a través de la IHD. La cual, es una técnica metrológica óptica basada en el principio de holografía que nos permitirá medir con muy alta sensibilidad variaciones de campos de concentración en combustibles (En términos del índice de refracción, la técnica puede detectar hasta el 10X). Las ventajas de la IHD con respecto a otros métodos utilizados para la caracterización de la gasolina, es que es una técnica no invasiva, no destructiva, versátil, de campo completo, que proporciona información prácticamente en tiempo real, y ante todo de fácil implementación.

1.4 Hipótesis

A partir de un arreglo óptico compacto basado en la Interferometría Holográfica Digital, y aprovechando que se esperan ciertos mapas de fase con ciertas características conocidas, se nos permitirá realizar simulaciones que nos aproximen a las diferencias de fase de muestras líquidas volátiles con una mayor exactitud. Donde, estas diferencias de fase encontradas serán relacionadas con valores del índice de refracción y por ende, se relacionarán con variaciones de concentración en gasolinas comerciales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar teórica y experimentalmente un arreglo óptico basado en la IHD, capaz de evaluar variaciones de concentración en muestras líquidas de gasolinas comerciales.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y calibrar un sistema óptico basado en la IHD, capaz de detectar índices de refracción en fluidos volátiles, como la gasolina.

- Relacionar los cambios de fase con valores del índice de refracción y a su vez, con variaciones de concentraciones de gasolinas comerciales.
- Programar un algoritmo capaz de aproximar las diferencias de fase solo con la línea central de un mapa de fase generado a partir de un cilindro.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Gasolina

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos, de 3 a 10 átomos de carbono, como parafinas, olefinas, naftenos y algunos otros compuestos aromáticos, que se obtienen por la refinación del petróleo crudo [31]. Su uso principal es como combustible para motores de combustión interna. Debe de cumplir una serie de parámetros, unos para que el motor funcione bien y otros de tipo ambiental, ambas reguladas por ley en la mayoría de los países. Es importante conocer estos parámetros debido a que el diseño de los depósitos de combustible en los automóviles, bombas y conductos se basan en las propiedades físicas y químicas del combustible a utilizar. Dentro de los parámetros más comunes, encontramos Temperatura de destilación, el Peso específico o Gravedad específica, número de octanaje, Temperatura de auto ignición y el olor.

En México existen diferentes especificaciones con relación al contenido de azufre y octanaje [32]. Para el caso del territorio nacional mexicano exceptuando la Zona Metropolitana del Valle de México, se maneja la Gasolina Magna con 87 octanos y la Gasolina Premium con 92 octanos. (Ver Fichas técnicas en el apéndice B).

2.1.1 Parafina

La parafina o también conocida como cera se compone de hidrocarburos, se extrae principalmente del petróleo crudo y se produce como subproducto en la producción de aceites lubricantes básicos. Se encuentra por lo general como un sólido ceroso, blanco, inodoro y sin

sabor. Es insoluble en agua, aunque si es soluble en éter, benceno, etanol caliente, gasolinas, etc [33].

2.1.2 Etanol

El etanol, conocido también como alcohol etílico, es un compuesto químico correspondiente a la fórmula química $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$, que se produce a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales (cereales, caña de azúcar, remolacha o biomasa, etc.).

El etanol, puede utilizarse como combustible, ya sea solo o como añadido para oxigenar gasolinas. Para utilizarse como combustible en la mezcla de determinadas cantidades con gasolina, hay que eliminar el agua. Por tal motivo se utiliza el **etanol anhidro** o **alcohol etílico anhidro** que posee una pureza entre el 99,5 al 99,9% [34].

2.1.3 Gasohol

Se le llama gasohol a la mezcla de gasolina y alcohol en distintas proporciones. La mezcla de Gasohol puede ser realizada con alcohol etílico (etanol) o con alcohol metílico (metanol). Pero es más comercial con etanol, debido a que el metanol es tóxico. Se le conoce como etanol normalmente a la mezcla de 90% de gasolina con 10% de etanol, pero también se utiliza para referirse a las mezclas con bajos contenidos de alcohol. Estas proporciones entre alcohol y etanol se indican con la letra mayúscula E seguida por el porcentaje de etanol. Es decir, una mezcla *E85* se compone de 85% de etanol y un 15% de gasolina.

El Gasohol es una de las nuevas tendencias en los biocombustibles, con el fin de promover el uso de combustibles renovables más limpios. La adición de etanol a la gasolina convencional, mantiene la eficiencia del combustible en los motores y además genera una combustión más completa que reduce el nivel de contaminación en comparación al uso exclusivo de combustibles fósiles [35]. Para el uso de mezclas con etanol se deben tener ciertas precauciones, ya que el alcohol es corrosivo y puede desgastar algunos materiales en el motor y el sistema de combustible. Normalmente se recomienda el uso de mezcla con bajo contenido de etanol, pero dependiendo de las proporciones de etanol, en algunos casos el motor debe ser ajustado

para una tasa de compresión mayor comparado con un motor que usa gasolina pura [36]. Otras modificaciones que probablemente sean necesarias para motores de gasolina convencional que usen mezclas de etanol se muestran en el apéndice C.

2.2 Conceptos básicos de la óptica

2.2.1 Óptica

La óptica es una rama de la física, que estudia las propiedades, la naturaleza y las interacciones con la materia de la luz [37]. Es decir, analiza la manera de cómo se emite por los cuerpos luminosos, la forma con que se propaga a través de los medios transparentes y la forma en que se absorbe por otros cuerpos. Cuando se habla del estudio de la propagación, se abarca fenómenos luminosos como la reflexión, refracción, la interferencia y la difracción. También se le considera óptica, al estudio y manejo de las imágenes en general, aunque éstas no hayan sido necesariamente formadas con luz o métodos ópticos convencionales [38].

2.2.2 Luz

La luz desde un marco teórico clásico es una onda electromagnética transversal caracterizada por campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (ver Figura 2.1). Donde una onda transversal, es aquella que vibra perpendicularmente a la dirección de propagación. La onda puede vibrar horizontalmente, verticalmente, o en cualquier dirección combinada de estas. Estos efectos son conocidos como los efectos de polarización.

Una onda de luz $[E(z,t)]$, se caracteriza por dos parámetros: dirección de propagación z y tiempo t , y puede ser descrita como:

$$E(z,t) = E_0 \cos(kz - wt + \phi_0), \quad (2.1)$$

donde E_0 es la amplitud, el número k es asociado a la longitud de onda λ , como $2\pi/\lambda$, w es la frecuencia angular $2\pi\nu$, ϕ_0 es la fase inicial, y $(kz - wt + \phi_0)$ es la fase de la onda.

El término frente de onda, se refiere a superficies en las que las ondas en cada punto están en fase. Los frentes de onda son normales a la dirección de propagación. Una onda plana es

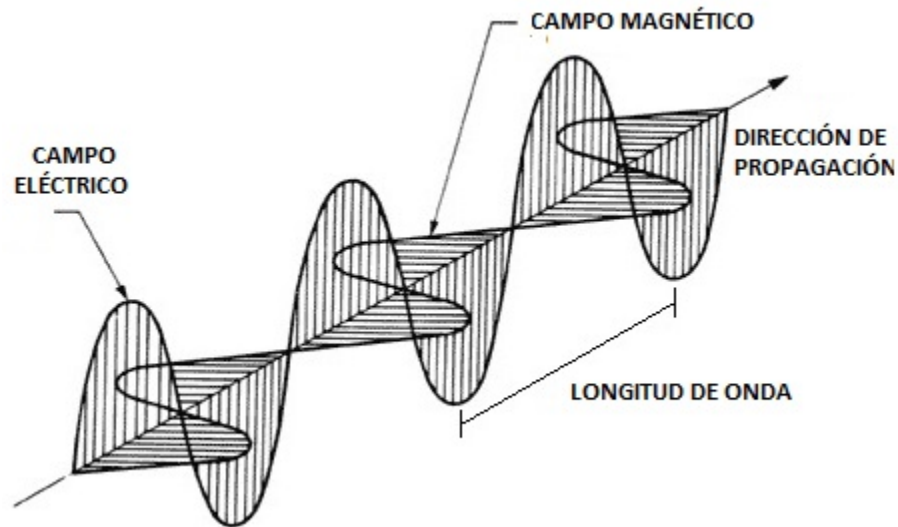


Figura 2.1 Onda electromagnética

aquella que tiene fase constante en todos los planos ortogonales a la dirección de propagación [1].

2.2.3 Índice de refracción

La refracción, es el cambio de dirección que experimentan los rayos luminosos al pasar de un medio material a otro de distinta densidad óptica. Donde la densidad óptica, es la propiedad de un material transparente que determina la velocidad de la luz en dicho material [39]. Es decir, las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la misma velocidad ($c = 3,00 \times 10^8 m/s$), pero cuando viajan en un medio material, se produce un cambio de dirección debido a la velocidad de propagación que tiene la luz en cada medio material [40]. El cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio es el índice de refracción del medio (n), y es descrito como:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2.2)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, y v es la velocidad de la luz en el medio material.

El índice de refracción de una sustancia químicamente pura, es una constante que define una propiedad física de la sustancia. Por consiguiente, se puede determinar la identidad de una sustancia midiendo su índice de refracción.

2.2.4 Irradiancia

La irradiancia se podría definir como la cantidad de luz que ilumina una superficie, o como la energía a través de un área por unidad de tiempo. En términos de intensidad, la irradiancia es su expresión radiométrica [41]. Siendo a su vez, el único parámetro de la luz que es directamente susceptible a los sensores, dado que estos basan su funcionamiento en base a los niveles de intensidad. La irradiancia se define como:

$$I = \varepsilon_0 c \langle E^2 \rangle, \quad (2.3)$$

donde $\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$ es la permitividad eléctrica del espacio, y $c = 2.997924562 \times 10^8 \text{m/s} \pm 1.1 \text{m/s}$ es la velocidad de la luz en el vacío [42]. Siendo la irradiancia proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico.

2.2.5 Interferencia

La interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes. La irradiancia resultante de la interferencia, es descrita como la suma algebraica de las irradiancias individuales de cada una de las ondas que interactúan.

Consideremos dos ondas linealmente polarizadas cuyas formas son:

$$E_1(x, y) = E_{01} e^{i\phi_1(x,y)}, \quad (2.4)$$

y

$$E_2(x, y) = E_{02} e^{i\phi_2(x,y)}, \quad (2.5)$$

y recordemos que la irradiancia viene dada por la Ec. 2.3, pero como se estará en un mismo medio, tomaremos solamente la irradiancia relativa, donde se omitirá por el momento las constantes y tendremos que:

$$I = E^2. \quad (2.6)$$

Ahora bien, se ha dicho que la interferencia resultante está dado por la suma algebraica de las irradiancias individuales, por lo cual tendremos que:

$$I(x, y) = E^2 = |E_1(x, y) + E_2(x, y)|^2 = (E_1(x, y) + E_2(x, y))(E_1(x, y) + E_2(x, y))^*. \quad (2.7)$$

De lo cual, nos queda que:

$$I(x, y) = E_1(x, y)E_1(x, y)^* + E_1(x, y)E_2(x, y)^* + E_2(x, y)E_1(x, y)^* + E_2(x, y)E_2(x, y)^*,$$

y reemplazando tendremos que:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= E_{01}E_{01}e^{i\phi_1(x,y)}e^{-i\phi_1(x,y)} + E_{01}E_{02}e^{i\phi_1(x,y)}e^{-i\phi_2(x,y)} + E_{02}E_{01}e^{i\phi_2(x,y)}e^{-i\phi_1(x,y)} \\ &\quad + E_{02}E_{02}e^{i\phi_2(x,y)}e^{i\phi_2(x,y)} \\ &= E_{01}^2 + E_{01}E_{02}e^{-i(\phi_2(x,y)-\phi_1(x,y))} + E_{02}E_{01}e^{i(\phi_2(x,y)-\phi_1(x,y))} + E_{02}^2 \\ &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01}E_{02}e^{-i(\Delta\phi(x,y))} + E_{01}E_{02}e^{i(\Delta\phi(x,y))} \\ &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01}E_{02}(e^{-i(\Delta\phi(x,y))} + e^{i(\Delta\phi(x,y))}) \\ &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\left(\frac{e^{-i(\Delta\phi(x,y))} + e^{i(\Delta\phi(x,y))}}{2}\right) \\ &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\Delta\phi(x, y)). \end{aligned}$$

Donde en términos de la interferencia total tendremos que:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)}\cos(\Delta\phi(x, y)). \quad (2.8)$$

Para que se de la interferencia, se requiere de que la luz sea monocromática y coherente. Ahora bien, si se coloca una pantalla en la región de interferencia y se ven zonas claras y oscuras, se tendría un patrón de interferencia, como se muestra en la Figura 2.2.

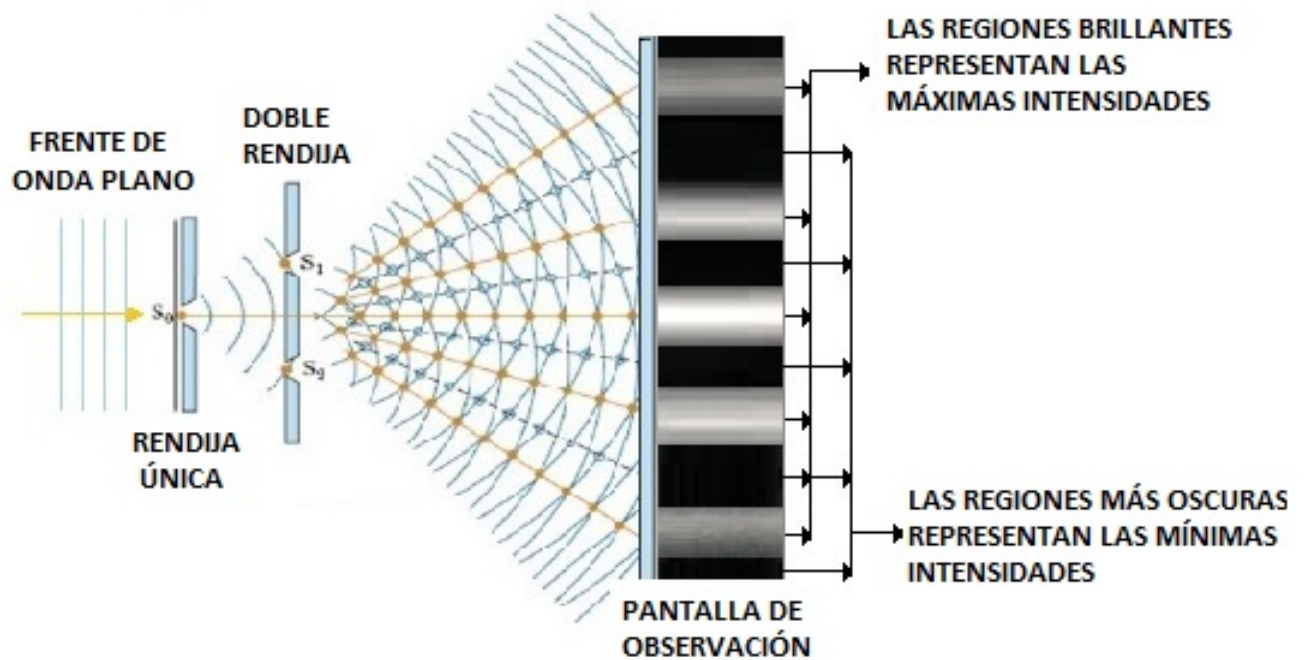


Figura 2.2 Patrón de Interferencia

2.2.6 Coherencia

Para que se genere un patrón de interferencia nítido y bien contrastado, se requiere que la luz sea Coherente. Es decir, la coherencia es la capacidad de las ondas de luz para interferir. Por ejemplo, con la luz del sol o de una lámpara es muy raro observar un patrón de interferencia, debido a que estas luces no son del todo coherentes, a diferencia de los láseres que presentan un gran grado de coherencia. Pero para que esta capacidad de interferir sea óptima, la coherencia debe darse espacial y temporalmente.

2.2.6.1 Coherencia Temporal

La coherencia temporal, está estrechamente relacionada a la monocromaticidad del haz; cuanto más estrecho sea el intervalo de longitudes de onda generadas por la fuente luminosa, mayor será su coherencia temporal [43]. La coherencia temporal está relacionada con la correlación de la fase de onda en un punto determinado en dos instantes de tiempos diferentes. Es decir, describe la correlación de una onda consigo misma en diferentes instantes de tiempo [44]. Lo cual, puede comprenderse mejor con la ayuda del interferómetro de Michelson que se representa en la Figura 2.3.

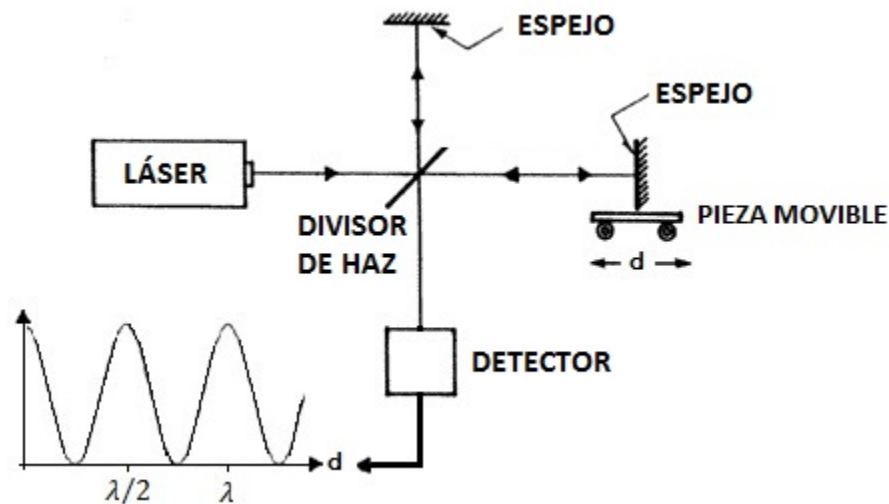


Figura 2.3 Interferómetro de Michelson

En donde, el campo de onda proveniente del láser pasa a través de un divisor de haz y se divide en dos partes. Una de estas se refleja en la dirección ortogonal, y la otra pasa el divisor de haz y se mantiene en la dirección original de propagación. Por otra parte, se hablaría de la existencia de coherencia temporal, si se coloca un detector en la otra parte ortogonal, y en éste se obtiene un solo haz resultante, que genera un patrón de interferencia [1].

2.2.6.2 Coherencia Espacial

La coherencia espacial describe la correlación mutua de diferentes partes de un mismo frente de onda [44]. En otras palabras, si se eligen dos puntos en una onda, y si su diferencia de fase permanece constante en un intervalo de tiempo, entonces éstos son coherentes espacialmente. La coherencia espacial es inversamente proporcional al tamaño de la fuente emisora, por lo cual es máxima para fuentes puntuales [43]. Para explicar de mejor forma la coherencia espacial, usaremos el interferómetro de doble apertura de Young, que se representa en la Figura 2.4.

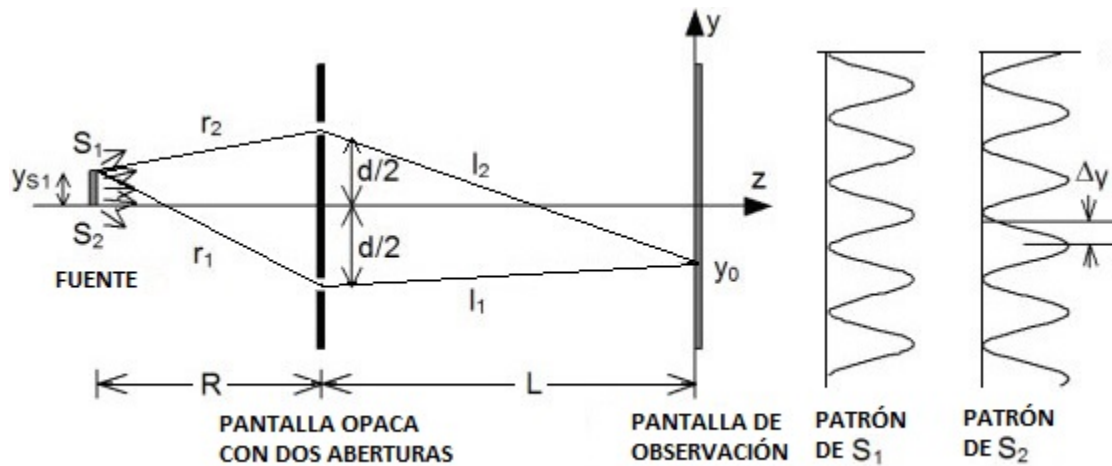


Figura 2.4 Interferómetro de Young

El interferómetro de Young recoge dos partes geoméricamente diferentes de un frente de onda y las hace interferir. En el cual, se ubica una fuente S ubicada a cierta distancia R de una pantalla opaca con dos aperturas que poseen una distancia mutua (d) entre ellas, y solo los haces de luz que pasan a través de esta, crearán un patrón de interferencia en una pantalla de observación colocada a una distancia L en frente de la pantalla opaca. Por lo cual, se hablaría de coherencia espacial, si las intensidades de los dos haces generan un solo patrón de interferencia [1].

2.2.7 Difracción

La difracción es una característica general de los fenómenos ondulatorios, que ocurre cuando una parte de un frente de onda (ya sea sonido, onda material o luz) es obstruido por un objeto transparente u opaco, que altera su amplitud y fase. Los varios segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren, produciendo aquella distribución de densidad de energía particular, denominada figura de difracción.

Una forma de visualizar la difracción, sería colocando un obstáculo o bien sea una doble rendija entre una fuente puntual y una pantalla de observación. La fuente puntual al pasar por la doble rendija, generará una figura de difracción que se visualiza en forma de un patrón de regiones claras y oscuras en la pantalla de observación (ver Figura 2.2).

No existe distinción física entre interferencia y difracción, pero se ha vuelto común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se analiza la superposición de solamente unas pocas ondas y de difracción cuando se trata de un gran número de ondas [45]. Para explicar mejor la teoría de difracción, nos basaremos en el principio de Huygens-Fresnel.

2.2.7.1 Principio de Huygens-Fresnel

El principio de Huygens-Fresnel establece que cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo determinado, sirve como fuente de trenes de onda secundarios esféricos (de la misma frecuencia que la onda primaria) como se observa en la Figura 2.5. La amplitud del campo óptico en cualquier punto más allá, es la superposición de todos estos trenes de (considerando sus amplitudes y fases relativas).

La difracción permite caracterizar matemáticamente la reconstrucción de un frente de onda. Existen tres teorías básicas de difracción: Fresnel, Fraunhofer y Rayleigh-Sommerfeld. Las cuales, nos permiten calcular el campo difractado a determinadas distancias, dependiendo de la posición de la pantalla [45].

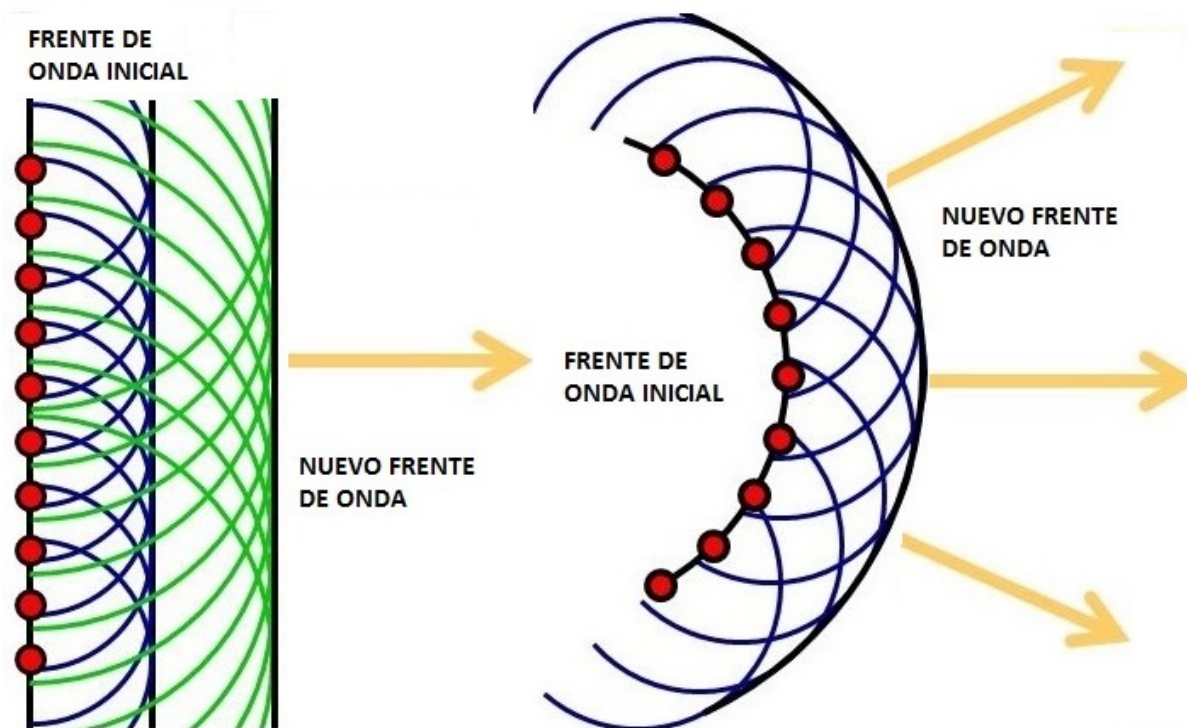


Figura 2.5 Principio de Huygens-Fresnel

2.3 Holografía

Dennis Gabor inventó la holografía en 1948, como un nuevo método para el grabado y reconstrucción de la amplitud y fase de un campo de ondas. La palabra holografía se deriva del griego “holos” que significa “todo” y “graphein” que significa “escribir”.

Un holograma es un patrón de interferencia grabado entre un campo de onda dispersado desde el objeto, y una onda de referencia, que crea un fondo coherente. Ahora bien, cada campo óptico de ondas, consiste en una distribución de amplitud, así como también de una distribución de fase, pero todos los detectores o materiales de grabado como las películas fotográficas solo pueden registrar intensidades, por lo cual la fase es perdida en el proceso de registro. Sin embargo, un holograma es usualmente grabado en una superficie plana, pero éste contiene toda la información tridimensional del campo de onda. Debido a que la holografía toma en cuenta la amplitud y la fase de un frente de onda dispersado por un objeto. Es decir, con estos dos valores se logra realizar imágenes con profundidad. Lo cual, se debe a que la amplitud de la

onda dispersada implica la intensidad luminosa que se refleja por el objeto, mientras que la fase se relaciona con la posición en el espacio de cada pequeño punto del objeto. Toda esta información es codificada en forma de microinterferencias claras y oscuras. La onda del objeto puede ser reconstruida mediante la iluminación del holograma con la onda de referencia usada en su grabación. Observándose una imagen del objeto tridimensional, que exhibe todos los perspectiva y profundidad del foco [46].

Existen diversos esquemas holográficos, entre ellos, el primero fue el de la holografía en línea, inventado por Dennis Gabor, en el cual, se traslapaban tanto la imagen real como la virtual. Años más tarde, se originó la holografía fuera de eje que corregía este problema, y en la cual el haz objeto y el haz de referencia viajan en diferente caminos, separando así la imagen virtual de la real [1]. Por lo tanto, también existe una gran variedad de hologramas.

La técnica holografía puede ser dividida en dos etapas: En la etapa del grabado de los hologramas, y en la etapa de reconstrucción holográfica de la imagen del objeto.

2.3.1 Tipos de Hologramas

Existe gran variedad de hologramas, pero en este apartado definiremos solamente los hologramas en línea, hologramas fuera de eje y hologramas de Fourier. Dado que cuando la holografía se inventó, los primeros hologramas fueron los en línea, luego gracias a la aparición de fuentes de luz más coherentes como el láser, la holografía se reinventó al separar la imagen virtual de la real gracias a la técnica fuera de eje, que genera hologramas fuera de eje, y por último el estudio de los hologramas de Fourier, debido a que en esta investigación se experimenta con la holografía fuera de eje, y se generan hologramas de Fourier.

2.3.1.1 Hologramas en línea

Para el grabado de este tipo de hologramas, observaremos la Figura 2.6, en la que el objeto es iluminado por un haz colimado de luz monocromática, a lo largo de un eje normal a la placa fotográfica.

La luz incidente en la placa fotográfica tiene dos componentes. La primera de estas, es la onda transmitida directamente, que es una onda plana, cuya amplitud y fase no varían en toda

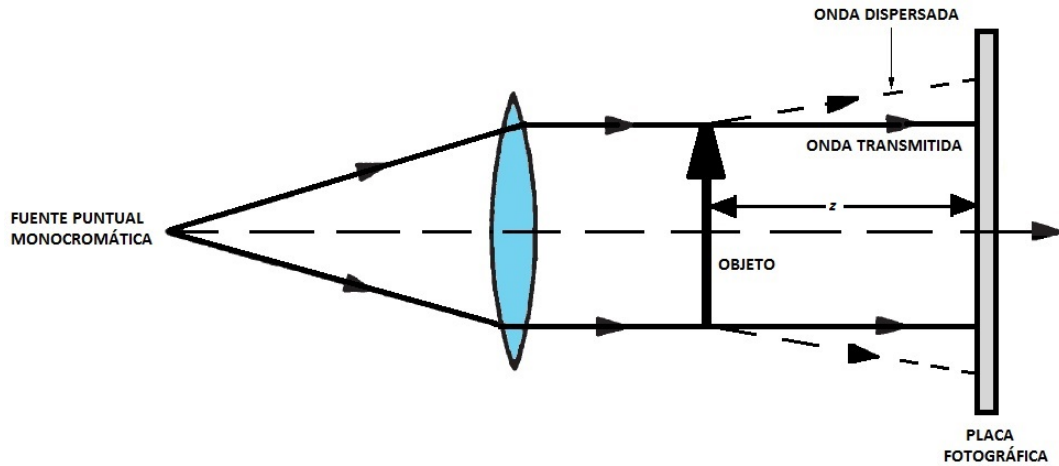


Figura 2.6 Sistema óptico utilizado para grabar hologramas en línea.

la placa fotográfica. Su amplitud compleja puede ser escrita como una constante r . Mientras que la segunda, es una onda dispersada débil, cuya amplitud compleja en cualquier punto (x, y) de la placa fotográfica, puede ser escrita como $o(x, y)$.

Como la amplitud compleja resultante es la suma de estas dos amplitudes complejas, entonces, la intensidad en este punto es:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |r + o(x, y)|^2 \\ &= r^2 + |o(x, y)|^2 + ro(x, y) + ro^*(x, y), \end{aligned} \quad (2.9)$$

donde $o^*(x, y)$ es el conjugado complejo de $o(x, y)$

Ahora bien, El holograma grabado y revelado a través de procesos químicos, tiene una amplitud de transmitancia $h(x, y)$ representada matemáticamente por:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y), \quad (2.10)$$

donde h_0 es la amplitud de transmitancia del material fotosensible al no estar expuesto, β es una constante que depende del material fotosensible, τ es el tiempo de exposición, y $I(x, y)$ es la intensidad resultante.

Reemplazando la Ec. 2.9 en la Ec. 2.10, nos queda que:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau[r^2 + |o(x, y)|^2 + ro(x, y) + ro^*(x, y)]. \quad (2.11)$$

Para la reconstrucción, el holograma es iluminado con el mismo haz colimado de luz monocromática usada para el grabado como se ve en la Figura 2.7.

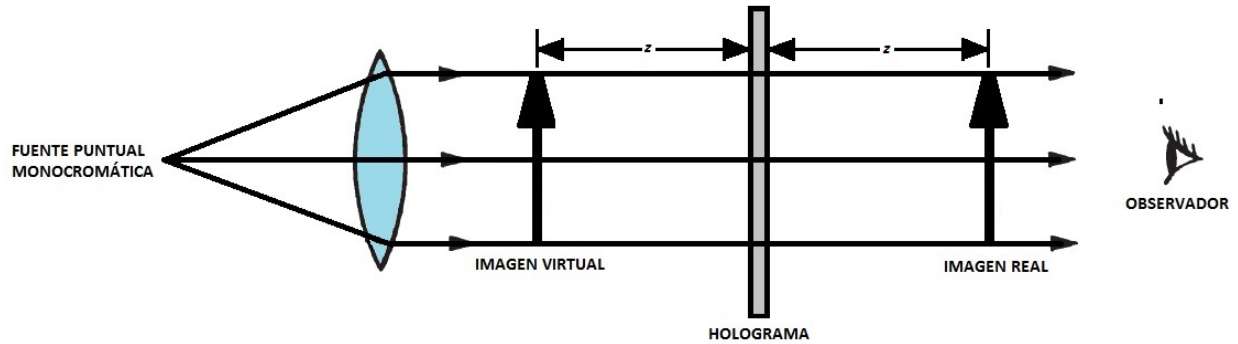


Figura 2.7 Sistema óptico utilizado para la reconstrucción de imagen en un holograma en línea, que muestra la formación imágenes dobles.

Quedándonos el frente de onda reconstruido $u(x, y)$ como:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= rh(x, y) \\ &= r(h_0 + \beta\tau r^2) + \beta\tau r|o(x, y)|^2 \\ &\quad + \beta\tau r^2 o(x, y) + \beta\tau r^2 o^*(x, y), \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde cada contribución del campo reconstruido puede ser descrito como:

- $r(h_0 + \beta\tau r^2)$, representa una onda plana uniforme atenuada, que corresponde al haz transmitido directamente.
- $\beta\tau r|o(x, y)|^2$, es extremadamente pequeño en comparación con los otros y puede ser despreciado.
- $\beta\tau r^2 o(x, y)$, sin el factor constante, es idéntico a la amplitud compleja de la onda dispersada por el objeto, y reconstruye una imagen del objeto en su posición original. Pero, como esta imagen se forma detrás del holograma a una distancia z , y la onda reconstruida parece divergir de ella, es una imagen virtual.

- $\beta\tau r^2 o^*(x, y)$, el cuarto término representa una onda similar a la onda del objeto, pero con la curvatura opuesta. Esta onda converge para formar una imagen real a la misma distancia z delante del holograma. Lo cual, genera que el observador vea imágenes dobles.

2.3.1.2 Hologramas fuera de eje

Para entender la formación de una imagen en un holograma fuera de eje, se considera la Figura 2.8, que nos muestra un esquema básico de la holografía fuera de eje. En la cual, se utiliza un campo de onda reflejado por el objeto, denominado el campo de objeto o haz objeto, y un campo de referencia o haz de referencia necesario para producir la interferencia entre ellos [46].

Para el grabado de un holograma, es necesario tener dos frentes de ondas coherentes entre sí, por lo cual, deben provenir de una misma fuente de luz coherente, como es el láser. Estos dos frentes de ondas originan un patrón de interferencia que proporcionará la diferencia de fase, y será grabado en un material fotosensible.

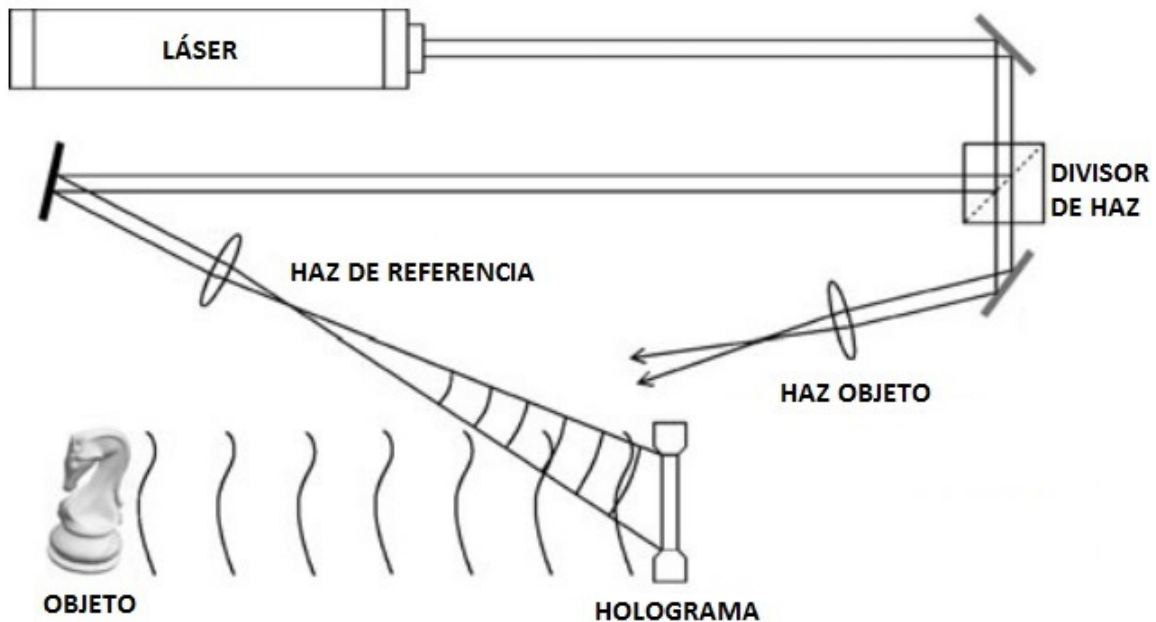


Figura 2.8 Etapa de grabado

Los dos haces pueden representarse matemáticamente como:

$$O(x, y) = |o(x, y)|e^{i\phi_O(x, y)}, \quad (2.13)$$

y

$$R(x, y) = |r(x, y)|e^{i\phi_R(x, y)}, \quad (2.14)$$

donde O es el haz objeto y R es el haz de referencia. Como ambos haces interfieren en el material fotosensible, la intensidad estará dada por:

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = (O(x, y) + R(x, y))(O(x, y) + R(x, y))^*. \quad (2.15)$$

De lo cual, nos queda que:

$$I(x, y) = O(x, y)O(x, y)^* + O(x, y)R(x, y)^* + R(x, y)O(x, y)^* + R(x, y)R(x, y)^*.$$

Luego, al reemplazar tendremos que:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |o(x, y)||o(x, y)|e^{i\phi_O(x, y)}e^{-i\phi_O(x, y)} + |o(x, y)||r(x, y)|e^{i\phi_O(x, y)}e^{-i\phi_R(x, y)} \\ &\quad + |r(x, y)||o(x, y)|e^{i\phi_R(x, y)}e^{-i\phi_O(x, y)} + |r(x, y)||r(x, y)|e^{i\phi_R(x, y)}e^{-i\phi_R(x, y)} \\ &= |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + |o(x, y)||r(x, y)|e^{i\phi_O(x, y)}e^{-i\phi_R(x, y)} \\ &\quad + |r(x, y)||o(x, y)|e^{i\phi_R(x, y)}e^{-i\phi_O(x, y)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$= |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + 2|o(x, y)||r(x, y)|\cos(\phi_O(x, y) - \phi_R(x, y)). \quad (2.17)$$

El holograma grabado $h(x, y)$ tiene una amplitud de transmitancia representada matemáticamente por:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y), \quad (2.18)$$

donde β es una constante que depende del material fotosensible, τ es el tiempo de exposición y h_0 es la amplitud de transmisión del material fotosensible al no estar expuesto por alguna luz incidente.

Claramente se observa que la amplitud de transmisión $h(x, y)$ del holograma grabado, es proporcional a $I(x, y)$. Quedando la Ec. 2.18 como:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau[|o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + 2|o(x, y)||r(x, y)| \cos(\phi_R(x, y) - \phi_O(x, y))]. \quad (2.19)$$

Después del revelado de la película fotográfica a través de procesos químicos, se continuará con la reconstrucción de la imagen del objeto [46].

Para la reconstrucción de la imagen en el holograma, se hace incidir sobre la película fotográfica, el mismo haz de referencia R con el que fue grabado el holograma y se deja el haz objeto obstruido como se observa en la Figura 2.9. En esta etapa de reconstrucción se genera un frente de onda equivalente al producto del haz de referencia con el holograma grabado $R(x, y)h(x, y)$, que se representará como $U(x, y)$ [46, 47].

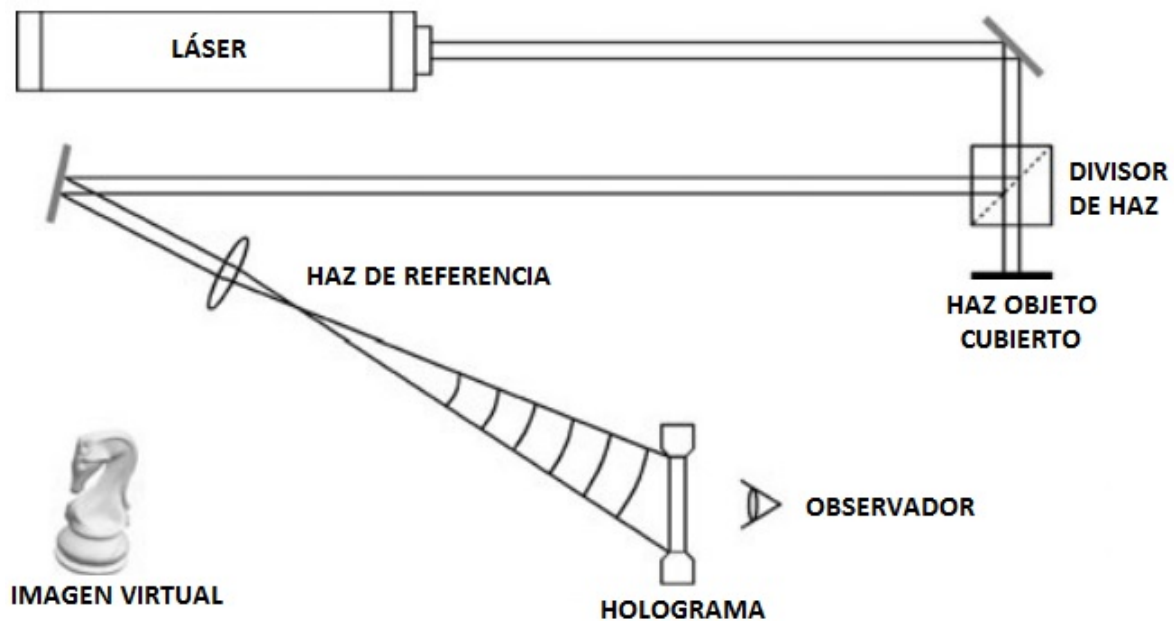


Figura 2.9 Etapa de reconstrucción

La representación matemáticamente del frente de onda reconstruido es:

$$U(x, y) = R(x, y)h(x, y) = R(x, y)[h_0 + \beta\tau I(x, y)]. \quad (2.20)$$

Posteriormente, tomando $I(x,y)$ de la ecuación 2.16 y reemplazando en la ecuación 2.20, nos queda que:

$$\begin{aligned}
U(x, y) &= |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}\{h_0 + \beta\tau[|o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2] \\
&\quad + |o(x, y)||r(x, y)|e^{i\phi_O(x,y)}e^{-i\phi_R(x,y)} + |r(x, y)||o(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}e^{-i\phi_O(x,y)}\} \\
&= |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}\{h_0 + \beta\tau|o(x, y)|^2 + \beta\tau|r(x, y)|^2 \\
&\quad + \beta\tau|o(x, y)||r(x, y)|e^{i\phi_O(x,y)}e^{-i\phi_R(x,y)} + \beta\tau|r(x, y)||o(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}e^{-i\phi_O(x,y)}\} \\
&= |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}h_0 + |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}\beta\tau|o(x, y)|^2 + |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}\beta\tau|r(x, y)|^2 \\
&\quad + |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}\beta\tau|o(x, y)||r(x, y)|e^{i\phi_O(x,y)}e^{-i\phi_R(x,y)} \\
&\quad + |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}\beta\tau|r(x, y)||o(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}e^{-i\phi_O(x,y)} \\
&= |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}h_0 + \beta\tau|o(x, y)|^2|r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)} + \beta\tau|r(x, y)|^2|r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)} \\
&\quad + \beta\tau|o(x, y)||r(x, y)|^2e^{i\phi_O(x,y)} \\
&\quad + \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)|e^{-i\phi_O(x,y)}(e^{i\phi_R(x,y)})^2 \\
&= |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}[h_0 + \beta\tau|r(x, y)|^2] \\
&\quad + \beta\tau|o(x, y)|^2|r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)} \\
&\quad + \beta\tau|o(x, y)||r(x, y)|^2e^{i\phi_O(x,y)} \\
&\quad + \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)|e^{-i\phi_O(x,y)}(e^{i\phi_R(x,y)})^2.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Reescribiendo cada término reconstruido como contribuciones individuales u_1, u_2, u_3 y u_4 , nos queda $U(x, y)$ como:

$$U(x, y) = u_1(x, y) + u_2(x, y) + u_3(x, y) + u_4(x, y), \tag{2.23}$$

donde:

$$u_1(x, y) = |r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}[h_0 + \beta\tau|r(x, y)|^2], \tag{2.24}$$

$$u_2(x, y) = \beta\tau|o(x, y)|^2|r(x, y)|e^{i\phi_R(x,y)}, \tag{2.25}$$

$$u_3(x, y) = \beta\tau|o(x, y)||r(x, y)|^2e^{i\phi_O(x,y)}, \tag{2.26}$$

y

$$u_4(x, y) = \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)|e^{-i\phi_O(x,y)}(e^{i\phi_R(x,y)})^2, \quad (2.27)$$

y en donde cada contribución del campo reconstruido, puede ser descrito como:

- u_1 es el haz de referencia atenuado o transmitido a través del holograma.
- u_2 es una aureola de luz generada por la incidencia del haz de referencia en el holograma.
- u_3 es una onda igual a la onda objeto, pero como es multiplicada por un factor constante en su amplitud, produce una imagen virtual.
- u_4 es la imagen conjugada (imagen real).

u_1 y u_2 son ondas de luz sin difractar y pasan a través del holograma, generando el denominado orden cero [47].

2.4 Interferometría Holográfica

La holografía hace posible el grabado de un frente de onda, y posteriormente su reconstrucción. Por otro lado, la interferometría holográfica (IH), hace uso de la holografía para comparar interferométricamente dos o más frentes de ondas que se separaron originalmente en el espacio o tiempo, o inclusive para comparar frentes de ondas con diferentes longitudes de onda [16]. Existen dos tipos de Interferometría holográfica: la de tiempo real y la de doble exposición.

2.4.1 Interferometría Holográfica de tiempo real

En la interferometría holográfica digital solo se graba un holograma proveniente del objeto en su estado inicial. Luego, para la reconstrucción del frente de onda grabado, el holograma se vuelve a colocar en su posición original en el mismo sistema óptico utilizado para su grabación y se ilumina con el haz de referencia. Ahora, si la forma del objeto cambia ligeramente, la onda objeto transmitida directamente interferirá con la onda objeto reconstruida y producirá un patrón de interferencia.

En la Figura 2.10 [48], se muestra un esquema de interferometría holográfica de tiempo real, en donde para la etapa de grabado se omite el holograma que se representa por el número 4, y para el caso de la reconstrucción se obstruye el haz de objeto representado por el número 7.

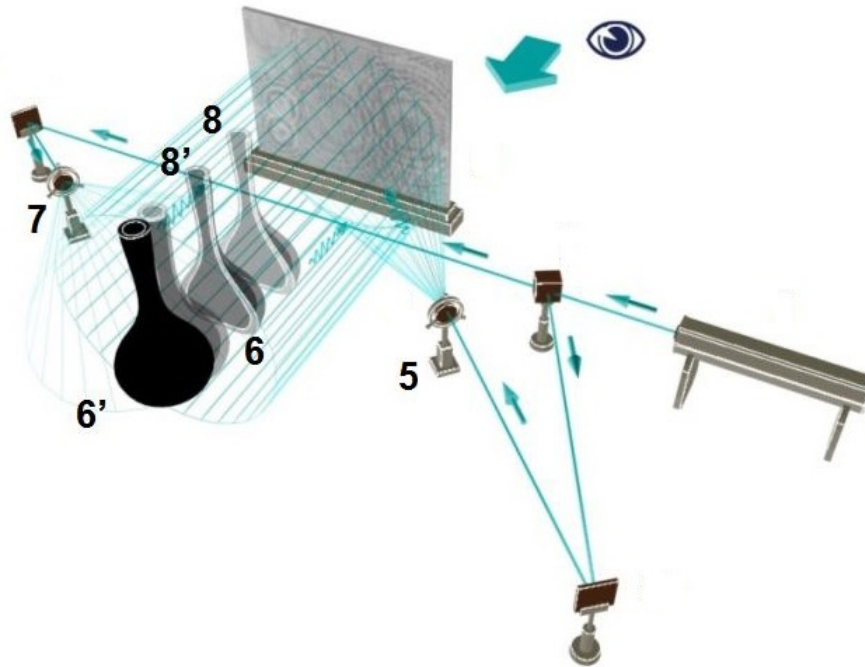


Figura 2.10 Interferometría holográfica de tiempo real

2.4.2 Interferometría Holográfica de doble exposición

En la interferometría holográfica de doble exposición, es posible grabar dos hologramas en la misma placa fotográfica; uno contiene el objeto en su estado inicial, y el otro contiene el objeto en un estado en el que sufrió algún cambio físico. Cuando el holograma es iluminado, se genera un patrón de interferencia que revela los cambios físicos del objeto.

En este tipo de IH, profundizaremos un poco más con su representación matemática, dado que, este fue el implementado en esta investigación.

Para el grabado del primer holograma con el objeto en su estado inicial, procederemos con lo visto en la subsección 2.3.1.2, y como se observa en la Figura 2.11.

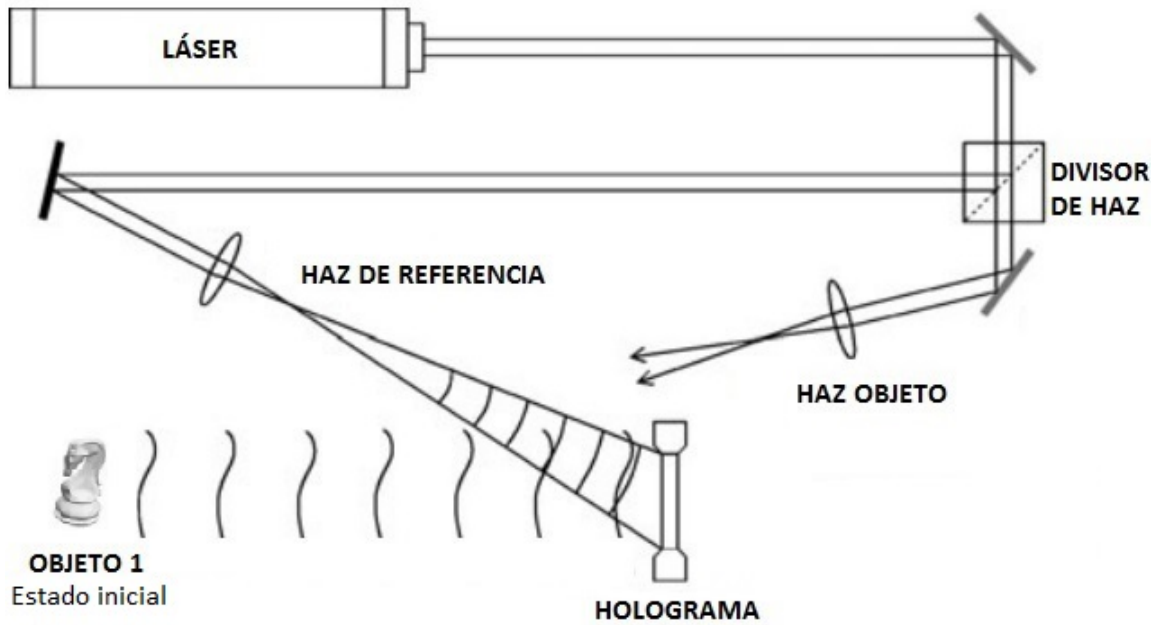


Figura 2.11 Etapa de grabado con el objeto en su estado inicial

El frente de onda proveniente del objeto en su estado inicial, está dado matemáticamente por:

$$O_1(x, y) = |o_1(x, y)|e^{i\phi_{O_1}(x, y)}, \quad (2.28)$$

y el haz de referencia como:

$$R(x, y) = |r(x, y)|e^{-2\pi i(f_{px}x + f_{py}y)} \quad (2.29)$$

y cuya intensidad en la placa fotográfica viene dada por:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= |O_1(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= |o_1(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 \\ &\quad + 2|o_1(x, y)||r(x, y)| \cos(\phi_{O_1}(x, y) + 2\pi i(f_{px}x + f_{py}y)). \end{aligned} \quad (2.30)$$

Posteriormente, para el grabado del segundo holograma, el objeto ha sido modificado como se ve en la Figura 2.12, y su frente de onda se representa matemáticamente como:

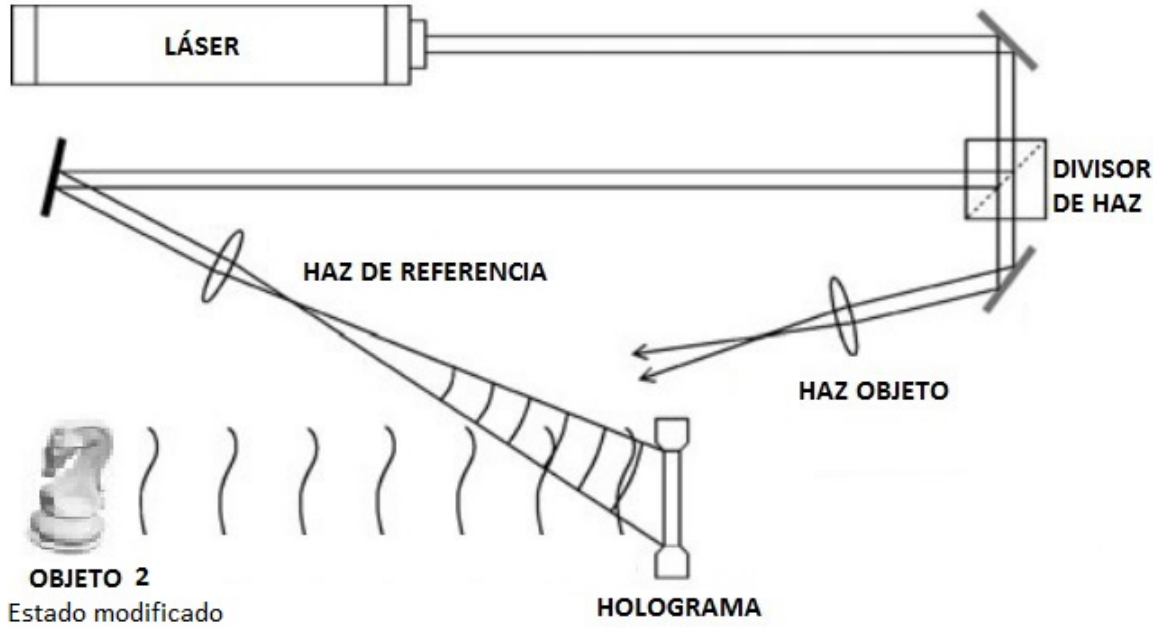


Figura 2.12 Etapa de grabado con el objeto en un estado modificado

$$O_2(x, y) = |o_2(x, y)|e^{i\phi_{O_2}(x, y)}, \quad (2.31)$$

donde ϕ_{O_2} se puede representar en base al estado del objeto inicial ϕ_{O_1} y el cambio de estado que sufrió $\Delta\phi_O$, como $\phi_{O_2} = \phi_{O_1} + \Delta\phi_O$, quedándonos que:

$$O_2(x, y) = |o_2(x, y)|e^{i[\phi_{O_1} + \Delta\phi_O]}. \quad (2.32)$$

De igual forma, el haz de referencia se representa matemáticamente:

$$R(x, y) = |r(x, y)|e^{-2\pi i(f_{px}x + f_{py}y)} \quad (2.33)$$

La intensidad creada por O_2 en la misma placa fotográfica es:

$$\begin{aligned} I_2(x, y) &= |O_2(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= |o_2(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$+ 2|o_2(x, y)||r(x, y)| \cos(\phi_{O_1} + \Delta\phi_O + 2\pi i(f_{px}x + f_{py}y)). \quad (2.35)$$

Ahora, los dos frentes de ondas fueron grabados en el mismo arreglo óptico, así que si poseen la misma amplitud, se puede resumir los términos o_1 y o_2 a solo o , y nos quedaría que la intensidad resultante generada por los dos frentes de onda en la placa fotográfica es:

$$\begin{aligned}
 I_{1+2}(x, y) &= |O_1(x, y) + O_2(x, y)|^2 \\
 &= (|o_1(x, y)|e^{i\phi_{o_1}(x, y)} + |o_2(x, y)|e^{i[\phi_{o_1} + \Delta\phi_o]}) \\
 &\quad \times (|o_1(x, y)|e^{-i\phi_{o_1}(x, y)} + |o_2(x, y)|e^{-i[\phi_{o_1} + \Delta\phi_o]}) \\
 &= |o_1(x, y)|^2 + |o_2(x, y)|^2 \\
 &\quad + 2|o_1(x, y)||o_2(x, y)| \cos(\Delta\phi_o) \\
 &= 2|o(x, y)|^2 + 2|o(x, y)|^2 \cos(\Delta\phi_o) \\
 &= 2|o(x, y)|^2 [1 + \cos(\Delta\phi_o)].
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

Recordando la Ecuación 2.18 de la subsección 2.3.1.2, nos queda que la amplitud de transmisión es:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I_{1+2}(x, y). \tag{2.37}$$

De igual forma, se repite el proceso de la subsección 2.3.1.2, para la reconstrucción del frente de onda que contiene la imagen con la diferencia de fase de los dos objetos.

2.5 Holografía Digital

La holografía digital, además de registrar y reconstruir, abre la posibilidad de almacenar digitalmente los hologramas, haciendo uso de dispositivos electrónicos como los CCD (Charge-Coupled Device), los cuales son sensibles a la luz y almacenan las imágenes o en este caso los hologramas en forma de matrices, que son almacenadas en computadores. Abriendo así la posibilidad de reconstruir matemáticamente los frentes de onda objeto, y dejando de lado el uso de placas fotográficas y los procesos químicos de revelado.

Por lo cual, para la etapa de grabado utilizaríamos un esquema como el de la Figura 2.13.

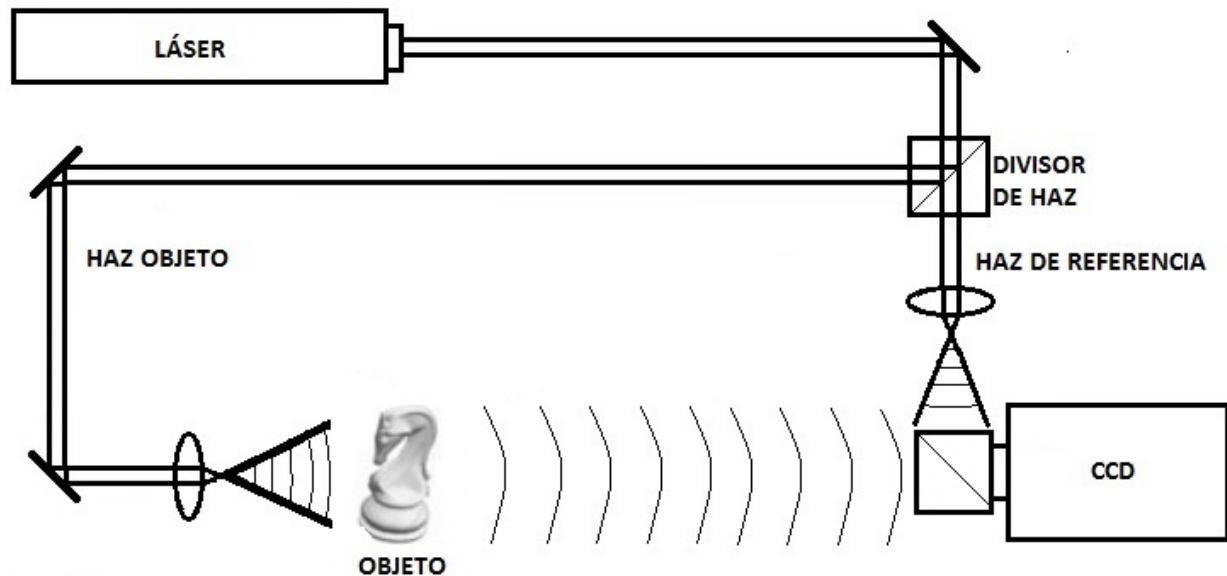


Figura 2.13 Etapa de grabado con el objeto en su estado inicial

La representación matemática sería igual a la analizada en la subsección anterior, solo que ya no calcularíamos la amplitud de transmisión. Dado que el holograma será grabado por un CCD que nos proporcionará en un ordenador la matriz numérica de dicha imagen.

Por otro lado, el proceso de reconstrucción si cambia significativamente. En la holografía digital el campo óptico es reconstruido utilizando las aproximaciones de difracción. Quedándonos la intensidad total del campo óptico reconstruido como:

$$I(x, y) = |U_r(x', y')|^2, \quad (2.38)$$

y la fase de U_r se calcula como:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{Re[U_r(x', y')]}{Im[U_r(x', y')]}, \quad (2.39)$$

donde $Re[]$ es la parte real y $Im[]$ la parte imaginaria de U_r .

2.6 Método de la Transformada de Fourier para la recuperación de fase

En la Interferometría Holográfica Digital (IHD), se reconstruye de cada holograma digital el frente de onda objeto, y de allí se calcula la diferencia de fase entre el objeto en un estado inicial y un estado modificado, utilizando la Ecuación 2.39 para calcular ϕ_{O_1} y ϕ_{O_2} a partir de los frentes de ondas reconstruidos O_1 y O_2 , que se respresentan matemáticamente como:

$$O_1(x, y) = |o_1(x, y)|e^{i\phi_{O_1}(x, y)}, \quad (2.40)$$

y

$$O_2(x, y) = |o_2(x, y)|e^{i[\phi_{O_1}(x, y) + \Delta\phi_O(x, y)]}, \quad (2.41)$$

donde las intensidades creadas por O_1 , O_2 , se representarán matemáticamente de otra forma, con el fin de reconocer las modificaciones que se dan en la intensidad por efectos del ambiente, ruidos, iluminación y bajas frecuencias. De tal forma que:

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi_{O_1}(x, y) + 2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (2.42)$$

y

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi_{O_1}(x, y) + \Delta\phi_O(x, y) + 2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (2.43)$$

donde a representa las variaciones de irradiancia indeseadas, b la iluminación proveniente del objeto, ϕ el término de fase del haz objeto en el holograma, $\Delta\phi_O(x, y)$ la diferencia de fase entre los estados del objeto, f_{px} y f_{py} son frecuencias portadoras.

Recordemos que todos los detectores o materiales de grabado como las películas fotográficas, solo graban intensidades y la fase se pierde en el proceso de grabado. Sin embargo, la holografía nos permite recuperar la fase de los frentes de ondas a través de sus esquemas ópticos y el uso de métodos como el de la Transformada de Fourier, que se aplica en cada holograma digital de la siguiente manera:

1. A cada holograma digital grabado se le aplica la Transformada de Fourier bidimensional, obteniéndose así un espectro trimodal de Fourier en el espacio de frecuencias.

2. Se aplica un filtro pasabanda en el espectro de Fourier, donde se selecciona uno de los dos lóbulos. Los cuales conllevan la misma información del frente de onda objeto.
3. El lóbulo seleccionado se traslada al origen.
4. Aplicamos la Transformada inversa de Fourier.
5. Calculamos la fase del holograma.

Ahora bien, haremos este procedimiento para cada patrón de interferencia por separado. En el caso del primer patrón de interferencia $I_1(x, y)$ de la Ec. 2.42, se reescribirá por conveniencia como $g_1(x, y)$ de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} g_1(x, y) &= a(x, y) + \frac{1}{2}b(x, y)e^{i\phi_{O_1}(x, y)}e^{i2\pi(f_{px}x+f_{py}y)} + \frac{1}{2}b(x, y)e^{-i\phi_{O_1}(x, y)}e^{-i2\pi(f_{px}x+f_{py}y)} \\ &= a(x, y) + c_1(x, y)e^{i2\pi(f_{px}x+f_{py}y)} + c_1^*(x, y)e^{-i2\pi(f_{px}x+f_{py}y)}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Continuando con el procedimiento descrito, a este patrón de interferencia se le aplica la Transformada de Fourier, quedándonos el espectro de Fourier (Ver Figura 2.14) de la siguiente manera:

$$G_1(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C_1(f_x - f_{px}, f_y - f_{py}) + C_1^*(f_x + f_{px}, f_y + f_{py}), \quad (2.45)$$

donde las letras capitales denotan la Transformada de Fourier, $G_1(f_x, f_y)$ es una distribución hermitiana en el dominio de las frecuencias, f_{py} es la frecuencia portadora en el eje f_y , $A(f_x, f_y)$ es el orden cero que contiene todas las variaciones de bajas frecuencias del fondo, $C_1(f_x - f_{px}, f_y - f_{py})$ y $C_1^*(f_x + f_{px}, f_y + f_{py})$ son lóbulos, y ambos contienen la misma información del frente de onda objeto, solo que uno es el conjugado complejo del otro, y f_{px} es la frecuencia portadora que separa los lóbulos del orden cero,

Luego, como el segundo y tercer paso nos indica, se aplica un filtro pasabanda a uno de los lóbulos, y éste se traslada al origen como se ve en la Figura 2.15.

El siguiente paso es aplicar la Transformada inversa de Fourier a $C_1(f_x, f_y)$ para obtener $c_1(x, y)$, y por último calcular la fase de la siguiente forma:

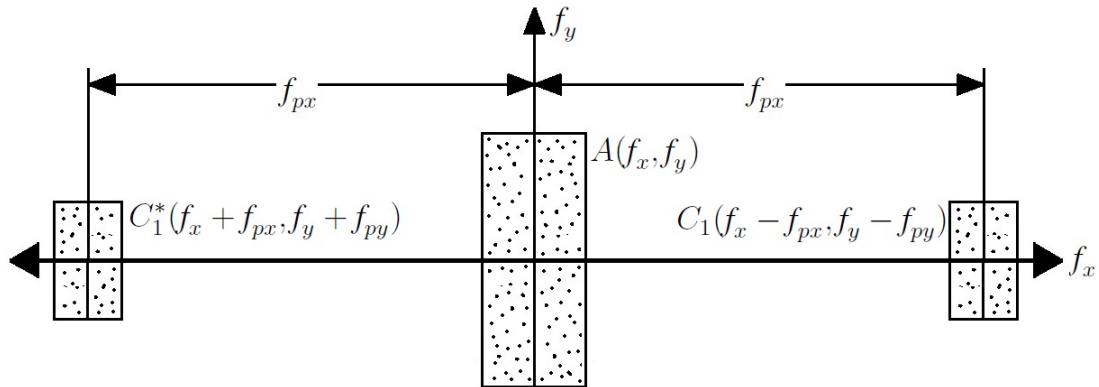


Figura 2.14 Espectro de Fourier

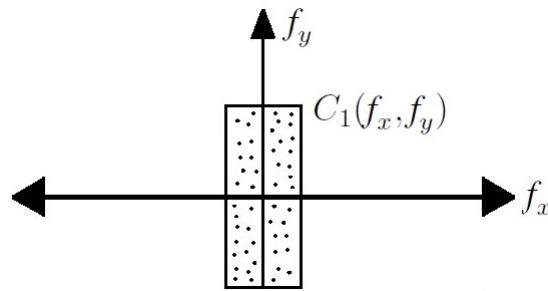


Figura 2.15 Lóbulo seleccionado y trasladado al origen

$$\phi_{O_1}(x, y) = \arctan \left(\frac{\text{Im}[c_1(x, y)]}{\text{Re}[c_1(x, y)]} \right). \quad (2.46)$$

De igual forma se hace el mismo procedimiento para $I_2(x, y)$, y se obtiene que $\phi_{O_1} + \Delta\phi_O$ es:

$$\phi_{O_1}(x, y) + \Delta\phi_O(x, y) = \arctan \left(\frac{\text{Im}[c_2(x, y)]}{\text{Re}[c_2(x, y)]} \right). \quad (2.47)$$

La diferencia de fase entre el objeto en su estado inicial y su estado modificado está dado por:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_O(x, y) &= \phi_{O_1}(x, y) + \Delta\phi_O(x, y) - \phi_{O_1}(x, y) \\ &= \arctan \left(\frac{\text{Im}[c_2(x, y)]}{\text{Re}[c_2(x, y)]} \right) - \arctan \left(\frac{\text{Im}[c_1(x, y)]}{\text{Re}[c_1(x, y)]} \right). \end{aligned} \quad (2.48)$$

Quedándonos:

$$\Delta\phi_O(x, y) = \arctan \left(\frac{Im[c_2(x, y)]Re[c_1(x, y)] - Im[c_1(x, y)]Re[c_2(x, y)]}{Re[c_2(x, y)]Re[c_1(x, y)] + Im[c_2(x, y)]Im[c_1(x, y)]} \right). \quad (2.49)$$

Debido al uso de la función arctan, se tiene una diferencia de fase limitada entre π y $-\pi$.

Lo que se conoce como **mapa de fase envuelto**.

Capítulo 3

Interferometría Holográfica Digital (IHD) en muestras líquidas

La IHD es una técnica óptica capaz de medir variaciones de caminos ópticos, debido a cambios de dimensiones en cuerpos opacos o a cambios del índice de refracción en objetos translucidos, donde se le conoce como longitud de camino óptico (OPL) a la distancia L de trayectoria de la luz al pasar por un medio con índice de refracción n . Estas variaciones de caminos ópticos se representan matemáticamente como:

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [OPL(x, y)], \quad (3.1)$$

o

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n(x, y)\Delta L(x, y)], \quad (3.2)$$

donde $\Delta n(x, y)$ es el cambio del índice de refracción, $\Delta L(x, y)$ es la longitud por donde pasa la luz y $[\Delta n(x, y)L(x, y)]$ se define como la longitud de camino óptico.

Por otro lado, la IHD, es una técnica que no requiere de contacto físico con el objeto a estudiar, no es invasiva, no es destructiva con las muestras a estudiar, es de campo completo y de muy alta sensibilidad.

3.1 Variaciones de índice de refracción usando IHD

Se sabe que la IHD compara interferométricamente dos o más frentes de ondas, por lo tanto, si se desea medir la variación del índice de refracción entre dos muestras líquidas m_1 y m_2 , es necesario grabar los hologramas de cada muestra líquida.

Para el caso de la primera muestra, que se encuentra en un estado inicial m_1 (Ver Figura 3.1 parte a), se graba un primer holograma, en el cual se representa el frente de onda de la siguiente manera:

$$U_{m_1}(x, y) = u_{m_1}(x, y)e^{[\frac{2\pi i}{\lambda}n_{m_1}(x,y)L_{m_1}(x,y)]}. \quad (3.3)$$

Posteriormente, se graba un segundo holograma con la muestra m_2 (Ver Figura 3.1 parte b), que presenta un cambio en sus propiedades físicas en comparación con la primera muestra. En el cual se describe el segundo frente de onda como:

$$U_{m_2}(x, y) = u_{m_2}(x, y)e^{[\frac{2\pi i}{\lambda}n_{m_2}(x,y)L_{m_2}(x,y)]}. \quad (3.4)$$

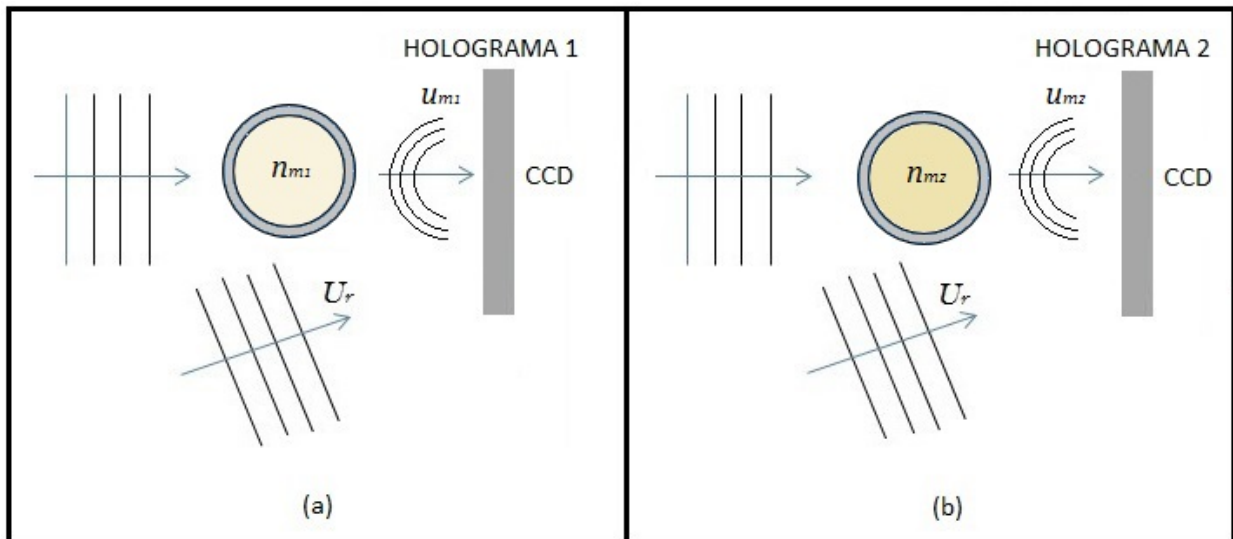


Figura 3.1 (a) Grabado del primer holograma con la muestra en un estado inicial, (b) Grabado del segundo holograma donde la muestra ha sido modificada.

Como se ha visto en el capítulo anterior, la IHD calcula variaciones de fase entre dos muestras, por lo tanto se puede calcular la diferencia de fase entre las muestras m_1 y m_2 , relacionada al cambio de longitud del camino óptico como:

$$\Delta\phi_{m_2-m_1}(x, y) = \phi_{m_2}(x, y) - \phi_{m_1}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}[\Delta n_{m_2-m_1}(x, y)][\Delta L_{m_2-m_1}(x, y)]. \quad (3.5)$$

En el caso de esta investigación, para contener muestras líquidas se utiliza un tubo de vidrio como el que se ve en la Figura 3.2, por lo cual, la longitud de camino óptico (OPL) esta dada por:

$$OPL(x, y) = \{[d_e(x, y) - d_i(x, y)][n_v(x, y)] + [d_i(x, y)][n_m(x, y)]\}, \quad (3.6)$$

donde d_e es el diámetro exterior, d_i el diámetro interno, n_v el índice de refracción del vidrio y n_m el índice de refracción de la muestra.

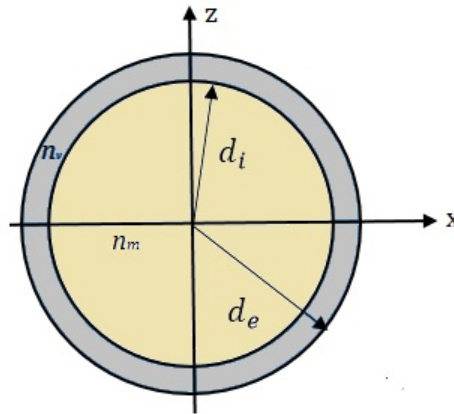


Figura 3.2 Vista superior del tubo de vidrio

Ahora bien, conociendo el OPL para el caso del tubo de vidrio, se procede al cálculo de las variaciones del índice de refracción, reescribiendo así el término de fase generado por la muestra m_1 y m_2 de la siguiente manera:

$$\phi_{m_1}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \{[d_e(x, y) - d_i(x, y)][n_v(x, y)] + [d_i(x, y)][n_{m_1}(x, y)]\}, \quad (3.7)$$

y

$$\phi_{m_2}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \{ [d_e(x, y) - d_i(x, y)][n_v(x, y)] + [d_i(x, y)][n_{m_2}(x, y)] \}. \quad (3.8)$$

Pero como se tiene un sistema óptico donde se considera que el tubo de vidrio permanece fijo en la misma posición y constante en sus dimensiones L , entonces, las ecuaciones 3.9 y 3.10 quedan de la siguiente forma:

$$\phi_{m_1}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \{ [d_i(x, y)][n_{m_1}(x, y)] \}, \quad (3.9)$$

y

$$\phi_{m_2}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \{ [d_i(x, y)][n_{m_2}(x, y)] \}. \quad (3.10)$$

Quedando así la diferencia de fase entre las dos muestras m_1 y m_2 como:

$$\Delta\phi_{m_2-m_1}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n_{m_2-m_1}(x, y)][d_i(x, y)]. \quad (3.11)$$

Observando la ecuación 3.11, se nota que ésta depende del valor del diámetro interno $d_i(x, y)$, una solución sería medirlo con cualquier instrumento de medición, pero estamos hablando de una técnica de campo completo y de alta sensibilidad, y se sabe que el tubo presentan imperfecciones a lo largo de su morfología que se deben a su proceso de fabricación, por lo cual obtendremos una diferencia de fase de referencia, donde n_{m_0} y n_{m_1} sean conocidos, de tal manera que al relacionarlos con la Ec. 3.11 el valor de $d_i(x, y)$ se conozca y pueda ser eliminado. Esta diferencia de fase de referencia se representa matemáticamente como:

$$\Delta\phi_{m_1-m_0}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n_{m_1-m_0}(x, y)][d_i(x, y)]. \quad (3.12)$$

Luego, despejando $d_i(x, y)$ de la Ec. 3.12 tenemos que:

$$d_i(x, y) = \frac{\lambda[\Delta\phi_{m_1-m_0}(x, y)]}{2\pi[\Delta n_{m_1-m_0}(x, y)]}, \quad (3.13)$$

y reemplazando en la Ec. 3.11 nos queda que:

$$\Delta\phi_{m_2-m_1}(x, y) = \frac{[\Delta n_{m_2-m_1}(x, y)][\Delta\phi_{m_1-m_0}(x, y)]}{[\Delta n_{m_1-m_0}(x, y)]}. \quad (3.14)$$

Quedandonos la diferencia de índice de refracción como:

$$\Delta n_{m_2-m_1}(x, y) = \frac{[\Delta\phi_{m_2-m_1}(x, y)][\Delta n_{m_1-m_0}(x, y)]}{[\Delta\phi_{m_1-m_0}(x, y)]}. \quad (3.15)$$

Ahora, el único valor que se desconoce es el de n_{m_2} , así que despejándolo de la Ec. 3.15 se conocerá el valor del índice de refracción de la muestra m_2 , descrito como:

$$n_{m_2}(x, y) = \frac{[\Delta\phi_{m_2-m_1}(x, y)][\Delta n_{m_1-m_0}(x, y)]}{[\Delta\phi_{m_1-m_0}(x, y)]} + n_{m_1}(x, y). \quad (3.16)$$

3.2 Cálculo de diferencias de fase mediante una aproximación a la región central

Cuando se tiene un tubo de vidrio cilíndrico con una muestra líquida dentro de él, su longitud de camino óptico se comporta como una elipse (Ver Figura 3.3). La elipse descrita por las longitudes de camino óptico, dependerá de las propiedades físicas de la solución. Esta forma geométrica se da porque la luz viaja más rápido en los extremos del tubo, y más lento cuando pasa por el medio de este, debido a que, cuando la luz pasa por el medio del tubo, recorre una mayor distancia. Por tal motivo, la diferencia punto a punto entre dos elipses generará una nueva elipse correspondiente a la diferencia de fase entre dos soluciones líquidas.

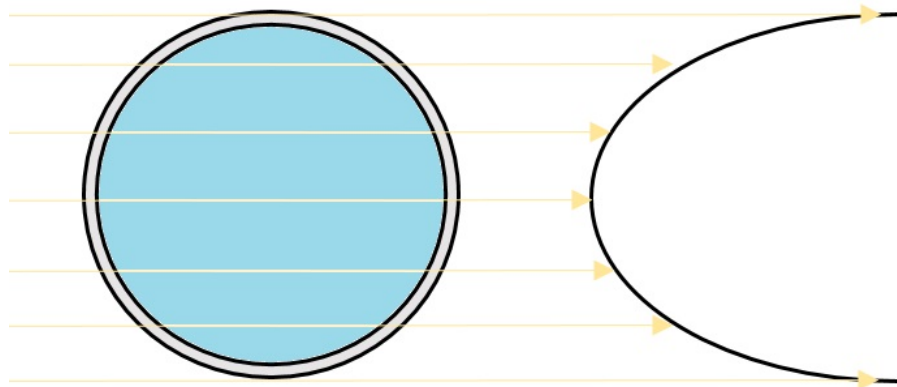


Figura 3.3 Longitud de camino óptico para un tubo de vidrio cilíndrico con una muestra líquida.

Ahora bien, como este comportamiento elíptico es regular, entonces es posible conocer el comportamiento de fase, independientemente de las propiedades físicas de cualquier mezcla líquida a analizar.

En la sección anterior se mostraba la manera de calcular la diferencia de fase entre una sustancia conocida y una desconocida, en donde se requería del uso de otra diferencia de fase de referencia. Pero, si se reconsidera que los comportamientos o patrones de fase son de algún modo conocidos y únicos, entonces, se puede hacer una aproximación a su diferencia de fase sin la necesidad de implementar la fase de referencia. Además de que es posible el cálculo de diferencias de fase entre sustancias que sobrepasa los rangos de sensibilidad del medio de grabación.

Como se vio en la sección 2.6, para la recuperación de fase de un holograma se aplicaba el método de la Transformada de Fourier. Por lo cual, la diferencia de fase entre dos holograma es visualizada en un mapa de fase envuelto bidimensional (ver Figura 3.4). Siendo un mapa de fase envuelto, el mapeo de la diferencia de fase entre un rango de $-\pi$ a π , debido a la naturaleza de la función \arctan .

Luego, cuando la diferencia de fase es procesada mediante un algoritmo de desenvolvimiento, se obtiene una distribución de fase como la que se ve en la Figura 3.5.

Como se mencionaba anteriormente, se espera que la diferencia de fase tenga una forma elíptica, y por ende un patrón envuelto bidimensional característico a cada elipse. De tal manera, que con solo conocer una fracción de la diferencia de fase obtenida experimentalmente (Ver el recuadro amarillo de la Figura 3.4 se podrá utilizar un algoritmo de simulación que genera una diferencia fase ideal hecha con valores teóricos conocidos, con el fin de determinar y buscar la diferencia de fase experimental a partir de la correlación con la diferencia de fase simulada. Permitiendo así con esta aproximación, conocer los parámetros físicos de la sustancia desconocida.

El algoritmo correlacionará la región central (Ver el recuadro amarillo de la Figura 3.4), que generalmente es la más definida de los mapas de fase envuelto experimentales, con la diferencia de fase simulada. Por lo cual, en esta región central no deben presentarse grandes discontinuidades o altas frecuencias espaciales.

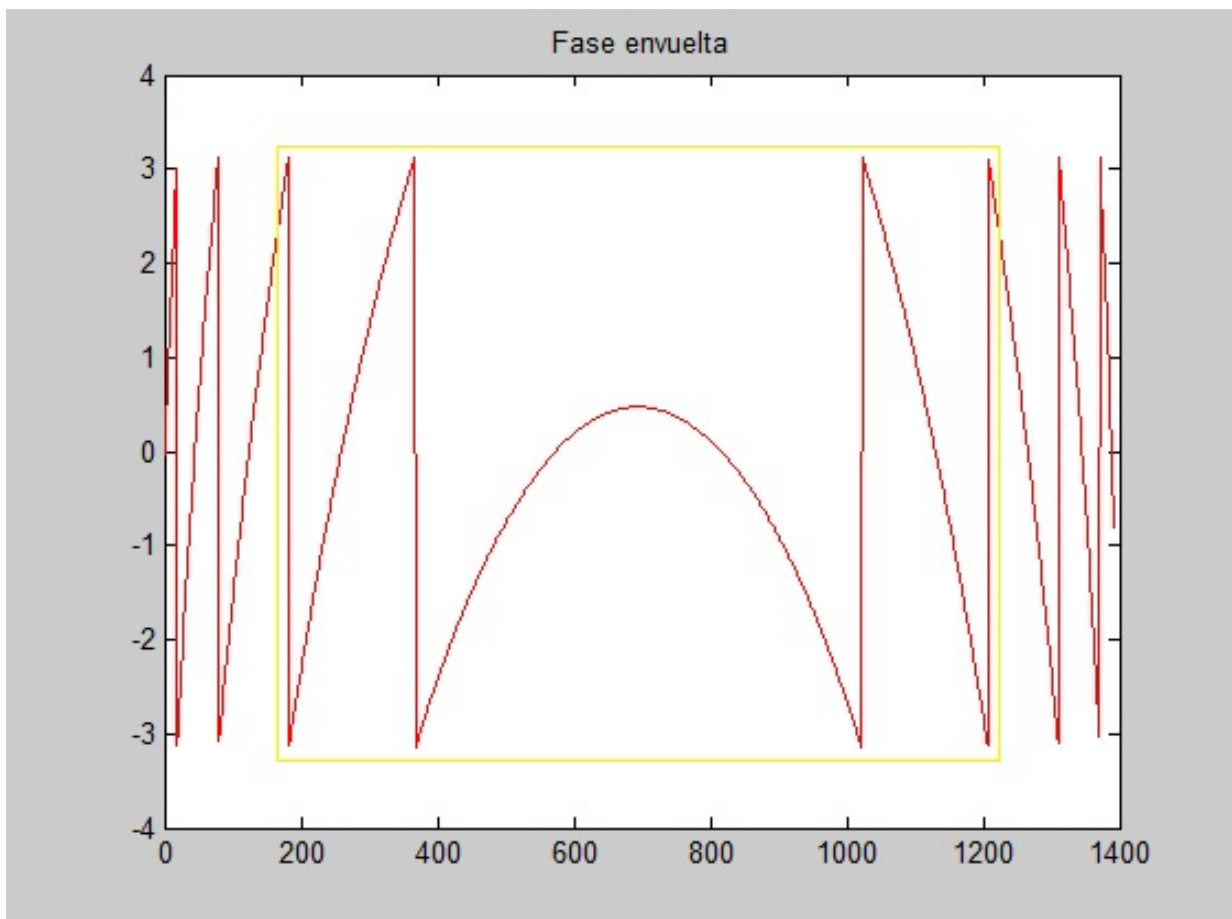


Figura 3.4 Mapa de fase envuelto

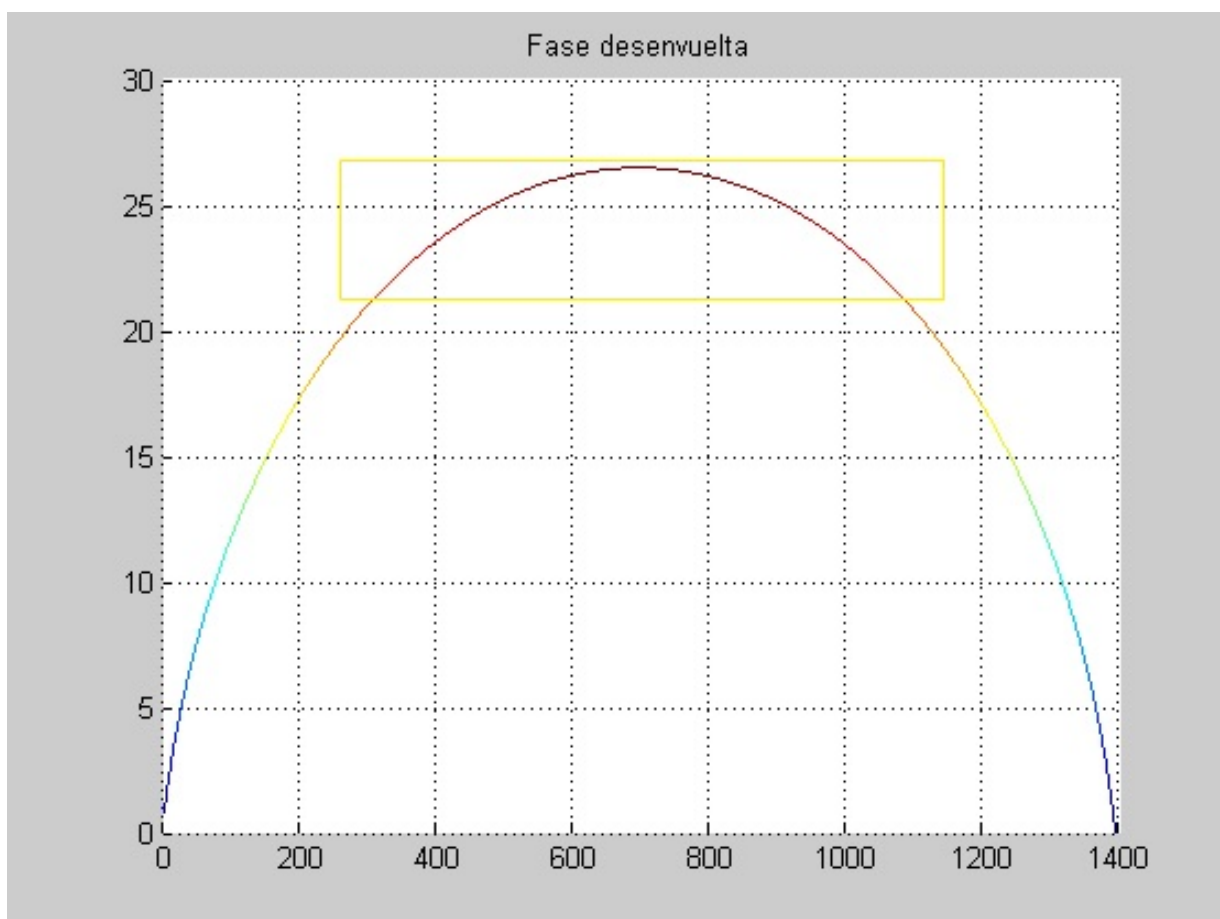


Figura 3.5 Distribución de fase

Capítulo 4

Trabajo realizado y resultados

4.1 Diseño del sistema óptico

Para esta investigación, se diseñó un sistema óptico capaz de detectar variaciones de concentraciones en gasolinas, pero que además fuera de fácil implementación, de alta exactitud y mucho más compacto que otros sistemas ópticos.

En la Figura 4.1. se muestra el esquema del sistema óptico. En este, sus componentes fueron elegidas con la finalidad de obtener un sistema óptico compacto. El sistema consta de un láser Diode Pumped CrystaLaser de estado sólido con una longitud de onda (λ) de $532nm$ y una potencia de $200mW$, que nos genera una haz de luz monocromático y se divide en dos, por un divisor de haz plano BS_1 . Uno de estos (el haz de referencia), es acoplado por FC_1 a una fibra monomodo $SSMF_1$ que llevará el haz de luz al divisor de haz cubico BS_2 que se encuentra al frente del CCD. Por otro lado, el otro haz de luz dividido (haz objeto) se acopla por FC_2 a una fibra multimodo $SSMF_2$ y se expande a través de un objetivo de microscopio MO que hace incidir el haz de luz sobre un difusor D_1 . Posteriormente, este pasa por el tubo de vidrio que está en posición vertical, donde se tendrán las muestras de gasolina. Luego el haz objeto dispersado por el objeto (tubo de vidrio con las muestras) pasara a través de la apertura AP , que se posiciona delante de un lente biconvexo con foco f de $50mm$, enviando así el haz objeto al divisor de haz cúbico BS_2 , donde se interfieren el haz objeto y el haz de referencia, generando así un holograma que es grabado en el CCD.

En este diseño, la apertura AP mejora la recolección de luz, permite obtener un mayor número de frecuencias espaciales y además facilita seleccionar la frecuencia portadora deseada, que separa las imágenes del orden cero en el espectro de Fourier. También se usa un difusor D para descomponer el haz objeto antes de llegar a la muestra, porque el tubo de vidrio empleado podrá funcionar como una lente convergente y/o divergente que genere aberraciones ópticas. La muestra es inyectada con una bomba de infusión para garantizar una velocidad de inyección constante y evitar así que el tubo se mueva, dado que hablamos de un sistema óptico que detecta variaciones del orden de la longitud de onda (nm).

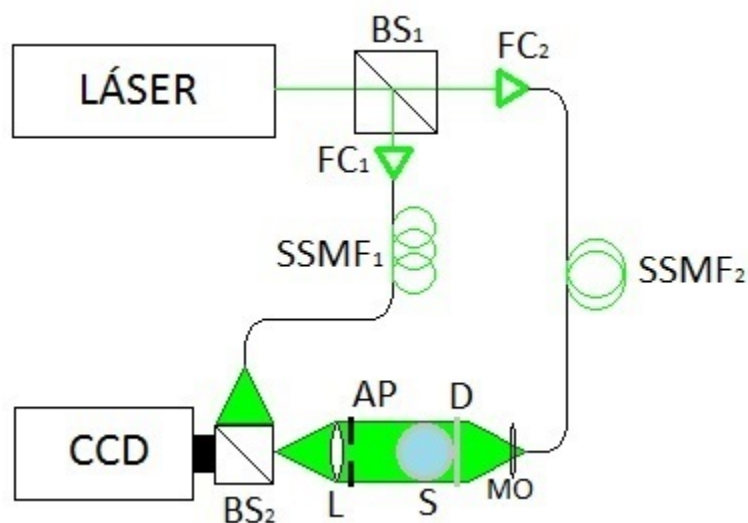


Figura 4.1 Esquema del Sistema óptico

En términos de dimensiones, el sistema quedó diseñado con las siguientes proporciones mostradas en las Tabla 4.1, 4.2.

Láser- BS_1	BS_1 - $SSMF_2$	$SSMF_2$	MO - D	D - S	S - L	L - BS_2	OPL Total
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
11.8	1.7	60.8	5.0	0.5	8.9	6.2	94.9

Tabla 4.1 Dimensiones del brazo haz objeto

Láser- BS_1	BS_1 - $SSMF_1$	$SSMF_1$	$SSMF_1$ - BS_2	OPL Total
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
11.8	7.7	69.0	6.3	94.8

Tabla 4.2 Dimensiones del brazo haz de referencia

4.1.1 Sistema óptico implementado en el laboratorio

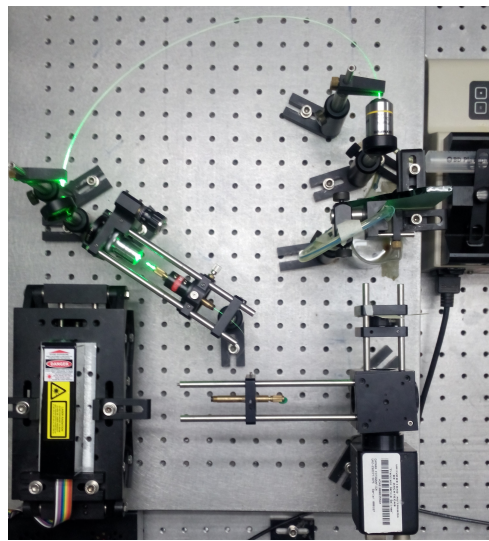


Figura 4.2 Vista superior del sistema óptico implementado

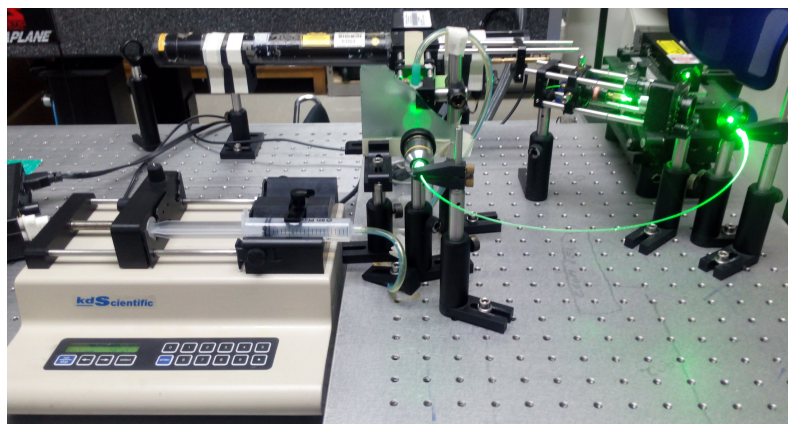


Figura 4.3 Vista frontal del sistema óptico implementado

4.2 Dispositivos utilizados

4.2.1 CCD

Se utiliza una cámara monocromática de $1392(H) \times 1040(V) @ 30fps$ Marca Jai, modelo Pulnix TM-1327GE Monochrome GigE Camera (Ver Figura 4.4).



Figura 4.4 CCD

4.2.2 Láser

Se utilizó un láser de estado sólido con una longitud de onda de $532nm$, y $200mW$ de potencia. Correspondiente al modelo GCL-200-S de la compañía CrystaLaser (Ver láser en la Figura 4.5).

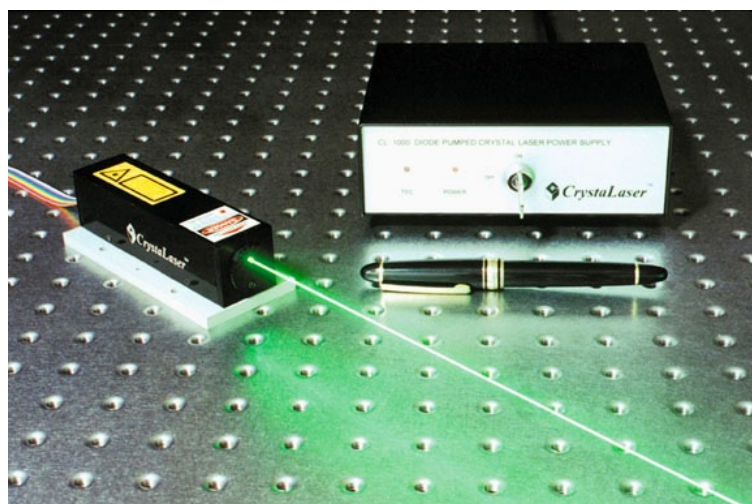


Figura 4.5 Láser

4.2.3 Bomba de infusión

Para la inyección de las muestras de gasolina, se utiliza una Bomba de infusión de la marca KD scientific, cuyo modelo corresponde a KDS200. (Ver Bomba de infusión en la Figura 4.6).



Figura 4.6 Bomba de infusión

4.2.4 Elementos ópticos

Todos los elementos ópticos como los divisores de haz BS_1 y BS_2 , el objetivo microscopio MO , el lente biconvexo L , la montura de lente, la fibra monomodo $SSMF_1$, la fibra multimodo $SSMF_2$, los postes y vastagos utilizados son de la marca Thorlabs.

4.3 Cálculo de las diferencias de fase de las muestras de Gasolina con parafina o etanol

Como se vio en la sección 2.6, para la recuperación de la fase, se usa el método de la transformada de Fourier. Por lo cual, se mostrará a continuación en la Figura 4.7, el proceso experimental realizado para obtener la diferencia de fase entre muestras a analizar depositadas en un tubo de vidrio.

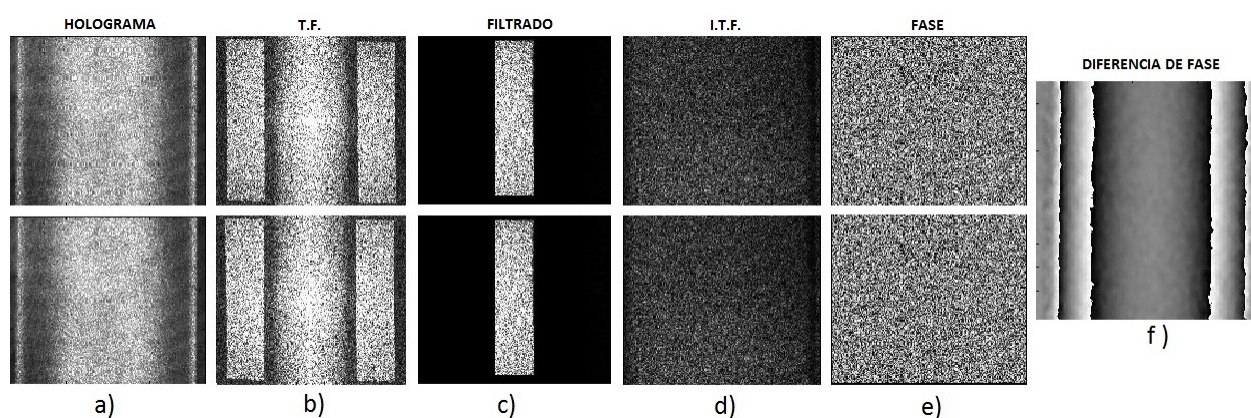


Figura 4.7 Proceso experimental para la obtención de la diferencia de fase. Donde a) son los hologramas correspondientes a la muestra 1 y 2, b) los espectros de Fourier, c) el filtrado de uno de los lóbulos del espectro de Fourier, d) la transformada inversa de Fourier, e) la fase y f) la diferencia de fase entre las dos muestras.

4.4 Calibración del sistema

Para calibrar y ver que el sistema funciona correctamente, se determinó una diferencia de fase de referencia entre agua destilada y 50ml agua destilada con 0.26700g de NaCl. Determinándose con el sistema óptico diseñado una diferencia de índice de refracción de 0.0009, implicando que el índice de refracción de solución de NaCl es de 1.3339 (Ver Figura 4.8, con la diferencia de fase). Lo cual, concuerda con lo visto en la literatura (Ver Referencia [49]).

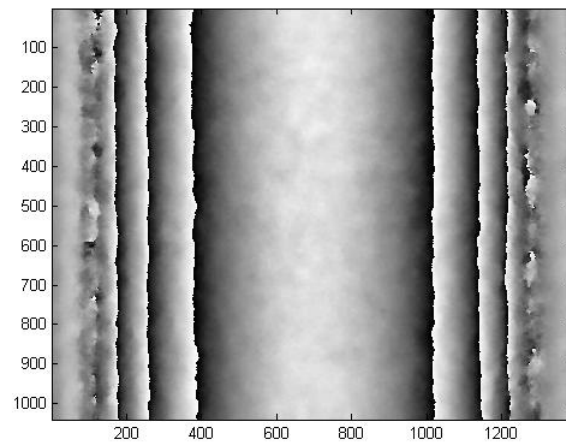


Figura 4.8 Diferencia de fase de referencia

Por otro lado, para calibrar el algoritmo de aproximación a la región central, se creó una simulación que genera una diferencia fase ideal (Ver Figura 4.9) hecha con valores teóricos conocidos, y está fue utilizada en el algoritmo de aproximación a la región central, coincidiendo con los valores teóricos.

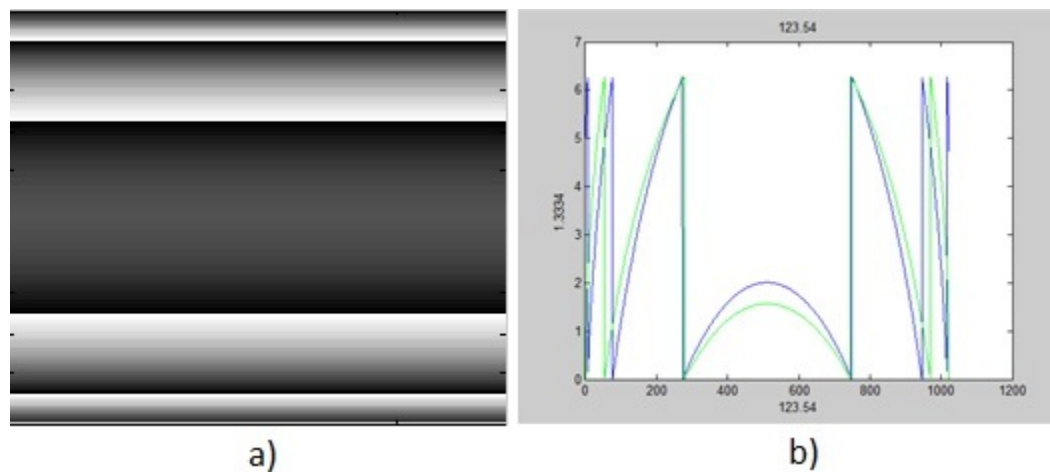


Figura 4.9 a) Simulación de diferencia de fase. b) Aproximación con la línea central

4.5 Muestras de gasolina con parafina

Como la finalidad de esta investigación es determinar si con la IHD se puede detectar variaciones de concentración en gasolinas, se busco sustancias miscibles con la gasolina, como lo es la parafina y el alcohol anhidro. Por lo cual, se realizaron muestras de gasolina Premium con determinadas cantidades de parafina comercial como se ve en la tabla 4.3.

Gasolina Premium (ml)	Parafina (g)
40	0.1000
40	0.1100
40	0.1200

Tabla 4.3 Muestras de gasolina Premium con parafina comercial

4.6 Concentraciones de Gasohol utilizadas

Para la preparación de las muestras de gasohol, se utilizó gasolina Premium con determinadas cantidades de alcohol anhidro como se ve en la Tabla 4.4.

Gasohol	Gasolina Premium (ml)	Alcohol etílico anhidro (ml)
E0.4	20	0.08
E0.5	20	0.10
E0.6	20	0.12
E0.7	20	0.14

Tabla 4.4 Composición de las muestras de Gasohol

4.7 Diferencias de fase calculadas

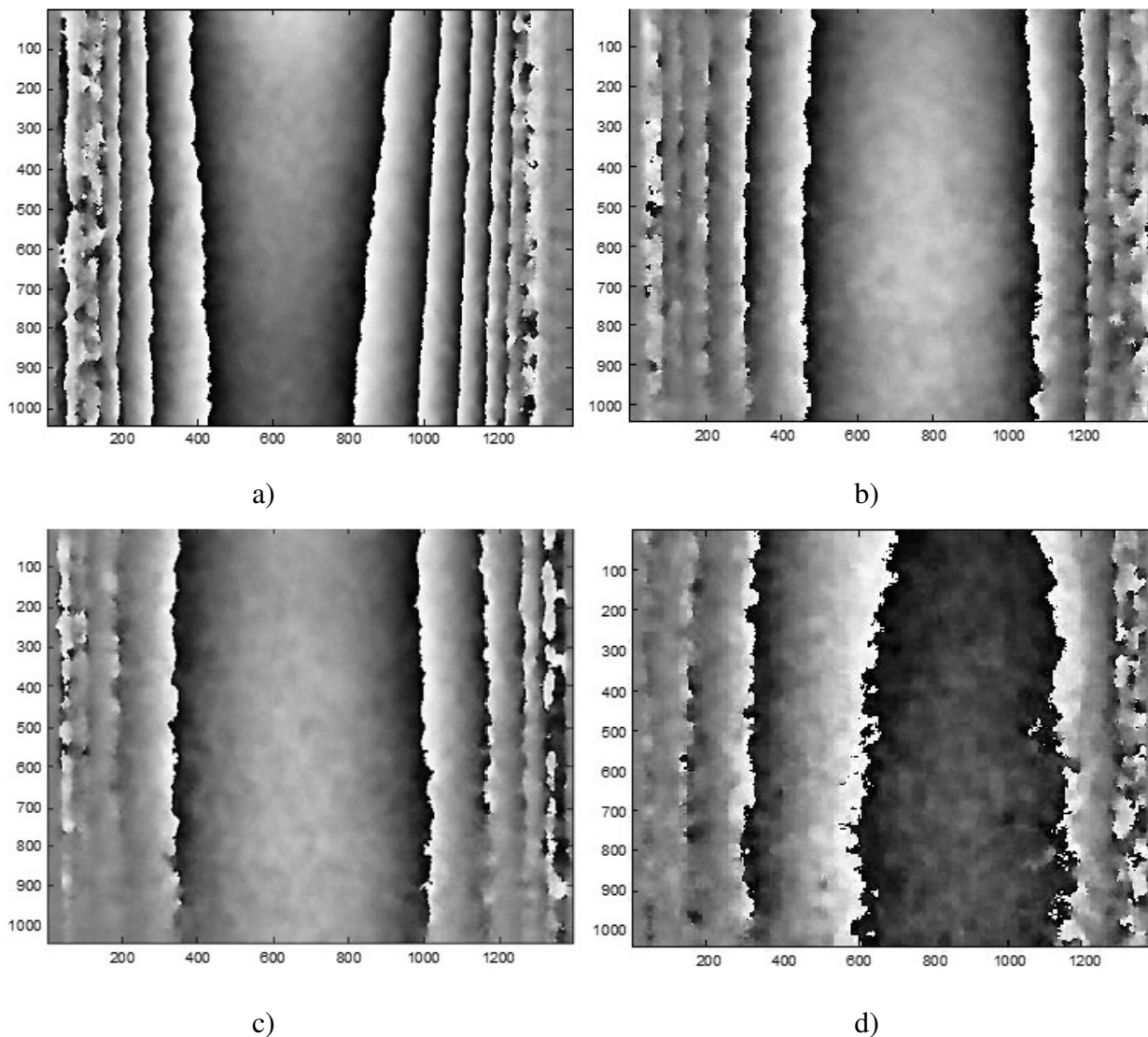


Figura 4.10 a) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y la gasolina Magna; b) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y gasolina Premium con 0.10g de parafina; c) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y gasolina Premium con 0.11g de parafina; d) Diferencia de fase entre la gasolina Premiun y gasolina Premium con 0.12g de parafina

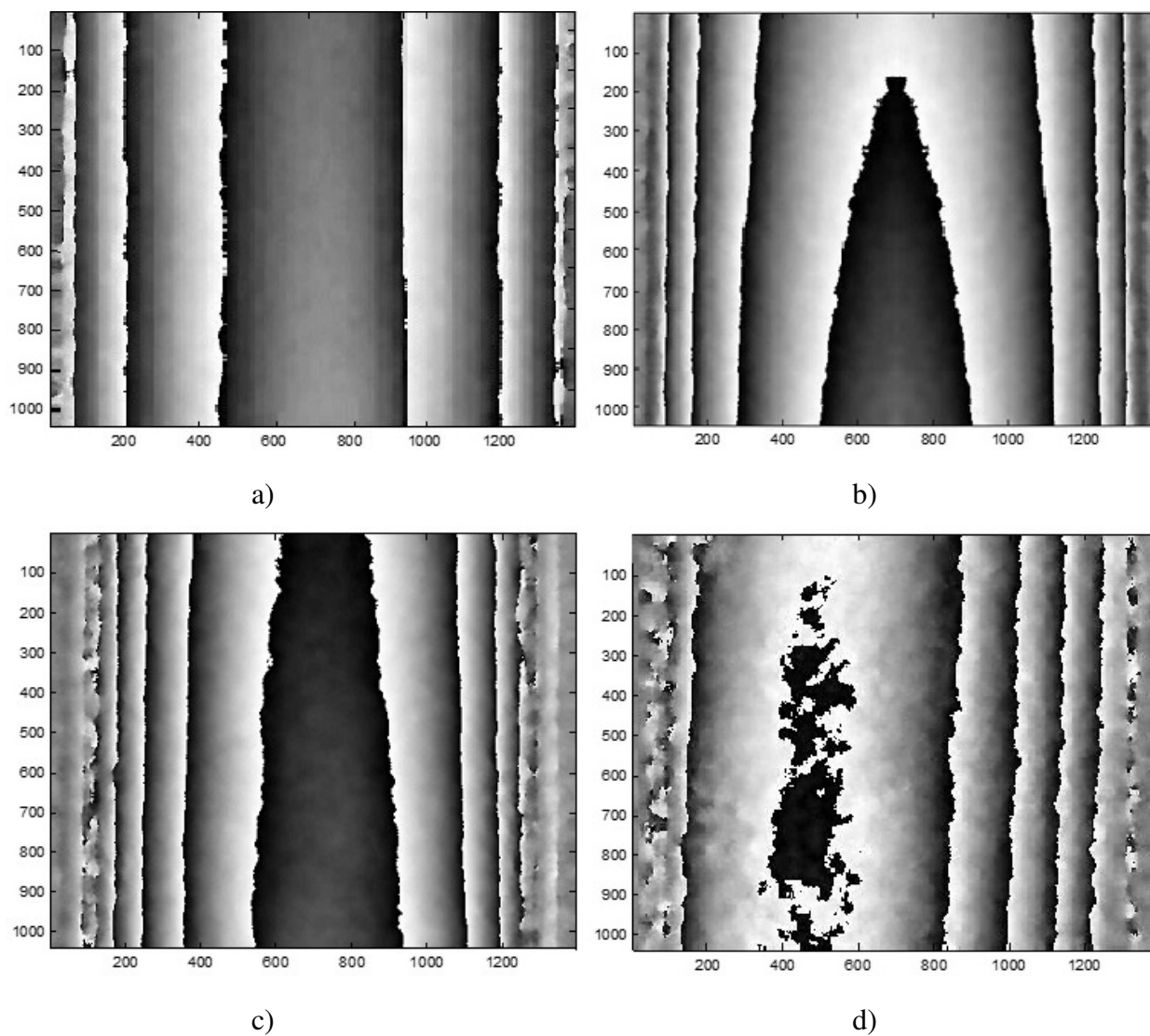


Figura 4.11 a) Diferencia de fase E0.4; b) Diferencia de fase E0.5; c) Diferencia de fase E0.6; d) Diferencia de fase E0.7

4.8 Aproximación a la región central para el cálculo de las variaciones del índice de refracción

Para el cálculo de la variación del índice de refracción en las muestras, se recurre a la aproximación de la región central para el cálculo de las diferencias de fase antes vistas.

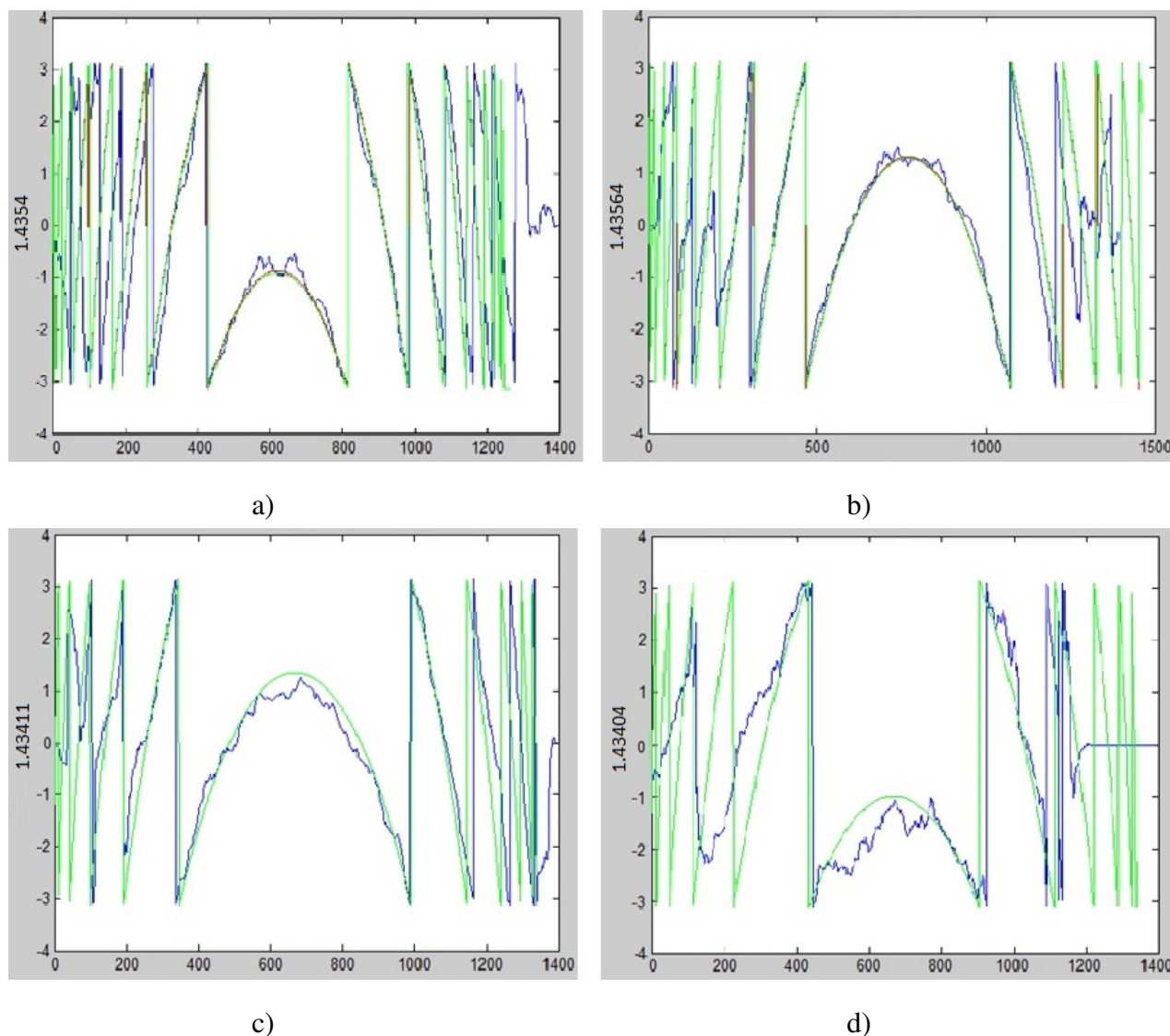


Figura 4.12 a) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina Magna; b) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina premium con 0.10g de parafina; c) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina premium con 0.11g de parafina; d) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase entre gasolina Premiun y gasolina premium con 0.12g de parafina

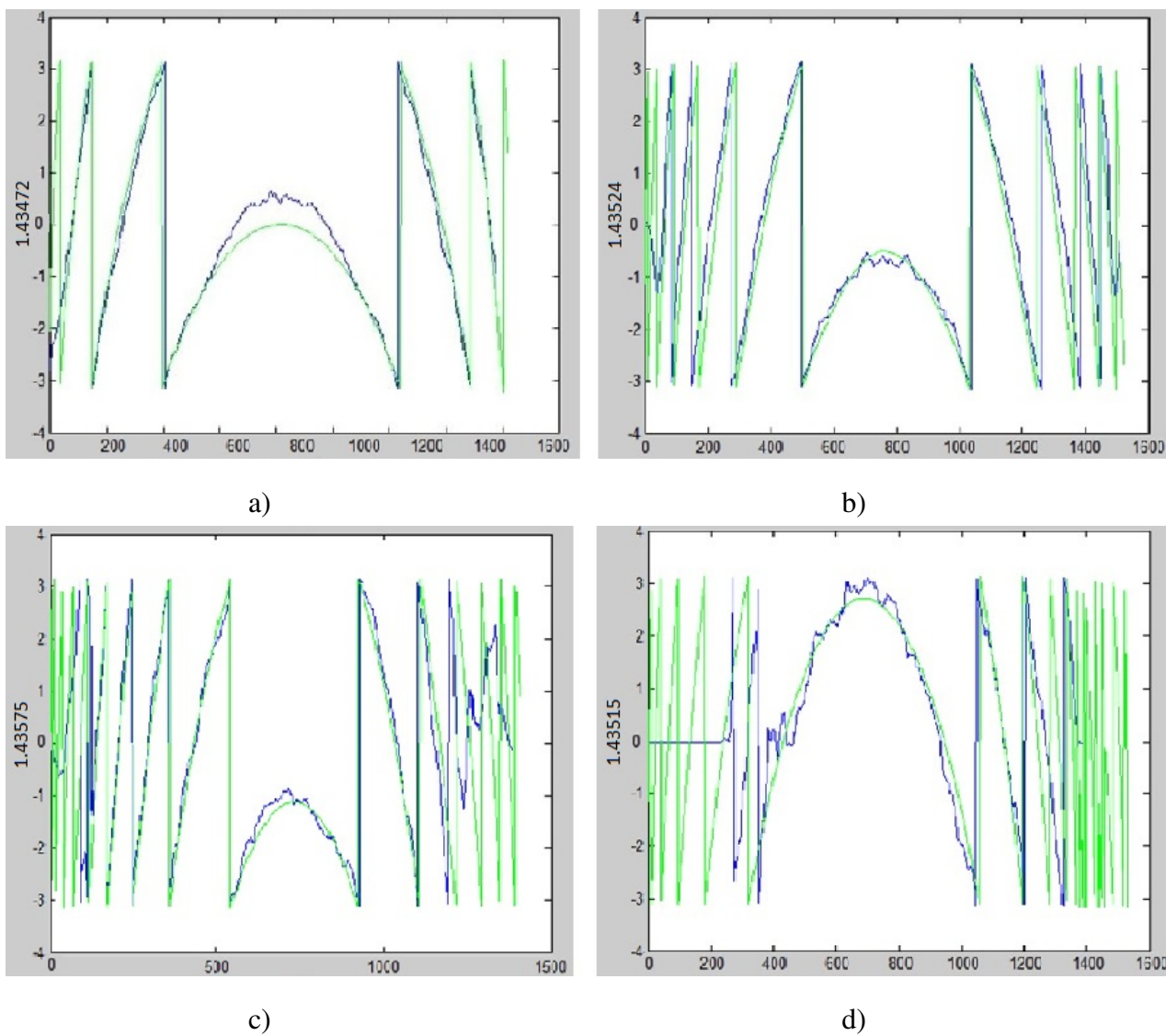


Figura 4.13 a) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.4; b) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.5; c) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.6; d) Aproximación a la línea central de la diferencia de fase de E0.7

4.9 Variaciones de concentración en gasolinas comerciales, relacionadas a variaciones del índice de refracción

Recuérdese que las muestras con parafina y gasohol, se realizaron con gasolina Premium, como se había mencionado anteriormente. Para la gasolina Premium se determinó un índice de refracción de 1.4340000 con un refractómetro de Abbe. Por lo cual, las muestras comparadas con gasolina Premium nos dieron los siguientes índices de refracción:

IR de la gasolina Magna con IHD	IR de la gasolina Magna Ref [27]	Desviación
1.4325990	1.4268000	0.0057990

Tabla 4.5 Índice de refracción obtenido para la gasolina Magna

En el caso de las muestras realizadas con parafina, todas se realizaron con 40ml de gasolina Premium con las cantidades de parafina que se especifican en la Tabla 4.6, obteniéndose los siguientes índices de refracción:

Contenido de parafina (g)	IR con IHD	IR con refractómetro de Abbe	Desviación
0.1000	1.4323612	1.4300000	0.0023612
0.1100	1.4338909	1.4350000	0.0011091
0.1200	1.4339634	1.4350000	0.0010366

Tabla 4.6 Índices de refracción obtenidos para muestras de 40ml de gasolina Premium con las cantidades de parafinas especificadas

Por último se presentan los índices de refracción determinados para las diferentes muestras de gasohol (Ver Tabla 4.7).

Gasohol	IR con IHD	IR con refractómetro de Abbe	Desviación
E0.4	1.4332804	1.4340000	0.0007196
E0.5	1.4327631	1.4330000	0.0002369
E0.6	1.4322488	1.4330000	0.0007512
E0.7	1.4328513	1.4330000	0.0001487

Tabla 4.7 Índices de refracción obtenidos para las diferentes muestras de gasohol

Conclusiones

En esta investigación se presenta un nuevo método para medir variaciones de concentraciones en gasolinas comerciales a través de la Interferometría Holográfica Digital. La cual es una técnica metrológica óptica capaz de medir con muy alta sensibilidad variaciones de campos de concentración en muestras líquidas de gasolinas comerciales, que a diferencia de las técnicas convencionales para la evaluación de concentraciones de gasolinas es no invasiva, no destructiva, versátil, de campo completo, que proporciona casi en tiempo real la información y que ante todo, es de fácil implementación.

En el caso, de las muestras de gasolina con parafina, se observa que en sus correspondientes diferencias de fase presentan aberraciones debido a factores de intensidad luminosa, pero como se tiene el algoritmo de aproximación a la región central, no nos afecta siempre y cuando la región central esté definida.

Todas las diferencias de fase mostradas fueron calculadas con cada línea de los píxeles del objeto de fase registrado por el CCD. Recuérdese que el CCD utilizado es de (1392(H)x1040(V)). Generándonos 1040 líneas de diferencias de fase, que a su vez son asociados al índice de refracción. Los datos reportados de estas diferencias de fases son los promedios del total de líneas calculadas para cada diferencia de fase.

El diseño del sistema óptico fue en base a que este fuera más compacto, sin perder su alta sensibilidad, y con el fin de que en un trabajo a futuro este pueda ser convertido en un dispositivo portátil. Por otro lado, este sistema óptico no requiere de contenedores de alta calidad, por lo cual fueron utilizados tubos de vidrios.

Trabajo a futuro

- Relacionar las variaciones de concentración obtenidas con la capacidad antidetonante de la gasolina (número de octanos) y/o a la determinación de factores de calidad.
- Mejorar el tiempo de procesamiento de los algoritmos.
- Crear un dispositivo portátil para la evaluación de concentraciones en gasolinas.

Apéndice A: Códigos de Matlab

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Simulación de diferencia de fase %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all;clear all; warning off; clc; format long;

% Resolución de la camara 1392x1040
% Radio del tubo 1.5mm
% Longitud de onda del laser 532nm

r=1.5; %Unidades en mm
y=-pi:0.00212:pi;
n=1.3330 ; n2=1.33354;
lambda=532e-6; %Unidades en mm
K=(2*pi)./(lambda);

cy=2900;
for i=1:1:cy;
    y(1,i);
    disc=(y(1,i)^2);
    if disc <= (r^2);
        dz(1,i)=2*(sqrt(r^2-(y(1,i))^2));
    else
        dz(1,i)=0.0;
    end
end

OPL1=dz.*(n);
OPL2=dz.*(n2);
OPL=OPL2-OPL1;

%Calculamos la fase, que en este caso es fase desenvuelta
DFase=K.*OPL;

%Se envuelve la fase

im=sin(DFase);
re=cos(DFase);

```

```

dze=atan2(im,re)+pi;

figure; imagesc(dze); colormap gray;
for i=1:1040;
    ze(i,1:cy)=dze(1,1:cy);
end

y1=1; y2=1040;
x1=789; x2=2180;

zer=zeros(size(1040));

recorte1=ze(y1:y2,x1:x2);
zer=recorte1;

fasefil=zer';
figure; imagesc(fasefil); colormap gray;

[x,y]=size(fasefil);
unwr=unwrap(fasefil);
figure; mesh(unwr);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Aproximación al índice de refracción a partir de %%%%%%%%%%%
%% la linea central de la diferencia de fase %%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Desenvueltaf=unwr(1:x,1:y);
for j=1:y;
    Desenvueltaf(1,j);
[cf,ck]=max(Desenvueltaf);
end

dim=(ck-1).*2;

r=1.5e-3; %Radio del tubo con unidades en metro
lamda=532e-9; %Longitud de onda del láser con unidades en metro

incxr=2*r./(dim-1);
incxr=mean(incxr);

```

```

for i=1:dim;
    xr(1,i)=-r+(i*incxr);
end

imfil=[];
unim=[];

%%% El programa es capaz de analizar desde la línea 1 hasta la línea 1040,
%%% valor acorde a la resolución de la cámara %%%%%%%%%%%

iniciodelinea=1;
findelinea=2;

for linea=iniciodelinea:findelinea
    mco=10000000;
    mn=0;
    for j=0:550 %va checando las franjas el número de fuciones.
        j
        v=fasefil(ck(1,iniciodelinea)-floor(dim(1,iniciodelinea)/2):ck(1,iniciodelinea)
        ni=1.3334; %%%% Aproximación al índie de refracción que se desea
        %%%%%%%%%%% calcular, con el fin de tardar menos el programa %%%%
        nj(1,iniciodelinea)=ni+0.0000001*j(1,iniciodelinea);
        Dn=nj(1,iniciodelinea)-n;
        KK=4*pi*Dn/lamda;
        Dphaser=KK*sqrt(r*r-xr.*xr);
        n2p=floor(max(Dphaser)/(2*pi));
        vt=zeros(size(Dphaser)); %correccion linea
        for k=0:n2p+1;
            f=find( (Dphaser>=((k)*2*pi)) & (Dphaser<=((k+1)*2*pi)) );
            vt(f)=Dphaser(f)-(k)*2*pi;
        end
        vt=vt; %para visualizar debes variar pi

%%%%%%%%%% minimos cuadrados %%%%%%%%%%%
vr=v(112:1248);

vr=vr'; %transpuesta de la función con ruido
vrc=cos(vr); vrs=sin(vr); %funciones senos y coseno
%%%%%%%%%%de la función sin aproximar

v1=vt(112:1248); %transpuesta de la función aproximada

```

```

v1c=cos(v1);    v1s=sin(v1); %funciones seno y coseno de
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%la funcion aproximada

cc2=sum((vrc-v1c).^2); %calculo del error minimo en funciones coseno
cs2=sum((vrs-v1s).^2); %calculo del error minimo en funciones suma
ccs2=cc2+cs2; %suma de errores.

if(ccs2<mco)
    mco=ccs2;
    indice=nj(1,iniciodelinea);
    va=vt;
    va1=Dphaser;
    figure (1);plot(1:length(v),v,'b',1:length(vt),vt,'r',1:length(va),va,'g');
    title(linea);xlabel(mco);ylabel(indice);
    pause(0.01);
end
plot(1:length(v),v,'b',1:length(vt),vt,'r',1:length(va),va,'g');
title(ccs2);xlabel(mco);ylabel(indice);
pause(0.01);
IndiceCalculado(1,linea)=indice+0.0001;
end
imfil=[imfil;va];
unim=[unim;va1];
linea
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Transformada de Fourier en Tiempo Real (Para ajuste del sistema)%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc; clear all; close all;

vid = videoinput('gige', 1, 'Mono8');
src = getselectedsource(vid);

vid.FramesPerTrigger = 1;
vid.ReturnedColorspace = 'grayscale';

g = 0;

while g < 1

    vidtf = getsnapshot(vid);

```

```

%Imagen del holograma en tiempo real
figure (1); image(vidtf); title('Muestra 1'); colormap(gray(255));
%Imagen con los espectros de Fourier en tiempo real
fh1=fftshift(fft2(vidtf)); figure (2); image((0.0025*abs(fh1))); title('Muestra 2
    drawnow
end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Captura de Imagen %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc; clear all; close all;

vid = videoinput('gige', 1, 'Mono8');
vid.ReturnedColorspace = 'grayscale';

preview(vid)

pause; %Tome la imagen pulsando la tecla espacio
x=('foto1');
disp(x)
Imagen= getsnapshot(vid);
% pause;
% Imagen2 = getsnapshot(vid);
stoppreview(vid); closepreview(vid);
save

clear src;
clear vid;

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Recuperación de Fase a partir de los hologramas grabados %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc; close all; clear all;

load gasref2302201622.mat

load gasalc2302201622.mat

I=Imagen;
I2=Imagen2;

```

```

figure (100); imagesc(I); title('holograma 1'); colormap gray;
figure (200); imagesc(I2); title('holograma 2'); colormap gray;

%Para el primer holograma

tf1 = fftshift(fft2(I));
figure (101); image(0.0025*abs(tf1)); colormap gray; hold on

tf11=tf1(45:978, 1073:1346); %tf1(y1:y2,x1:x2) siendo y1 el de arriba
tff=zeros(size(I));
tff(45:978, 1073:1346)=tf11;
figure (102); image(0.0025*(abs(tff))); colormap gray;

itf11 = ifft2(tff);
figure (103); image(0.4.*abs(itf11)); colormap gray
fase1=angle(itf11);

% Para el segundo holograma
tf2 = fftshift(fft2(I2));
figure (201); image(0.0025*abs(tf2)); colormap gray;
tf22=tf2(45:978, 1073:1346);
tff2=zeros(size(I2));
tff2(45:978,1073:1346)=tf22;
figure (202); image(0.0025.*abs(tff2)); colormap gray;
itf22 = ifft2(tff2);
figure (203); image(0.4.*abs(itf22)); colormap gray
fase2=angle(itf22);

% Cálculo de la diferencia de fase

Difaseini=fase2-fase1;
Difase=Difaseini';

figure(300); imagesc(Difase); colormap gray

h = fspecial('disk', 20);

RealTI=filter2(h,cos(Difase),'same');
ImagTI=filter2(h,sin(Difase),'same');
fase=atan2(ImagTI,RealTI);

figure(301); imagesc(fase); colormap gray

```



```

[x,y]=size(fase);
IM=(sqrt((RealTI.^2)+ (ImagTI.^2))).*exp(fase*1j);

% Desenvolvimiento de fase con Goldstein

[im_unwrapped]=GoldsteinUnwrap2D_r1_2(IM);

figure(301); imagesc(fase); colormap gray
figure(302); mesh(im_unwrapped); %view(180,0);

%Normalización de la desenvuelta

Desenvuelta= (im_unwrapped)+(abs(min(min(im_unwrapped))));
figure(303); mesh(Desenvuelta);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Aproximación al índice de refracción a partir de %%%%%%%%%%%
%% la linea central de la diferencia de fase %%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Desenvueltaf=Desenvuelta(1:x,1:y);
for j=1:y;
    Desenvueltaf(1,j);
[cf,ck]=max(Desenvueltaf);
end

fasefil=fase;

ck;
dim=(ck-1).*2;

n=1.333; %índice de refracción d referencia (índice d refracción del agua)
r=1.5e-3;
lamda=532e-9;

incxr=2*r./(dim-1);
incxr=mean(incxr);

for i=1:dim;
    xr(1,i)=-r+(i*incxr);
end

```

```

imfil=[];
unim=[];

%%% El programa es capaz de analizar desde la línea 1 hasta la línea 1040,
%%% valor acorde a la resolución de la cámara %%%%%%%%%%%
iniciodelinea=1;
findelinea=2;

for linea=iniciodelinea:findelinea
    mco=10000000;
    mn=0;
    for j=0:1300 %va checando las franjas el número de funciones.
        j
        v=fasefil(ck(1,iniciodelinea)-floor(dim(1,iniciodelinea)/2):1392,linea); %la fu
        ni=1.3336; %%%% Aproximación al índice de refracción que se desea
        %%%%%%%%%% calcular, con el fin de tardar menos el programa %%%%
        nj(1,iniciodelinea)=ni+0.0000001*j;
        Dn=nj(1,iniciodelinea)-n;
        KK=4*pi*Dn/lamda;
        Dphaser=KK*sqrt(r*r-xr.*xr);
        n2p=floor(max(Dphaser)/(2*pi));
        vt=zeros(size(Dphaser)); %correccion linea
        for k=0:n2p+1;
            f=find( (Dphaser>=((k)*2*pi)) & (Dphaser<=((k+1)*2*pi)) );
            vt(f)=Dphaser(f)-(k)*2*pi;
        end
        vt=vt-pi; %para visualizar debes jugar pi

%%%%%%%%%% minimos cuadrados %%%%%%%%%%%5
vr=v(112:1248);

vr=vr'; %transpuesta de la función con ruido
vrc=cos(vr); vrs=sin(vr); %funciones senos y coseno
%%%%%%%%%%de la función sin aproximar

v1=vt(112:1248); %transpuesta de la función aproximada
v1c=cos(v1); v1s=sin(v1); %funciones seno y coseno de
%%%%%%%%%%la función aproximada

cc2=sum((vrc-v1c).^2); %calculo del error minimo en funciones coseno
cs2=sum((vrs-v1s).^2); %calculo del error minimo en funciones suma

```

```
ccs2=cc2+cs2; %suma de errores.

if(ccs2<mco)
    mco=ccs2;
    indice=nj(1,iniciodelinea);
    va=vt;
    va1=Dphaser;
    figure (1);plot(1:length(v),v,'b',1:length(vt),vt,'r',1:length(va),va,'g');
    title(linea);xlabel(mco);ylabel(indice);
    pause(0.01);
end
plot(1:length(v),v,'b',1:length(vt),vt,'r',1:length(va),va,'g');
title(ccs2);xlabel(mco);ylabel(indice);
pause(0.01);
IndiceCalculado(1,linea)=indice+0.0001;
end
imfil=[imfil;va];
unim=[unim;va1];
linea
end
```

Apéndice B: Fichas técnicas de las Gasolina Mexicanas



PEMEX - MAGNA (1) RESTO DEL PAÍS

Núm. Versión: 5
NOM-018-STPS-2000

Hoja de Datos de Seguridad

SECCIÓN I. DATOS GENERALES

HDSS: PR-107/2010

PEMEX-MAGNA (1) RESTO DEL PAÍS

No. ONU¹: 1203

No. CAS²: 8006-61-9



FECHA ELAB: 20/10/1998

REVISIÓN: 5

FECHA REV: 01/09/2011

FABRICANTE	EN CASO DE EMERGENCIA LLAMAR:
<p>PEMEX: Av. Marina Nacional No. 329, colonia Petróleos Mexicanos, Delegación Miguel Hidalgo, México, D. F. C. P. 11311. Teléfonos: (0155) - 19449365 y 19448895 (Horario de oficina).</p> <p>ASISTENCIA TÉCNICA: Teléfonos: (0155) - 19448164 (Horario de oficina).</p> <p>CONSULTA HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD: Teléfonos: (0155) - 19448628 y 19448041 (Horario de oficina).</p>	<p>SETIQ³:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 01800 - 0021400, sin costo las 24 horas. ▪ (0155) - 55591588, Cd. de México, las 24 horas.
	<p>CENACOM⁴:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 01800 - 0041300, sin costo las 24 horas. ▪ (0155) - 51280000, ext. 11470 a 11476, Cd. de México, las 24 horas.
	<p>COATEA⁵:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 01800 - 7104943, sin costo las 24 horas. ▪ (0155) - 54496391 y 26152045 Cd. de México, las 24 horas.
	<p>CCAE⁶:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 49166 (número único nacional, las 24 horas). ▪ (0155) - 19442500, extensión 49166 Cd. de México, las 24 horas. ▪ Correo electrónico: ccae@pemex.com

SECCIÓN II. DATOS GENERALES DEL PRODUCTO

Nombre químico: ND	Estado físico: Líquido
Nombre comercial: Gasolina Pemex-Magna	Clase de Riesgo de transporte SCT ⁷ : Clase 3, "Líquidos inflamables"
Familia química: ND	No. Guía de Respuesta GRE ⁸ : 128
Sinónimos: Gasolina Pemex-Magna, Pemex-Magna Resto del País	
Descripción general del producto: Mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena recta y ramificada, olefinas, cicloparafinas y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de combustión interna y es para uso en el	


PEMEX - MAGNA (1) RESTO DEL PAÍS

 Núm. Versión: 5
 NOM-018-STPS-2000

Hoja de Datos de Seguridad

interior del país, excepto en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey. Índice de octano igual a 87 y 1000 ppm de contenido máximo de azufre total.

SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES

COMPONENTE	% VOL.	NÚMERO ONU ¹	NÚMERO CAS ²	PPT ⁹ (ppm)	CT ¹⁰ (ppm)	p ¹¹ (ppm)	IPVS ¹² (ppm)	GRADO DE RIESGO NFPA ¹³			
								S ¹⁴	I ¹⁵	R ¹⁶	E ¹⁷
Gasolina	100%	1203	8006-61-9	300	500	ND	ND	1	3	0	NA
Aromáticos	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Olefinas	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benceno	3.0% máx.	1114	71-43-2	0.5	2.5	ND	ND	2	3	0	NA

SECCIÓN IV. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Temperatura de ebullición (°C): 60-70 (máx. 10% destilac.) ^B	Color: Rojo (visual)
Temperatura de fusión (°C): NA	Olor: Característico a gasolina
Temperatura de inflamación (°C): Inferior a 0°C	Velocidad de evaporación: ND
Temperatura de auto ignición (°C): aproximadamente 250°C ^A	Solubilidad en agua: Insoluble
Densidad relativa de vapor (aire=1): 3.0 – 4.0 ^A	Presión de vapor @ 37.8 °C (kPa): 54.0 – 79.0 (7.8 – 11.5 lb/pulg ²)
pH: (IV.6) ND	% de volatilidad: NA
Peso molecular: ND	Límites de explosividad inferior-superior: 1.3 – 7.1 ^A
Estado físico: Líquido	Gravedad específica 20/4 °C: 0.700 – 0.770

SECCIÓN V. RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN
Medio de extinción:

- Fuegos pequeños: Utilizar agua en forma de rocío o niebla, polvo químico seco, Bióxido de Carbono o espuma química.



PEMEX – PREMIUM (1) RESTO DEL PAÍS

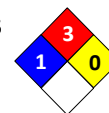
Núm. Versión: 5
NOM-018-STPS-2000

Hoja de Datos de Seguridad

SECCIÓN I. DATOS GENERALES

HDSS: PR-105/2010

PEMEX-PREMIUM (1) RESTO DEL PAÍS

No. ONU¹: 1203No. CAS²: 8006-61-9

FECHA ELAB: 20/10/1998

REVISIÓN: 5

FECHA REV: 01/09/2011

FABRICANTE	EN CASO DE EMERGENCIA LLAMAR:
PEMEX: Av. Marina Nacional No. 329, colonia Petróleos Mexicanos, Delegación Miguel Hidalgo, México, D. F. C. P. 11311. Teléfonos: (0155) - 19449365 y 19448895 (Horario de oficina). ASISTENCIA TÉCNICA: Teléfonos: (0155) – 19448164 (Horario de oficina). CONSULTA HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD: Teléfonos: (0155) – 19448628 y 19448041 (Horario de oficina).	SETIQ³: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 01800 – 0021400, sin costo las 24 horas. ▪ (0155) – 55591588, Cd. de México, las 24 horas.
	CENACOM⁴: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 01800 – 0041300, sin costo las 24 horas. ▪ (0155) – 51280000, ext. 11470 a 11476, Cd. de México, las 24 horas.
	COATEA⁵: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 01800 – 7104943, sin costo las 24 horas. ▪ (0155) – 54496391 y 26152045 Cd. de México, las 24 horas.
	CCAE⁶: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 49166 (número único nacional, las 24 horas). ▪ (0155) - 19442500, extensión 49166 Cd. de México, las 24 horas. ▪ Correo electrónico: ccae@pemex.com

SECCIÓN II. DATOS GENERALES DEL PRODUCTO

Nombre químico: ND	Estado físico: Líquido
Nombre comercial: Gasolina Pemex-Premium Resto del País	Clase de Riesgo de transporte SCT ⁷ : Clase 3, "Líquidos inflamables"
Familia química: ND	No. Guía de Respuesta GRE ⁸ : 128
Sinónimos: Gasolina Pemex-Premium, Pemex Premium Resto del País	
Descripción general del producto: Mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena recta y ramificada, olefinas, cicloparafinas y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de combustión interna y es para uso en el	


PEMEX – PREMIUM (1) RESTO DEL PAÍS

 Núm. Versión: 5
 NOM-018-STPS-2000

Hoja de Datos de Seguridad

interior del país, excepto en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey.

SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES

COMPONENTE	% VOL.	NÚMERO ONU ¹	NÚMERO CAS ²	PPT ⁹ (ppm)	CT ¹⁰ (ppm)	P ¹¹ (ppm)	IPVS ¹² (ppm)	GRADO DE RIESGO NFPA ¹³			
								S ¹⁴	I ¹⁵	R ¹⁶	E ¹⁷
Gasolina	100%	1203	8006-61-9	300	500	ND	ND	1	3	0	NA
Aromáticos	35.0% máx.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Olefinas	15.0% máx.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benceno	2.0% máx.	1114	71-43-2	0.5	2.5	ND	ND	2	3	0	NA
Oxígeno	2.7% máx.	1072	7782-44-7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

SECCIÓN IV. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS


Temperatura de ebullición (°C): ND	Color: Sin Anilina (visual)
Temperatura de fusión (°C): NA	Olor: Característico a gasolina
Temperatura de inflamación (°C): Inferior a 0°C	Velocidad de evaporación: ND
Temperatura de auto ignición (°C): aproximadamente 250°C ^A	Solubilidad en agua: Insoluble
Densidad relativa de vapor (aire=1): 3.0 – 4.0 ^A	Presión de vapor @ 37.8 °C (kPa): 54.0 – 79.0 (7.8 – 11.5 lb/pulg ²)
pH: (IV.6) ND	% de volatilidad: NA
Peso molecular: ND	Límites de explosividad inferior-superior: 1.3 – 7.1 ^A
Estado físico: Líquido	Gravedad específica 20/4 °C: 0.700 – 0.770

SECCIÓN V. RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN
Medio de extinción:

- Fuegos pequeños: Utilizar agua en forma de rocío o niebla, polvo químico seco, Bióxido de Carbono o

Apéndice C: Modificaciones requeridas para que un motor de gasolina convencional pueda operar con las distintas mezclas de etanol

MEZCLA DE ETANOL	CARBURADOR	INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE	BOMBA DE COMBUSTIBLE	DISPOSITIVO DE PRESIÓN DEL COMBUSTIBLE	FILTRO DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE IGNICIÓN	SISTEMA DE EVAPORACIÓN	TANQUE DE COMBUSTIBLE	CONVERTIDOR CATALÍTICO	MOTOR	ACETE DEL MOTOR	SISTEMA DE ESCAPE	SISTEMA DE ARRANQUE EN FRÍO
≤ E5	En todos los vehículos												
E5 - E10	Para vehículos de menos de 20 años de antigüedad												
E10-E25	Para vehículos especialmente diseñados										Para vehículos de menos de 20 años de antigüedad		
E25-E85	Para vehículos especialmente diseñados												
≥ E85	Para vehículos especialmente diseñados												

 No es necesario

 Probablemente sea necesario

Referencias

- [1] T. Kreis, *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. John Wiley & Sons, 2006.
- [2] T. Saucedo Anaya and F. Puch Ceballos, “Medición simultánea en dos dimensiones por interferometría holográfica digital utilizando dos láseres y una cámara 3ccd,” *Nova scientia*, vol. 6, no. 11, pp. 67–80, 2014.
- [3] G. Pedrini, W. Osten, and M. E. Gusev, “High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement,” *Applied optics*, vol. 45, no. 15, pp. 3456–3462, 2006.
- [4] D. Gabor *et al.*, “A new microscopic principle,” *Nature*, vol. 161, no. 4098, pp. 777–778, 1948.
- [5] B. Lengyel, *Lasers*. Wiley series in pure and applied optics, John Wiley & Sons Canada, Limited, 1962.
- [6] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed wavefronts and communication theory,” *JOSA*, vol. 52, no. 10, pp. 1123–1128, 1962.
- [7] K. A. Stetson and R. L. Powell, “Hologram interferometry,” *JOSA*, vol. 56, no. 9, pp. 1161–1163, 1966.
- [8] N. Bochner and J. Pipman, “A simple method of determining diffusion constants by holographic interferometry,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 9, no. 13, p. 1825, 1976.
- [9] J. D. Trolinger, “The holography of phase objects,” in *31st Annual Technical Symposium*, pp. 128–139, International Society for Optics and Photonics, 1987.
- [10] U. Schnars, “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms,” *JOSA A*, vol. 11, no. 7, pp. 2011–2015, 1994.
- [11] I. HOMER, “Motores y biocombustible,”
- [12] I. Litani-Barzilai, I. Sela, V. Bulatov, I. Zilberman, and I. Schechter, “On-line remote prediction of gasoline properties by combined optical methods,” *Analytica chimica acta*, vol. 339, no. 1, pp. 193–199, 1997.

- [13] F. S. de Oliveira, L. S. G. Teixeira, M. C. U. Araujo, and M. Korn, "Screening analysis to detect adulterations in brazilian gasoline samples using distillation curves," *Fuel*, vol. 83, no. 7, pp. 917–923, 2004.
- [14] "Programa de Introducción de Bioenergéticos - SENER." <http://www.bioenergeticos.gob.mx/bio/descargas/Programa-Introduccion-de-Bioenergeticos.pdf>. Accessed: 2015-06-04.
- [15] "Programa de Introducción de Etanol Anhidro - SENER." <http://conadesuca.gob.mx/DocumentosEficProductiva/5.-%20Sustentabilidad/6.%20Etanol/7.%20Programa%20de%20Introducci%C3%B3n%20de%20Etanol%20Anhidro.pdf>. Accessed: 2015-06-04.
- [16] L. Heflinger, R. Wuerker, and R. Brooks, "Holographic interferometry," *Journal of Applied Physics*, vol. 37, no. 2, pp. 642–649, 1966.
- [17] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *JosA*, vol. 72, no. 1, pp. 156–160, 1982.
- [18] J. M. Obregón Obregón, *Análisis de adulteración en gasolinas automotrices en base al contenido de plomo*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1984.
- [19] U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a ccd target and numerical reconstruction," *Applied optics*, vol. 33, no. 2, pp. 179–181, 1994.
- [20] G. Pedrini, S. Schedin, and H. J. Tiziani, "Lensless digital-holographic interferometry for the measurement of large objects," *Optics communications*, vol. 171, no. 1, pp. 29–36, 1999.
- [21] A. Anand, V. K. Chhaniwal, and C. Narayanamurthy, "Diffusivity studies of transparent liquid solutions by use of digital holographic interferometry," *Applied optics*, vol. 45, no. 5, pp. 904–909, 2006.
- [22] S. JIMENEZ PACHECO, *CONTROL ESTADISTICO DE CALIDAD DEL RANGO DE DESTILACION DE LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAIS*. PhD thesis, 2013.
- [23] J. Colombani and J. Bert, "Holographic interferometry for the study of liquids," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 134, no. 1, pp. 8–14, 2007.
- [24] H. G. Aleme, L. M. Costa, and P. J. Barbeira, "Determination of ethanol and specific gravity in gasoline by distillation curves and multivariate analysis," *Talanta*, vol. 78, no. 4, pp. 1422–1428, 2009.
- [25] J. A. CAMARILLO MONTERO, *ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN DE UN MOTOR MONOCILÍNDRICO DE IGNICIÓN ALIMENTADO CON MEZCLAS GASOLINA-ETANOL ANHIDRO E HIDRATADO A DISTINTAS CONCENTRACIONES*. PhD thesis, 2011.

- [26] L. A. Díaz, L. Mattos, and C. O. Torres, "Medición de adulteración en la gasolina usando un sensor de fibra óptica,"
- [27] R. I. Trujillo Ponce *et al.*, "Determinación de la solubilidad de etanol anhidro y etanol acuoso en gasolina sintética y gasolina refinada y la tolerancia de agua a 298, 15 k, 308, 15 ky 318, 15 k," 2012.
- [28] A. Kamari, M. Sattari, A. Mohammadi, and D. Ramjugernath, "Modeling of the properties of gasoline and petroleum fractions using a robust scheme," *Petroleum Science and Technology*, vol. 33, no. 6, pp. 639–648, 2015.
- [29] Ó. J. Sánchez and C. A. Cardona, "Producción biotecnológica de alcohol carburante i: obtención a partir de diferentes materias primas," *Interciencia*, vol. 30, no. 11, pp. 671–678, 2005.
- [30] S. Saravanan, K. Pitchandi, and G. Suresh, "An experimental study on premixed charge compression ignition-direct ignition engine fueled with ethanol and gasohol," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, no. 4, pp. 897–904, 2015.
- [31] R. Huntington, *Natural gas and natural gasoline*. McGraw-Hill chemical engineering series, McGraw-Hill, 1950.
- [32] "Gasolinas." <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/Paginas/default.aspx>. Accessed: 2016-03-10.
- [33] W. Pritzkow, "Paraffin products properties, technologies, applications: Von m. freund, r. csikós, s. keszthelyi und gy. mózes, herausgeber: Gy. mózes; budapest, akademiai kiadó 1982; 335 seiten mit zahlreichen bildern und tabellen; format 16× 24 cm; ln. ft. 295," *Zeitschrift für Chemie*, vol. 23, no. 7, pp. 275–276, 1983.
- [34] *Etanol*. Iica.
- [35] J. Torres, D. Molina, C. Pinto, and F. Rueda, "Estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhidro. evaluación de propiedades fisicoquímicas," *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 2, no. 3, pp. 71–82, 2002.
- [36] H. Joseph Jr, "The vehicle adaptation to ethanol fuel," in *Presentation to the Royal Society International biofuels meeting held in London*, 2007.
- [37] S. de Ercilla and C. Muñoz, *Física general*. Tébar, 2003.
- [38] D. Malacara Hernández, "Óptica tradicional y moderna," *La Ciencia para Todos*;, 1997.
- [39] V. Cabrera, *Física Fundamental*. Editorial Progreso, 1996.
- [40] J. Kane, M. Sternheim, J. Vázquez, and D. Mirabent, *Física*. Reverté, 1989.

- [41] A. Cromer, *Física en la ciencia y en la industria*. Física: en la ciencia y en la industria, Reverté, 1986.
- [42] P. Tipler and G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*. No. v. 2 in Electricidad y magnetismo. Luz. Física moderna, Reverté, 2005.
- [43] R. Berenguer, *Física para todos*. Ciencia para todos, EQUIPO SIRIUS, S.A., 2009.
- [44] A. Arranz, *Tecnología Láser: Aplicaciones Industriales*. Marcombo, 2010.
- [45] E. Hecht, *Optics*. Addison-Wesley world student series, Addison-Wesley, 1998.
- [46] U. Schnars and W. P. Jüptner, “Digital recording and numerical reconstruction of holograms,” *Measurement science and technology*, vol. 13, no. 9, p. R85, 2002.
- [47] P. Hariharan, *Optical Holography: Principles, Techniques and Applications*. Cambridge Studies in Modern Optics, Cambridge University Press, 1996.
- [48] “Possibilities and prospects of holography.” http://www.holografia.wz.cz/holography/Real-Time_Method.php. Accessed: 2016-03-04.
- [49] W. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95th Edition*. CRC Press, 2014.