

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS



INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LÍQUIDOS

Carlos Alejandro Guerrero Méndez

Tesis de Doctorado

presentada a la Unidad Académica de Posgrado en Ingeniería
de acuerdo a los requerimientos de la Universidad para obtener el Grado de

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Directores de tesis:

Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel y Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Zacatecas, Zac., 28 de Octubre de 2016

RESUMEN

En este manuscrito de tesis, se presenta el trabajo de investigación desarrollado en la implementación de una nueva propuesta aplicadas en líquidos de un sistema óptico basado en la Interferometría Holográfica Digital (IHD) para medir los valores del Índice de Refracción (IR) en una o más muestras. Se muestra el desarrollo matemático que sustenta la propuesta, así como el trabajo experimental, los resultados obtenidos en esta investigación. Además se presenta el trabajo que asocia los valores del IR con las propiedades física de concentración y temperatura en un líquido.

En el sistema óptico implementado, se presenta una nueva propuesta, que consiste en el agregado de una apertura rectangular para el estudio de líquidos. La apertura agregada permite modular las altas frecuencias y mejora la separación para el filtrado de las bajas frecuencias que son asociadas al ruido existente en el frente de onda registrado. Con la obtención y procesamiento de las altas frecuencias se logra mejorar la sensibilidad y exactitud en los resultados de la diferencia de fase de los frentes de ondas dispersados por el objeto de fase. Otras de las ventajas de la nueva propuesta, es que no se requiere del conocimiento de las dimensiones del contenedor, y su robustez del sistema lo hace funcional con contenedores que tengan una morfología irregular.

Las investigaciones que se desarrollaron fueron para el estudio de las propiedades físicas de un líquido en condiciones estáticas y dinámicas. Se presentan dos investigaciones del cálculo del IR de un líquido en condiciones estáticas. En la primera de ellas se establece una diferencia de fase que nos ayudará a eliminar la dependencia de las dimensiones del contenedor a utilizar. En la segunda investigación, se desarrolla una aproximación de la diferencia de fase para el cálculo del IR de la sustancia puesta bajo estudio. En ambas investigaciones se obtuvieron resultados más precisos que los obtenidos por sistemas ópticos similares al cálculo del IR que utilizan la IHD. Con la necesidad de demostrar la capacidad de la primera investigación, se procedió a desarrollar una tercera investigación que fuera capaz de medir diferencias de concentración asociadas al IR de muestras líquidas.

Como última y cuarta investigación se desarrolla el estudio de la evolución de la temperatura en el proceso de enfriamiento de agua destilada. Con esta investigación se demuestra el óptimo funcionamiento del sistema propuesto para el estudio prácticamente en tiempo real del IR en condiciones dinámicas de una sustancia líquida.

ABSTRACT

In this thesis manuscript, we developed the implementation of a new proposal applied in liquids of an optical system based on Interferometry Holographic Digital (IHD). This system is able to measure the values of Refractive Index (RI) in one or more liquid samples. We show the mathematical development that supports this research, also we show the experimental work and the results obtained in this investigation. Furthermore, we show the work that relates the RI with the physical properties of concentration and temperature in a liquid.

In this optical system, we added, as a new proposal, a rectangular aperture to study the physical properties of a liquid, The added aperture modulates the high frequencies and improves the suppression for filtering the low frequencies that are associated with the noise in the recorded wavefront. The filtering of the high and low frequencies is to improve the sensitivity and accuracy of the results of the phase difference. Another advantage of the new proposal is that is not required knowledge of the dimensions of the container and the robustness of the system makes functional with containers having an irregular morphology.

According with this thesis research, some investigations were developed to study the physical properties of a liquid in static and dynamic conditions. Two investigations about the RI calculation of a liquid under static conditions were presented. In the first one, we use a phase difference that will help us to eliminate the dependence on the dimensions of the used container. In the second investigation, an approximation of the phase difference for the RI calculation in a substance was developed. In both studies we obtain more accurate results than other similar optical systems that use IHD. Also, we develop a third investigation that was able to measure differences associated with the concentration differences of two liquid samples.

As last and fourth research, we study the evolution of the temperature in the cooling process of distilled water. With this research the use of the proposed method to measure the RI under dynamic conditions of a liquid substance system.

Agradecimientos

Se agradece a la rectoría de la Universidad Autónoma de Zacatecas y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de financiamiento parcial para la elaboración de este trabajo de investigación.

Agradezco a el Dr. Raúl Eduardo Balderas Navarro del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO) UASLP, por sus apreciables recomendaciones para la redacción de los artículos científicos trabajados, uno de ellos titulado: “Measurements of concentration differences between liquid mixtures using digital holographic interferometry” y otro más titulado “Real-time measurement of temperature profiles during liquid cooling using digital holographic interferometry” .

Mis más sinceros agradecimientos al Dr. Enrique De la Rosa Miranda † y al Dr. Dr. Efrén González Ramírez por su invaluable ayuda en la realización del algoritmo de aproximación de la diferencia de fase.

Contenido General

| | Pag. |
|---|------|
| Resumen | i |
| Abstract | iii |
| Lista de figuras | vii |
| Lista de tablas | xi |
| 1 Introducción. | 1 |
| 1.1 Antecedentes de la holografía y la IHD. | 2 |
| 1.1.1 Variaciones de la Longitud de Camino Óptico (LCO) con IHD. | 7 |
| 1.2 Estado del arte de la IH en líquidos. | 10 |
| 1.3 Planteamiento del problema. | 12 |
| 1.4 Justificación. | 13 |
| 1.5 Hipótesis general. | 13 |
| 1.6 Objetivo | 14 |
| 2 Definiciones y fundamentos matemáticos. | 15 |
| 2.1 Estados de la materia. | 15 |
| 2.1.1 Soluciones líquidas. | 16 |
| 2.1.2 Medición de las propiedades ópticas de la materia líquida. | 17 |
| 2.1.3 Luz. | 19 |
| 2.2 Holografía. | 20 |
| 2.2.1 Etapa de grabado. | 21 |
| 2.2.2 Etapa de reconstrucción. | 23 |
| 2.3 Interferometría Holográfica (IH). | 26 |
| 2.3.1 IH de doble exposición. | 26 |
| 2.4 Holografía Digital (HD). | 30 |
| 2.4.1 La Transformada de Fourier (TF) en un holograma fuera de eje. | 32 |
| 2.4.2 Comparación entre las teorías de difracción y la TF para la evaluación de fase. | 33 |
| 2.5 Evaluación de la fase usando el método de la TF. | 36 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| 3 | Método propuesto basado en la IHD y aplicado a líquidos. | 38 |
| 3.1 | Objetos de fase. | 38 |
| 3.2 | La apertura rectangular en la IHD. | 40 |
| 3.2.1 | Proceso para la evaluación de fase. | 41 |
| 3.3 | Cálculo del IR de líquidos en estado estático. | 42 |
| 3.3.1 | Diferencia de fase generada por un contenedor cilíndrico. | 43 |
| 3.3.2 | Cálculo del IR en líquidos sin conocer d_i . | 44 |
| 3.3.3 | Cálculo de variaciones de concentración en dos soluciones líquidas. | 47 |
| 3.4 | Cálculo de variación del IR en sustancias líquidas en eventos dinámicos. | 48 |
| 3.4.1 | Diferencia de fase generada por contenedores rectangulares. | 49 |
| 3.4.2 | Determinación del valor de temperatura en una muestra líquida. | 51 |
| 4 | Resultados experimentales. | 52 |
| 4.1 | Medición de IR en sustancias salinas en eventos estáticos. | 52 |
| 4.1.1 | Preparación de soluciones líquidas. | 55 |
| 4.1.2 | Cálculo del IR en soluciones salinas. | 56 |
| 4.1.3 | Método de aproximación de fase para el cálculo del IR. | 61 |
| 4.1.4 | Medición de ΔCON en soluciones salinas. | 67 |
| 4.2 | IHD en eventos dinámicos. | 68 |
| 4.2.1 | Medición de la evolución de temperatura en líquidos. | 68 |
| 5 | Conclusiones y trabajo a futuro. | 75 |
| 5.1 | Conclusiones. | 75 |
| 5.2 | Trabajo a futuro. | 77 |
| Apéndices | | |
| Apéndice A: | Código de Matlab del cálculo del IR en líquidos. | 79 |
| Apéndice B: | Código de Matlab de aproximación del mapa de fase envuelto. | 81 |
| Apéndice C: | Código de Matlab de diferencias de concentración. | 85 |
| Apéndice D: | Código de Matlab para medir los valores de temperatura. | 87 |
| Apéndice E: | Artículo de mediciones del IR | 90 |
| Apéndice F: | Artículo en la revista Metrology and Measurement Systems (MMS) | 91 |
| Apéndice G: | Artículo en la revista Optical Engineering (OE) | 93 |
| Referencias | | 94 |

Lista de figuras

| Figura | Pag. |
|--|------|
| 2.1 Estados de la materia dependiendo de la aportación o extracción de calor. | 16 |
| 2.2 Trayectoria recorrida por un rayo de luz a través de diferentes medios. | 18 |
| 2.3 Propagación de un frente de onda plano. | 20 |
| 2.4 Configuración holográfica fuera de eje. | 22 |
| 2.5 Etapa de grabado en un esquema holográfico fuera de eje. | 23 |
| 2.6 Etapa de reconstrucción en un esquema holográfico fuera de eje. | 24 |
| 2.7 Ubicación de las contribuciones del frente de onda reconstruido con respecto al holograma. | 25 |
| 2.8 Etapa de grabado del objeto en su estado inicial ($t = 0$). | 27 |
| 2.9 Etapa de grabado del objeto en su estado modificado ($t \neq 0$). | 28 |
| 2.10 Etapa de reconstrucción con la IH de doble exposición. | 30 |
| 2.11 Reconstrucción obtenida con la IH. a) Imagen reconstruida del objeto en un estado inicial, b) Imagen reconstruida con el término de diferencia de fase [65]. | 30 |
| 2.12 Registro de hologramas de objetos grandes. | 32 |
| 2.13 Espectro en frecuencia de un holograma fuera de eje, con una señal portadora entre el orden cero y la imagen real y/o virtual [121]. | 34 |
| 2.14 Diferencias de fase. (a) Reconstrucción con la teoría de Fresnel sin filtrar, (b) Fresnel con filtro, (c) Reconstrucción con el método de la TF sin filtrar, (d) TF con filtro [107]. | 36 |
| 3.1 Sistema óptico para el registro de un holograma generado a partir de una sustancia líquida S_1 | 39 |

| Figura | Pag. |
|--|------|
| 3.2 Sistema óptico para el registro de un holograma generado a partir de una sustancia líquida S_2 | 40 |
| 3.3 Diagrama de ubicación y operación de la apertura. D: difusor; S: muestra líquida; A: apertura rectangular; L: lente positivo de 75 mm; BS: (50/50) divisor de haz cubico; CCD: Charge-Coupled Device; R: haz objeto; O: haz de referencia. | 41 |
| 3.4 Holograma registrado a partir de la IHD con una apertura. | 42 |
| 3.5 Imagen del plano-holograma. | 42 |
| 3.6 Imagen del plano-holograma filtrado. | 43 |
| 3.7 Contenedor de vidrio: (a) vista xy, en donde la región en verde es la región registrada por el dispositivo de registro de imagen. n_g y n_s son los IR del vidrio y de la mezcla líquida, respectivamente. d_i y d_t son las secciones transversales internas y externas del contenedor. (b) vista yz. | 44 |
| 3.8 Distancias transversales del contenedor (tubo de vidrio cilíndrico) $d_{i1} < d_{i2}$ | 46 |
| 3.9 Perfil hiperbólico del LCO característico de un tubo de vidrio cilíndrico. | 46 |
| 3.10 Procedimiento de la IHD para eventos estáticos. | 49 |
| 3.11 Procedimiento de la IHD para eventos dinámicos. | 49 |
| 3.12 Contenedor rectangular, donde: d_i y d_t son las longitudes internas y externas del cubo de vidrio. n_s y n_g son los IR de la sustancia y del material de las paredes del contenedor, respectivamente. | 50 |
| 4.1 Sistema óptico experimental para medir el IR en sustancias líquidas. BS1: (50/50) divisor de haz plano; BS2: (50/50) divisor de haz cúbico; M1: espejo; L1, L2, L3: lentes; D1: difusor; S: tubo de vidrio cilíndrico (contenedor); A1: apertura rectangular; CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (por sus siglas en inglés); SMMF1: segmento de fibra de óptica monomodal; fcx: frecuencia portadora a lo largo de la dirección x del plano el sensor; O: haz objeto; R: haz de referencia. | 53 |
| 4.2 Láser He-Ne con $\lambda = 543.5$ | 53 |
| 4.3 Cámara CMOS de la marca Pixelink de 1.3 megapíxeles. | 54 |
| 4.4 Bomba de líquidos KDSientific 200. | 54 |

| Figura | Pag. |
|---|------|
| 4.5 Diferencias de fase ($\Delta\phi$) de los mapas envueltos de las siguientes soluciones líquidas: (a) $s_{mol1} = 0.086$ mol y $s_{mol0} = 0.003$ mol (agua destilada), (b) $s_{mol2} = 0.172$ mol y $s_{mol1} = 0.086$ mol, (c) $s_{mol3} = 0.258$ mol y $s_{mol2} = 0.172$ mol, (d) $s_{mol4} = 0.344$ mol y $s_{mol3} = 0.258$ mol, (e) $s_{mol5} = 0.43$ mol y $s_{mol4} = 0.344$ mol, (f) $s_{mol6} = 0.516$ mol y $s_{mol5} = 0.43$ mol. | 57 |
| 4.6 Distribución de los valores del IR de la muestra $S_{mol2} = 0.172$ moles. | 59 |
| 4.7 Desviación de los valores de concentración calculados con la IHD y los reportados en la literatura (Ref. [129]). | 60 |
| 4.8 Perfiles de onda generados a partir de las fases desenvueltas de un contenedor cilíndrico con muestras líquidas cuyos IR son: (a) $n_{S_1} = 1.3330$; y (b) $n_{S_2} = 1.3339$; | 62 |
| 4.9 Diferencia de fase de la simulación de los frentes de onda generados a partir de los valores de $n_{S_1} = 1.3330$; y $n_{S_2} = 1.3339$. (a) Perfil de la diferencia de fase y fase envuelta de las sustancias simulados, mostrandose en verde la diferencia de fase desenvuelta y en la línea en azul la diferencia de fase envuelta. (b) Mapa 2D de la diferencia de fase envuelta. | 62 |
| 4.10 Diferencia de fase de la simulación generada a partir con los siguientes los valores de IR, $n_{S_1} = 1.3330$; y $n_{S_2} = 1.3372$; . (a) Perfil de la diferencia de fase entre los frentes de onda de las sustancias simulados, en verde se muestra la diferencia de fase desenvuelta y en la línea en azul se representa la diferencia de fase envuelta. (b) Mapa en 2D de la diferencia de fase envuelta. | 63 |
| 4.11 Distribuciones de fase desenvuelta a partir de un mapa de fase envuelta con: (a) baja frecuencia en las franjas, (b) alta frecuencia en las franjas. | 64 |
| 4.12 Diferencias de fase ($\Delta\phi$) de los mapas envueltos de las siguientes soluciones líquidas, donde la línea en rojo es la sección transversal de la diferencia de fase experimental: (a) $s_2 = 0.1$ mol y $s_1 = 0.0003$ (agua destilada), (b) $s_2 = 0.2$ mol y $s_1 = 0.003$ mol, (c) $s_2 = 0.5$ mol y $s_1 = 0.003$ mol. | 65 |
| 4.13 Mapa en 2D de la diferencia de fase envuelta generada entre S_6 y S_0 , donde la línea en rojo es la sección transversal de la diferencia de fase experimental | 65 |
| 4.14 Aproximación de fase entre S_6 y S_0 . La línea azul representa la diferencia de fase envuelta encontrada con menor error; la línea verde representa la diferencia de fase que es comparada y que cambia de valor; la línea roja punteada significa la diferencia de fase envuelta real obtenida en laboratorio. | 66 |

| Figura | Pag. |
|---|------|
| 4.15 Sistema óptico implementado en la medición de temperatura. BS1: (50:50) divisor de haz plano; BS2: (50:50) divisor de haz cubico; M1, M2: espejos; MO1, MO2: (10×) objetivo de microscopio; L1, L2, L3: lentes; D1: difusor; S: celda de cuarzo; A1: apertura rectangular; CCD: charge-coupled device (por sus siglas en inglés); fcx: frecuencia portadora a lo largo de la dirección x del plano el sensor; O: haz objeto; R: haz de referencia. | 69 |
| 4.16 Celda de cuarzo | 69 |
| 4.17 Termómetro de bolsillo con un rango de -50 a $150^{\circ}C$ | 70 |
| 4.18 Cámara CCD <i>pco.pixelfly.usb</i> | 70 |
| 4.19 Mapas en 2D de las diferencias de fase de los mapas envueltos en los tiempos: (a) $t = 1$ s; (b) $t = 21$ s; (c) $t = 43$ s; (d) $t = 64$ s; (e) $t = 86$ s; (f) $t = 108$ s. | 72 |
| 4.20 Proceso de la IHD para la medición de la evolución de la temperatura en una mezcla líquida. | 72 |
| 4.21 Diferencias de fase de los mapas envueltos y desenvueltos en los 3 pixeles seleccionados para el monitoreo del proceso de enfriamiento en una sustancia líquida para (a) Valores de temperatura envueltos, (b) Valores de temperatura desenvuelta. | 73 |

Lista de tablas

| Tabla | Pag. |
|--|------|
| 2.1 Valores de IR de algunos materiales. | 18 |
| 4.1 Tabla de soluciones salinas ocupadas para el calculo del IR y el ΔCON | 56 |
| 4.2 Representación de las diferencias de fase de las soluciones salinas. | 58 |
| 4.3 Comparación entre los valores de IR obtenidos experimentalmente con la IHD y los reportados en la Ref. [129]. | 59 |
| 4.4 Comparación entre los valores de IR de las muestras líquidas encontrados con la IHD y los encontrados en la literatura. | 66 |
| 4.5 Comparación entre los valores de concentración de las muestras líquidas encontrados con la IHD y los encontrados en la literatura. | 67 |
| 4.6 Valores de temperatura y su comparación con los obtenidos con el termómetro. . . | 74 |

Capítulo 1

Introducción.

Hoy en día, implementamos la ciencia de la física, para estudiar y explicar una gran variedad de fenómenos que nos acontecen a diario. La óptica es una rama de la física que estudia la luz, y sus interacciones con la materia, dando origen a lo que se conoce como la metrología óptica. La metrología óptica, tiene como propósito realizar mediciones de alta precisión, utilizando las ondas de luz como escala de medición. Al utilizar la óptica como herramienta de medición, se tiene la certeza de que nuestras mediciones resultantes tendrán una exactitud superior en comparación con la mayoría de los instrumentos de medición existentes hoy en día. Conocer las variaciones de concentración y temperatura en muestras líquidas es una labor muy importante en las áreas de la ingeniería y la química, ya que estos valores se utilizan en un sin fin de aplicaciones [1, 2]. Tradicionalmente, obtener y medir una propiedad física en un líquido (como concentración, temperatura, viscosidad, turbidez, etc.) se logra de manera invasiva, destructiva, y solo dentro de pequeñas áreas o puntos específicos en la muestra.

En el presente trabajo de tesis se exhibe un esquema óptico alternativo basado en la Interferometría Holográfica Digital (IHD) para el estudio y la caracterización de mezclas líquidas en condiciones estáticas y dinámicas de forma no invasiva, de no contacto, de campo completo, con gran exactitud y resolución, y que además permite obtener resultados casi en tiempo real. El esquema propuesto es capaz de visualizar y medir cambios en las propiedades físicas de los líquidos a través de las variaciones de Longitud de Camino Óptico (LCO), y estos cambios a su vez están asociados con el índice de refracción (IR) de cada muestra líquida. La principal

contribución de este trabajo está dirigida al desarrollo de un nuevo método de IHD de doble exposición, en el cual se filtran, procesan y consideran las contribuciones de alta frecuencia de un objeto de fase, para detectar y medir cambios de concentración y temperatura con alta sensibilidad y exactitud en soluciones líquida. Además, para el caso de eventos estáticos, y utilizando determinados contenedores que generan diferencias de fase con un patrón conocido, se desarrolla una aproximación de fase capaz de obtener valores del IR, a través de una simulación que aproxima una parte del mapa de fase envuelto con la diferencia de fase real de la muestra.

Con el sistema óptico propuesto se obtuvieron mediciones de forma sencilla y resultados con gran exactitud y sensibilidad tanto en eventos estáticos como dinámicos. Además con la implementación de una apertura rectangular se logró mejorar la evaluación y reconstrucción de la fase del frente de onda de interés, ya que se selecciona las contribuciones deseadas en el espectro de frecuencias del holograma.

1.1 Antecedentes de la holografía y la IHD.

La óptica es una rama de la física que estudia la luz, la manera en que está es emitida, propagada y absorbida por los objetos [3]. Con el estudio de la luz, podemos entender la manera en cómo interactúan los haces de luz para formar las imágenes de los objetos que están a nuestro alrededor [4]. Una técnica óptica capaz de registrar y reproducir imágenes completas en base a algunos fenómenos ópticos (interferencia y difracción) es la holografía. La palabra “holografía” se deriva de la palabra griega “holos” que significa completo y de la palabra “grafo” que significa escritura [5]; debido a que la holografía toma en cuenta la totalidad de una onda de luz dispersada por un objeto para generar una imagen. La técnica de la holografía graba un campo de luz completo (amplitud y fase), para posteriormente reconstruirlo y ser visto por un observador, lo que hace creer a un observador que está en presencia del objeto que generó tal campo de luz; y que dependiendo de su posición, el observador podrá ver una perspectiva (imagen) diferente del objeto. En un concepto más estricto, la holografía utiliza

los fenómenos ópticos de la interferencia y la difracción de la luz para generar imágenes con profundidad o las bien conocidas imágenes 3D.

La técnica de la holografía fue desarrollada por el científico Austro-Húngaro Dennis Gabor en 1947 mientras trabajaba en el laboratorio de investigación de la British Thomson Houston Company en Rugby, Inglaterra. En un inicio, Gabor llamó a la holografía como “reconstrucción de ondas” e intentaba eliminar las aberraciones ópticas originadas por el uso de lentes en el microscopio electrónico de la compañía Metropolitan Vickers. Gabor registraba un patrón de interferencia en una placa fotográfica transparente, a la que llamó holograma; él explicaba este patrón como la superposición entre un frente de onda primario con una fase constante y un frente de onda secundario que en su fase contenía las características físicas del objeto, para después reconstruir la imagen completa del objeto. La idea de Gabor era muy innovadora para la tecnología tan limitada de la época, ya que utilizaba una lámpara de mercurio como fuente de luz, que en ese entonces era la fuente de luz que otorgaba mayor coherencia. Sin embargo, la holografía fue poco aceptada por la comunidad científica debido a la pobre calidad de las imágenes obtenidas y a un traslape (aliasing de la “imagen real” y la “imagen virtual”) generado al momento de reconstruir la imagen del holograma [6, 7]. Los inconvenientes en la holografía no desanimaron a Gabor y siguió trabajando en investigaciones sobre su técnica de reconstrucción de ondas. Un año más tarde, Gabor realizó trabajos en microscopía [8] y desarrolló una versión extendida de esta última [9]. Sin embargo, fue solo hasta el año de 1971 cuando Gabor ganó el premio Nobel de física por su trabajo de “reconstrucción de ondas” en 1947 [7, 10].

Años más tarde, la holografía toma un nuevo impulso y fue reinventada mediante la aparición del láser en 1960 [11], que si bien no fue una invención exclusiva para la holografía, este si fue un elemento necesario para esta. La reinención de la holografía fue originada por Emmett Leith y Juris Upatnieks en 1962 y 1963 en la Universidad de Michigan [12–14]. Leith estaba trabajando en la mejora del radar de apertura sintética, cuando se percató de estar realizando una investigación similar a la de “reconstrucción de ondas”, pero con una longitud de onda más grande (ondas de radio) que la de la luz. Emmett Leith junto con el joven científico Juris Upatnieks repitieron las investigaciones de Gabor utilizando como fuente de luz un láser. Después, idearon un nuevo esquema de generación de hologramas al que llamaron “fuera de

eje” (en inglés off-axis), con este nuevo esquema obtuvieron una imagen virtual separada de la imagen real del objeto. La separación de las imágenes en la reconstrucción de la holografía detono un nuevo interés en la comunidad científica hacia la holografía, y el mundo empezó a darse cuenta del verdadero potencial de la técnica, hasta el punto que hoy en día la configuración de la holografía fuera de eje, que originaron Leith y Upatnieks, es la más utilizada en todo el mundo [15]. Lejos de ahí y al mismo tiempo, el Dr. Yuri Denisyuk de la extinta U.S.S.R. combina la holografía con la fotografía a color desarrollada por Gabriel Lippmann, para producir los hologramas de reflexión, los cuales pueden ser vistos con una luz ordinaria incandescente y una reconstrucción de la imagen a color [16–18].

El esquema holográfico fuera de eje fue aprovechado por Robert L. Powell y Karl A. Stetson para desarrollar lo que se conoce como la Interferometría Holográfica (IH) en 1965, en la Universidad de Michigan [19]. La IH compara interferométricamente dos o más frentes de onda registrados holográficamente en diferentes lapsos de tiempo o estados físicos de un objeto. La comparación entre los frentes de ondas genera una imagen del objeto con una serie de franjas oscuras y blancas (franjas de interferencia) que indican la existencia de un cambio en la morfología (fase) de un objeto [20]. La principal ventaja de la IH, es que es capaz de medir variaciones de fase en condiciones estáticas y dinámicas con alta precisión (en fracciones de longitud de onda) en toda la superficie del objeto en el cual se estudian los cambios físicos. Las primeras aplicaciones de la IH van desde mediciones de esfuerzos en superficies [21], análisis de deformaciones [22], estudios mecánicos de instrumentos musicales [23] y vibraciones de alta frecuencia en estructuras sólidas [24]. Gracias a las aplicaciones anteriores y muchas más, es que la IH es ahora y por mucho, la herramienta no destructiva y de no contacto en pruebas físicas, con mayor preferencia en la industria [25], cuyo potencial de detección en pequeñas deformaciones era en un principio, de alrededor de $1/4000$ mm por franja de interferencia, obtenidos en el estudio de contornos de objetos desarrollado por Haines y Hildebrand en 1965 [26, 27]. Un avance en la implementación de elementos ópticos en la IH fue el uso de la fibra óptica en la configuración de fuera de eje, y se dio por primera vez en 1985 [28], si bien no es un avance que aumentaría la sensibilidad de medición de la IH, este fue un avance en la posibilidad de desarrollar configuraciones de esquemas ópticos más compactos.

La conjunción de la holografía analógica y la transformación matemática conocida como la Transformada de Fourier (TF) fue realizada por primera vez por Vander Lugt en 1964, gracias al agregado de un lente en el esquema holográfico fuera de eje [29]. Otra aplicación importante fue hecha en 1965 por el investigador G. W. Stroke, quien desarrolla la holografía de Fourier sin lentes en 1965 [30]; en la que él quita el lente y obtiene una proyección del frente de onda objeto; aunque es muy grande y se traslapan las contribuciones de la imagen virtual, real y el orden cero obtenidos en la TF. Años más tarde, en 1971, C. Knox y R. E. Brooks presentan la primera grabación cinematográfica en la cual se mostraba el vuelo dinámico de un mosquito usando la holografía [31], de aquí nace y se entiende que la holografía puede ser utilizada para visualizar eventos dinámicos y no solamente estáticos como se venía desarrollado desde mucho tiempo atrás.

El desarrollo de la tecnología invadió todas las áreas de la ciencia y con la aparición de la primera computadora, la ENIAC en 1940 [32], la tecnología pudo fusionarse con la holografía y las diferentes técnicas que se derivan de esta. El primer acercamiento de la holografía con las computadoras originó los Hologramas Generados por Computadora (HGC). Los HGC fueron desarrollados por B. R. Brown y A. W. Lohmann en 1966 [33–35], quienes generaban hologramas artificiales desarrollados mediante métodos numéricos y eran reconstruidos en laboratorio utilizando elementos ópticos. El inicio de lo que se conoce como la Holografía Digital (HD) fue posible en un inicio, gracias a las formulaciones matemáticas de difracción de frentes de onda desarrolladas por J. Goodman y R. W. Lawrence en 1967 [36] y a una interpretación más aplicada en el mundo físico por M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov y L. P. Yaroslavskii en 1972 [37, 38]. Las primeras aplicaciones en mediciones de partículas pequeñas con HD fueron realizadas en 1987 por L. Onural y P. D. Scott [39], mientras Haddad *et al.* describen la HD en microscópica usando la TF en la reconstrucción de los hologramas digitales en 1992 [40]. Otro gran paso para la HD fue dado en 1982 por Mitsuo Takeda *et al.*, quienes proponen un método de evaluación de fase aplicando la TF [41], mientras que Thomas Kreis, propone su propio método de evaluación de fase con la TF en 1986, pero orienta su trabajo hacia la IH [42]. Sin duda alguna, un gran paso en la HD, fue el registro directo de los hologramas de Fresnel en un Charge Couple Device (CCD)(o en español: dispositivo de carga acoplada), realizado por

primera vez por Schnars y Jüptner en 1993 y 1994 [38, 43], terminando así de desarrollar la HD como un método capaz de grabar y reconstruir hologramas totalmente digitalizados con un dispositivo electrónico. Lo que sigue es inminente; Schnars aplicó la HD en la IH y demostró que la reconstrucción de hologramas digitales ofrece muchas más posibilidades que los métodos convencionales, y se inició así el desarrollo de la IHD en 1994 [44]. Con la IHD los términos de fase de los hologramas son reconstruidos, calculados y comparados digitalmente con otro frente de onda digitalizado y reconstruido numéricamente [45].

Después, G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani en 1995 implementa la IHD en el análisis y estudio de vibraciones en sólidos usando la ecuación de difracción de Fresnel y el método de evaluación de la fase con la TF propuesto por Mitsuo Takeda *et al.*, además, agregaron una pupila al sistema óptico para ayudar en el filtrado de ruido en el holograma, asimismo, se tienen localizadas las contribuciones de la imagen en el frente de onda reconstruido [46]. En 1966, H.J. Tiziani y G. Pedrini hicieron una actualización del método detectando vibraciones de mayor frecuencia [47]. El corrimiento de la frecuencia portadora en hologramas digitales fue realizada y estudiada a fondo utilizando una apertura en ese mismo año (1996) por G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani [48]. En 1997 G. Pedrini, H. J. Tiziani y Y. L. Zou realizan una comparación entre los hologramas de Fresnel, los hologramas de Fourier (método de evaluación de la fase con la TF), y visualizan los resultados de la reconstrucción de hologramas [49]. En 1998 se realiza la eliminación y separación del orden cero utilizando un filtro pasa-bandas con el mismo principio de la apertura y un segmento de fibra óptica, por la cual viaja el haz de referencia [50]. El total de las investigaciones anteriores demostraron, que usando los hologramas fuera eje y agregando una apertura rectangular en objetos sólidos, se obtiene un mejor control de las frecuencias portadoras y la separación del orden cero de la imagen real y virtual del holograma. Sabiendo eso, G. Pedrini, S. Schedin y H. Tiziani colocan un lente para aumentar la imagen de la apertura y registrarla en el CCD [51]. Años más tarde en 2006, G. Pedrini, Osten y Gusev implementan la óptica de alta potencia (luz láser de 10 W) y la TF para obtener una mejor iluminación de un objeto vibrando a altas velocidad [52], demostrando que con el uso de la apertura es posible estudiar eventos dinámicos. También, en ese mismo año, se demuestra que la medición de pequeñas diferencias de fase (desplazamientos de 50 nm) al

utilizar los hologramas realizados con la configuración fuera de eje y una abertura rectangular, son logradas con alta exactitud y sensibilidad en objetos sólidos [53].

1.1.1 Variaciones de la Longitud de Camino Óptico (LCO) con IHD.

Una de las aplicaciones más importantes de la IHD es la visualización y el análisis de variaciones físicas en objetos de fase (objetos que solo modulan la fase del frente de onda de la luz transmitida por estos y no alteran en gran medida la amplitud de la onda) que están ligadas con cambios en el IR del objeto. Las variaciones del fase son estudiadas como alteraciones de la LCO en un objetos de fase [24, 54, 55]. Las primeras aplicaciones de la IHD en mediciones de variaciones físicas en fluidos fue realizada por Kebbel *et al.* en 1998 [56]. Aunque, el primer trabajo que relaciona el IR con una variación de temperatura sin ocupar la IHD es dado por Sweeney y Vest en 1974 [57].

Medición del IR en líquidos en estado estático.

Comúnmente, la determinación de los valores del IR es realizada utilizando la ley de Snell, que habla sobre el desplazamiento del ángulo del haz incidente con respecto del haz reflejado [58]. Algunos esquemas ópticos, que miden variaciones del IR en líquidos, utilizan la ley de Snell para realizar su funcionamiento con la ayuda de prismas [59–62], cubos [63–65] y contenedores con morfologías especiales [66] donde se contiene el líquido a analizar (lo que crea un objeto de fase cuyo IR depende del líquido dentro). El primer trabajo reportado sobre la medición del IR y su variación en dependencia con la temperatura en el agua destilada fue implementando con un prisma y realizado por Tilton y Taylor en 1938 [67], aunque en esta última la relación del IR del agua, y su dependencia con la longitud de onda, temperatura y densidad no fueron consideradas, pero si fueron comprobadas hasta 1985 [68]. El gran inconveniente de los métodos comunes de medición del IR usando la ley de Snell es que solo se puede realizar una estimación de los ángulos entre los haces medidos, lo cual disminuye la exactitud de este tipo de métodos, además, de que son puntuales y por lo cual solo generan mediciones de una pequeña región y no de la totalidad de la muestra líquida.

Medición del IR en líquidos en estado dinámico.

A lo largo de los años se han desarrollado técnicas ópticas modernas que utilizan la IH para determinar los valores de IR de una forma más exacta, no destructiva, de no contacto, no invasiva, y de campo completo (que realizan las mediciones en la totalidad de la superficie de la muestra) [24, 58, 69]. La IH en el estudio del proceso de difusión de líquidos fue estudiada por primera vez por Gabelmann-Gray y Fenichel en 1979 [70]. Después, con el desarrollo de los dispositivos digitales y la aparición de la IHD, los científicos Zhao, Li y Ma en 2006 determinan los coeficientes de difusión de dos muestras líquidas [71]. Un estudio de difusividad de dos líquidos transparentes relacionados a un cambio de concentración con una diferencia de fase fue dado por Anand, Chhaniwal y Narayanamurthy en ese mismo año [72]. Según Colombani y Bert las posibles aplicaciones de la IHD en estudios de líquidos en estado dinámico van desde la difusión, interdifusión, difusión a través de meniscos, la visualización del efecto Soret, convección hasta la disolución [73, 74].

Un importante trabajo para la determinación del IR en muestras líquidas usando HD y el método de estimación de fase con la TF fue desarrollado por Mosarraf, Singh y Shakher en 2006, aunque en este no se usa una apertura para el registro de solo las altas frecuencias del frente de onda objeto, además, este trabajo solo realiza la medición en pequeños puntos de la muestra y tiene un error en los datos de variación del IR respecto al obtenido con un refractómetro de Abbe de 0.0002 [75]. Por otra parte, algunos nuevos trabajos relacionan una variación del IR con una variación en la concentración y/o temperatura en mezclas líquidas, pero ya en campo completo [76] y en condiciones dinámicas [77], aunque no trabajan con la TF; se pierde el filtrado de baja frecuencias. La IHD también puede ser implementada para estudiar cambios de fase sólido-líquido; como lo demostró Colombani y Bert en 2007 con la disolución de yeso en una muestra de agua [78]. Cambios de fase líquido-sólido en procesos de cristalización ligados a variaciones de fase fueron estudiados por Yin *et al.* en 2008 [79], aunque no se asocia la temperatura de cambio de fase en este trabajo. Por otra parte, el crecimiento de objetos de fase (bacterias) de tamaño microscópico se desarrolla en base al seguimiento del término de fase en eventos dinámicos en 2011 [80].

La aplicación de la TF en líquidos fue descrita por primera vez en 1991 por Haddad *et al.* [81]. En cuestiones aplicadas para la IHD en muestras biológicas se empezaron a trabajar en 2001 [82], mientras que, para la visualización y medición de los procesos de difusión en líquidos con el esquema fuera de eje y los hologramas de Fourier solo fueron descritos hasta el 2009 por Sheoran, Anand y Shakher [83]. Relacionado a esto último, la determinación de los coeficientes de difusión utilizando IHD y la TF con un filtrado pasa-banda fueron presentados por He *et al.* en 2009 [84], aunque su trabajo no presenta un muestreo suficientemente grande de las frecuencias espaciales y altas frecuencias en el espectro de Fourier. El desarrollo de filtrado del término correspondiente al orden cero van desde la visualización de vórtices de Karman en 2009 [85], el monitoreo del proceso de cristalización en 2012 [76], el estudio en tiempo real de un flujo de aire con diferente IR en 2013 [86], la medición de la transferencia de masa por calor en 2014 [87] hasta la visualización de reacciones inestables de difusión entre líquidos en 2014 [88]. Un recuento de todas las posibles aplicaciones de la IHD en visualización de eventos dinámicos de campos complejos de fluidos es presentada por Zhao y Di en 2015 [89]. El perfeccionamiento de los datos a los exhibidos por He *et al.* (antes mencionado) fue originado gracias a Mialdun *et al.* en 2011, quienes realizan una aproximación del término de la diferencia de fase con la ayuda de un polinomio [90]. Después, en 2015 He *et al.* presenta una mejora de su trabajo (del 2009 [84]) e implementa un polinomio como lo hizo Mialdun para aproximar la fase durante el proceso de difusión de dos líquidos transparentes [91].

En relación a la medición de temperatura en objetos de fase, en 2008 Shakher y después Mosarraf en 2009 utilizan la IHD y la TF para medir el flujo de convección de la temperatura, aunque los trabajos presentados no son de campo completo y se basa en el número de franjas encontrados en la diferencia de fase [92, 93]. Después, Sheoran y Shakher presentan una mejora para medir la temperatura de flamas en 2012 [94], aunque requieren de los mapas de la diferencia de fase envuelta. Una investigación relacionada a los estudios de temperatura anteriormente presentados, se dio en 2012 por Sharma, Sheoran y Shakher al estudiar la difusión en una flama generada por los componentes de gas butano y el aire del medio ambiente [95]. Una investigación más compleja de la medición de campos de temperatura utilizando un interferómetro de Twyman-Green y la IHD fue presentado por Dolecek *et al.* en 2013 [96].

El estudio de variaciones de temperatura en objetos de fase usando IHD fue dada por Bom-mareddien en 2014 con gran exactitud [97]. Un año después, Ahai y Saghir, presentan la medición de temperatura de un líquido usando un interferómetro de Mach-Zehnder y un análisis de como las paredes del contenedor afectan la temperatura del líquido que está dentro [98], sin embargo este proceso no puede monitorear la temperatura usando una pequeña región del mapa de fase envuelto. Por otra parte, existen los métodos basado en IHD que mide variaciones en fluidos [99], como en flamas [94–96, 100, 101] y líquidos [87, 93, 98, 99, 102–105]. Aunque, en estas investigaciones se usa la totalidad del mapa de fase envuelto para calcular la temperatura del fluido y además requieren de un algoritmo de desenvolvimiento de fase para su funcionamiento. Nuevos métodos de medición de temperatura en eventos dinámicos que realizan el seguimiento de fase utilizando la evolución de la intensidad de un solo punto son desarrollados con el fin de medir y monitorear la evolución de una propiedad física en un líquido [76, 77, 106], pero estos métodos no consideran la temperatura como la propiedad física a medir.

1.2 Estado del arte de la IH en líquidos.

1947 D. Gabor crea la Holografía [6].

1962 E. Leith y J. Upatnieks desarrollan la Holografía fuera de eje [12].

1965 R. L. Powell y K. A. Stetso fundamentan y desarrollan la IH [19].

1966 L. Heflinger, R. Wuerker, y R. Brooks experimentan con fluidos, realizando mediciones de cambios de fase utilizando variaciones de intensidad [107].

1967 J. W. Goodman y R. W. Lawrence desarrollan numéricamente la teoría escalar de la difracción [36].

1972 M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov y L. P. Yaroslavskii utilizan las teorías de difracción para su implementación en la HD en laboratorio [37].

- 1974** D. W. Sweeney y C. M. Vest realizan mediciones de densidad y temperatura en fluidos en base a variaciones en los ángulos de los rayos reflejados por el objeto [57].
- 1976** N. Bochner y J. Pipman visualizan y miden el proceso de difusión entre diferentes tipos líquidos a través de la IH [108].
- 1979** L. Gabelmann-Gray y H. Fenichel experimentan con la difusión en líquidos transparentes con la IH [70].
- 1982** M. Takeda, H. Ina y S. Kobayashi proponen el método de la TF para la evaluación de la distribución de fase en hologramas de un frente de onda objeto [41].
- 1987** J. D. Trolinger calcula el IR en líquidos con la IH [54].
- 1993** U. Schnars y W. Jüptner desarrollan la HD implementado un CCD. [43, 109].
- 1994** U. Schnars propone la IHD en objetos sólidos [44].
- 1995** G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani implementan la IHD en el análisis de vibraciones en sólidos usando la ecuación de difracción de Fresnel y el agregado de una pupila al sistema óptico para la separación de los ordenes reconstruidos [46].
- 1997** G. Pedrini, H. J. Tiziani y Y. L. Zou realizan comparaciones entre los hologramas de Fresnel y los hologramas de Fourier [49].
- 1998** Kebbel *et al.* aplican la IHD en la medición de variaciones del IR en medios transparentes [56].
- 1999** Wagner *et al.* utilizan los hologramas digitales y el método de la TF aplicados a la interferometría en objetos sólidos [110].
- 1999** G. Pedrini, S. Schedin y H. J. Tiziani colocan una apertura y un lente entre el objeto solido y el dispositivo fotosensible para registrar objetos de diferente tamaño con respecto al CCD [51].

- 2006** A. Anand, Vani K. Chhaniwal y C. S. Narayanamurthy estudian y visualizan en tiempo real el proceso de difusión en líquidos transparentes con la IHD [72].
- 2007** J. Colombani y J. Bert estudian variaciones de propiedades físicas en muestras líquidas usando la IHD [73].
- 2008** Shakher *et al.* utilizan la IHD para la medición de temperatura de un objeto de fase [92].
- 2009** G. Sheoran, A. Anand y C. Shakher utilizan el método de la TF para visualizar el proceso de difusión entre dos líquidos [83].
- 2012** Y. Zhang *et al.* estudian el proceso de cristalización de la proteína lisozima en tiempo real utilizando la IHD [76].
- 2012** Q. Wang *et al.* visualizan y miden en campo completo el proceso de calentamiento de una muestra líquida transparente utilizando la IHD y el método de la TF [102].
- 2012** M. Karray, P. Slangen y P. Picart realizan una comparación entre los hologramas reconstruidos con la teoría de difracción de Fresnel y el método de la TF, encontrando que el mapa de de diferencias de fase envuelto contiene, un leve pero significativo mayor número de franjas [111].
- 2015** M. G. He, S. Zhang, Y. Zhang, y S. G. Peng determinan los coeficientes de difusión durante el proceso de difusión de dos líquidos transparentes en campo completo implementado la IHD, el método de la TF, y un polinomio de aproximación de fase [91].

1.3 Planteamiento del problema.

El estado líquido es el estado de la materia de mayor abundancia en el planeta tierra. Lo cual, nos conlleva a interactuar con algún tipo de mezcla líquida dentro de nuestra vida cotidiana. Soluciones líquidas pueden clasificarse en base a sus propiedades físicas como: concentración, peso, color, temperatura de ebullición, fusión, viscosidad, entre otras. Hoy en día, para las ciencias, agencias regulatorías, procesadoras de alimentos y consumidores, es de gran

importancia determinar, visualizar y monitorear las propiedades físicas de los líquidos con gran exactitud y rapidez. En los últimos años se han reportado métodos ópticos avanzados capaces de asociar variaciones del IR de un campo óptico, con las propiedades físicas de temperatura y concentración de la sustancia que los dispersa.

1.4 Justificación.

La IHD es una técnica metrológica óptica basada en el principio de holografía capaz de comparar y medir con muy alta sensibilidad variaciones de fase que son asociadas al IR. La técnica de la IHD se caracteriza por ser una herramienta simple, exacta, no invasiva, no destructiva, versátil y de resultados en campo completos que proporciona información prácticamente en tiempo real, y de ante todo de fácil implementación. Este trabajo de investigación está dirigida a proponer, estudiar e implementar un arreglo óptico experimental compacto y robusto basado en la IHD que sea capaz de medir y monitorear con alta sensibilidad y velocidad las diferencias de fase entre dos o más frentes de onda provenientes de muestras líquidas en condiciones estáticas y dinámicas, y que están contenidas en recipientes no especializados que comúnmente son usados en tareas cotidianas fuera del laboratorio. Las diferencias de fase obtenidas serán asociadas con las propiedades físicas de concentración y temperatura en líquidos para estudiar la diferencia y evolución de estas propiedades físicas que son de gran interés para la ingeniería y la química.

1.5 Hipótesis general.

El uso de un tubo de vidrio común y su caracterización usando una fase de referencia en el sistema de la IHD podrían eliminar la dependencia en el término de fase del conocimiento de las dimensiones del objeto de fase y obtener valores del IR a pesar de imperfecciones existentes en la morfología del tubo de vidrio.

La implementación de una apertura rectangular permitirá incrementar la recolección de luz del holograma y la sensibilidad en los resultados del método de la TF para la evaluación de la fase de objeto transparente o una muestra líquida en condiciones estáticas.

La IHD es capaz de medir y visualizar eventos dinámicos de variaciones de las propiedades físicas de una muestra líquida y obtener resultados prácticamente en tiempo real.

Hipótesis particulares.

-La implementación de la apertura en el sistema óptico permitirá mejorar la recolección de luz y registrar una mayor cantidad de altas frecuencias espaciales que definen el objeto.

-La utilización de la TF permitirá una reconstrucción mas rápida y exacta de los frentes de onda. Mediante una aproximación de la diferencia de fase se puede mejorar los resultados.

1.6 Objetivo

Implementar y desarrollar un sistema óptico basado en IHD para medir y monitorear de manera estática y dinámica con alta sensibilidad cambios en las propiedades físicas de concentración y temperatura en líquidos. Todo esto, de manera no invasiva, no destructiva, de no contacto y de campo completo.

Capítulo 2

Definiciones y fundamentos matemáticos.

La técnica holográfica utiliza los fenómenos ópticos de difracción e interferencia de la luz para registrar, y posteriormente reconstruir imágenes. La IH es una técnica interferométrica basada en la holografía capaz de medir variaciones físicas entre dos objetos en diferentes periodos de tiempo, esta técnica encuentra su campo de acción dentro de la metrología óptica [20].

2.1 Estados de la materia.

Cualquier sustancia o mezcla que nos rodea, se presenta en diferentes formas o estados. Los estados de la materia: sólido, líquido o gaseoso se generalizan bajo el concepto de estados de agregación física. Estos estados de la materia se caracterizan en base a la movilidad (energía cinética) de sus partículas constituyentes elementales, que dependen de la magnitud de las fuerzas de cohesión existentes entre las partículas. En el estado sólido de la materia, las partículas están sin movimiento alguno, mientras que en el estado líquido se deslizan con cierta facilidad entre si, por el contrario, en el estado gaseoso, las partículas constituyentes en un objeto experimentan una completa libertad de movimiento (con un mayor grado de energía cinética de sus partículas). Si se modifican las condiciones de temperatura (incremento o pérdida de energía calorífica) se modificará la energía cinética de las partículas de un cuerpo, lo que modifica la presión (unión) de estas; por lo que las uniones de las partículas de una sustancia cambian entre los distintos estados de la materia [112, 113].

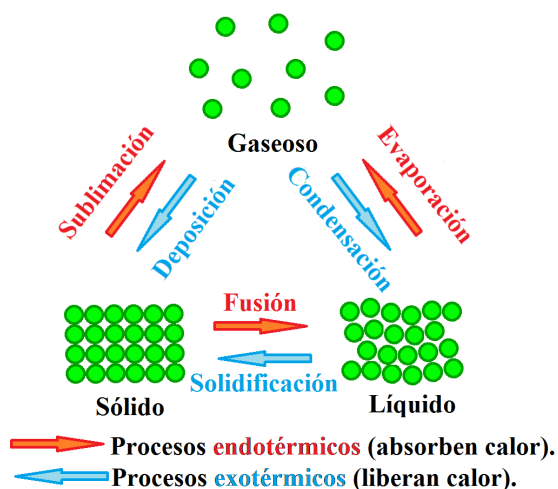


Figura 2.1 Estados de la materia dependiendo de la aportación o extracción de calor.

2.1.1 Soluciones líquidas.

Las soluciones o disoluciones líquidas juegan un papel importante dentro de la química y física, y de hecho están en todo los objetos del mundo que nos rodea. Una solución es una mezcla homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias puras. Generalmente a los componentes de estas mezclas son conocidos como un disolventes (componente presente en mayor cantidad) y por uno o varios solutos (componentes que se disuelven, por lo general en menor proporción de la mezcla) [114]. Un ejemplo de una solución sólido-líquido, puede ser sal o azúcar disueltos en agua. Los combustibles, alimentos, medicamentos, agua, bebidas, vinos, productos comerciales de todo tipo, hasta el aire que respiramos, todos ellos son soluciones [115]. Los diferentes tipos de soluciones son caracterizadas dependiendo de la cantidad de soluto y del solvente en una mezcla [116]. Una solución líquida es aquellas en la que el solvente se encuentra en estado líquido y es caracterizada en base a sus propiedades físicas de concentración, peso, color, punto de ebullición, cohesión, entre otras [114].

Existen una gran cantidad de técnicas ópticas utilizadas para medir y visualizar variaciones del IR de muestras líquidas. Las principales de estas técnicas ópticas son las conocidas como Schlieren (de la navaja), Shadowgraph (de sombras) y las técnicas interferométricas [58]. De estas últimas, nace la IH [58]. Las técnicas de Schlieren y Shadowgraph visualizan los valores

de la derivada del IR en el fluido bajo estudio. Como es bien conocido, los métodos interferométricos utilizan las diferencias de la LCO entre frentes de onda para generar un patrón de interferencia, y basan su funcionamiento en la medición de la variación del fase un haz de luz de referencia y otro propagado por una sustancia líquida.

2.1.2 Medición de las propiedades ópticas de la materia líquida.

Las propiedades ópticas de la materia están definidas por la manera en que la luz interactúan con ella, y son propias de cada tipo de material y de su estado de agregación; tiene relación con el grado de energía cinética de las partículas en un cuerpo. Los fenómenos ópticos producidos al estar en contacto una luz con un material van desde la transmisión, absorción, reflexión, refracción, esparcimiento de la luz, entre otros. Para el caso de materiales en el estado líquido, se da el fenómeno de la refracción; que da principio al IR.

Índice de refracción (IR).

El valor de la constante del IR en materiales transparentes, señala la relación de la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en el medio con el que interactúan la luz. Este se simboliza por la letra n , se trata de un valor adimensional y puede calcularse como

$$n = \frac{c}{v},$$

donde c representa la velocidad de la luz en el vacío, v es la velocidad de la luz en el medio cuyo IR se calcula (por ejemplo: agua, vidrio, etc.) [5]. La Tabla 2.1 enlista los IR de algunos materiales de importancia.

En objetos de fase o materiales transparentes, una variación del IR depende de una variación de la concentración y/o temperatura del material; ya que dependiendo del grado de concentración y/o temperatura de un cuerpo, una luz que viaja a través de la sustancia modifica la velocidad con la que se propaga [3].

Una completa caracterización de algún material líquido puede realizarse dependiendo del valor o la variación del IR que presenta [24]. En óptica, la LCO o distancia óptica es el producto de la longitud geométrica del objeto por el que viaja la luz y el valor del IR de ese medio. La

Tabla 2.1 Valores de IR de algunos materiales.

| Méδιο | Índice de refracción n |
|-----------|--------------------------|
| Vacío | 1 |
| Aire | 1.000293 |
| Agua | 1.3330 |
| Vidrio | 1.5 |
| Diamantes | 2.47 |

LCO es importante porque determina la fase de una onda de luz, y que dependiendo de este valor es que será el resultado los fenómenos de interferencia y difracción de la luz [117]. En la Fig. 2.2 se aprecia como viaja un rayo de luz a través de varios materiales (medios) con diferente IR.

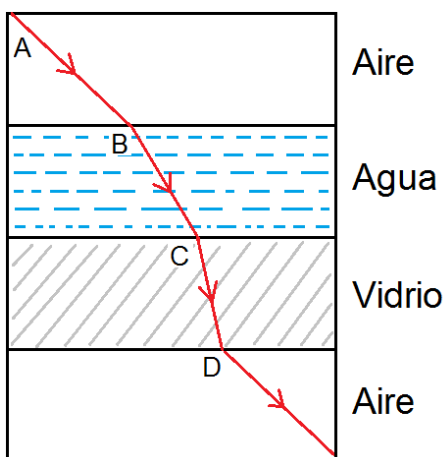


Figura 2.2 Trayectoria recorrida por un rayo de luz a través de diferentes medios.

2.1.2.1 La LCO en líquidos.

Un Mol se refiere al número de *Avogadro* de partículas (átomos, moléculas, iones) existentes en un elemento, mientras que el concepto Molaridad se refiere al número de moles de un soluto en 1 litro de solvente [118]. Una de las formas de determinar y definir una mezcla, es relacionando la cantidad o el grado de presencia de una soluto en una solución; a lo que

llamamos concentración [119], y que afecta a la LCO de una mezcla líquida. Dicho de otra forma, una sustancia con una determinada molaridad crea también una determinada LCO.

La temperatura de un líquido también crea un cambio en la LCO de un líquido; al tener un nivel mayor de energía cinética (debido a un aumento de calor) de las partículas constituyentes del líquido, se verá reflejado en la velocidad de la luz en ese medio. Por lo que al tener un cambio de temperatura, también se obtiene un cambio en el IR que presenta dicha sustancia.

Una variación en el IR de una sustancia depende principalmente de dos cantidades definidas en la expresión [120]

$$dn = \frac{\partial n}{\partial T}dT + \frac{\partial n}{\partial CON}dCON, \quad (2.1)$$

donde $\frac{\partial n}{\partial T}$ y $\frac{\partial n}{\partial CON}$ son las derivadas del IR con respecto a la temperatura T y a la concentración CON , respectivamente. dt y $dCON$ indican los cambios de los valores de temperatura y concentración, respectivamente.

2.1.3 Luz.

La luz es absorbida y emitida por diminutos y discretos estallidos de partículas denominados fotones. Los fotones son partículas elementales sin masa, sin carga, estables, que poseen una energía relacionada con la longitud de onda λ , y que sólo existen a la velocidad de la luz [121, 122]. El comportamiento de un elevado número de fotones que ocupan el mismo estado, está gobernado por sus propiedades ondulatorías; por lo que desaparecen las propiedades granulares e intrínsecas de un rayo y son reemplazadas por las de un campo electromagnético como medio continuo de una onda de luz [5, 123].

Una onda de luz polarizada se caracteriza principalmente por sus parámetros De su posición en x e y del plano de coordenadas cartesianas. El viaje de una onda polarizada monocromática U es descrito si utilizamos la ecuación de la onda, que es expresada como

$$U(x, y) = |u(x, y)|\cos[2\pi\nu + \phi(x, y)], \quad (2.2)$$

donde u es la amplitud compleja, ϕ la fase y ν es la frecuencia de la onda armónica de luz.

Dicha representación en la Ec. (2.2) también puede ser escrita usando la forma exponencial compleja, quedando como

$$U(x, y) = |u(x, y)|\exp[i\phi(x, y)]. \quad (2.3)$$

Cuando un conjunto de ondas electromagnéticas se propagan por el espacio libre, y todas ellas se encuentran en un mismo instante, y un lugar geométrico dado, a ese lugar geométrico se le suele llamar frente de onda [5]. Los frentes de onda pueden visualizarse como superficies o líneas que se desplazan a lo largo del tiempo sin tocarse y que describen una geometría. Un grupo de frentes de onda (con la misma fase) puede ser descrito utilizando la forma de la Ec. (2.3), y que representa un frente de onda plano (ver Fig. 2.3).

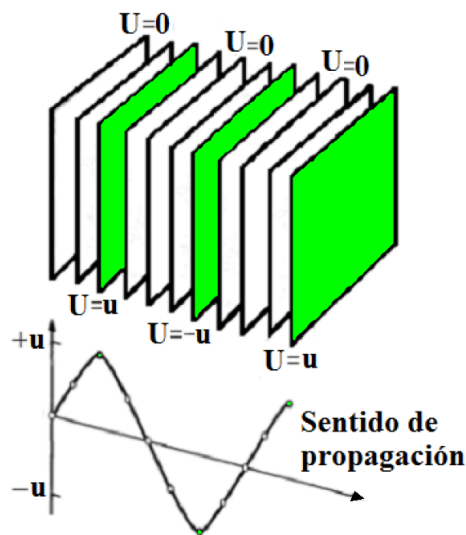


Figura 2.3 Propagación de un frente de onda plano.

2.2 Holografía.

En la holografía convencional consta de dos etapas: grabado y reconstrucción [6–10]. En las técnicas de registro de imágenes, la fotografía solo considera la amplitud de una onda de luz en el registro de imágenes. Mientras que por el otro lado, la holografía toma en cuenta la amplitud y la fase de un frente de onda dispersado por un objeto; con estos dos valores (amplitud y fase) se realiza una imagen con profundidad (en 3D), que no es plana o en 2D

como una fotografía. En los dos casos, la amplitud de la onda señala la intensidad luminosa que es reflejada por el objeto y que ayuda a visualizar la imagen, mientras la fase que solo está en la holografía, es indica la posición en el espacio de cada pequeño punto en la superficie del objeto que refleja la luz [124].

2.2.1 Etapa de grabado.

La holografía fuera de eje emplea un dispositivo divisor de haz para generar dos frentes de onda a partir de una sola fuente de luz, para después se superponer estos frentes de onda (uno de ellos modificado por un objeto) para originar un patrón de interferencia que es conocido como patrón holográfico. A estos dos haces luminosos se les conoce como: “haz objeto” y “haz de referencia”, y pueden ser representados respectivamente usando la forma matemática de los frentes de onda de la Ec. (2.3). Los dos haces son expresados como

$$O(x, y) = |o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \quad (2.4)$$

y

$$R(x, y) = |r(x, y)| \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (2.5)$$

donde O es el frente de onda del haz objeto, R al haz de referencia, $f_{px}x + f_{py}y = \text{sen}\theta/\lambda$ se refiere a la señal portadora con respecto al eje x e y (con θ como el ángulo de inclinación entre el haz objeto y el haz de referencia), y λ es la longitud de onda de la fuente de luz monocromática coherente utilizada para el grabado de hologramas. Un ejemplo del ángulo de inclinación θ entre el haz objeto y el haz de referencia puede ser visto en la Fig. 2.4.

La intensidad luminosa resultante de la interferencia de los dos haces en un material fotosensible es descrita como

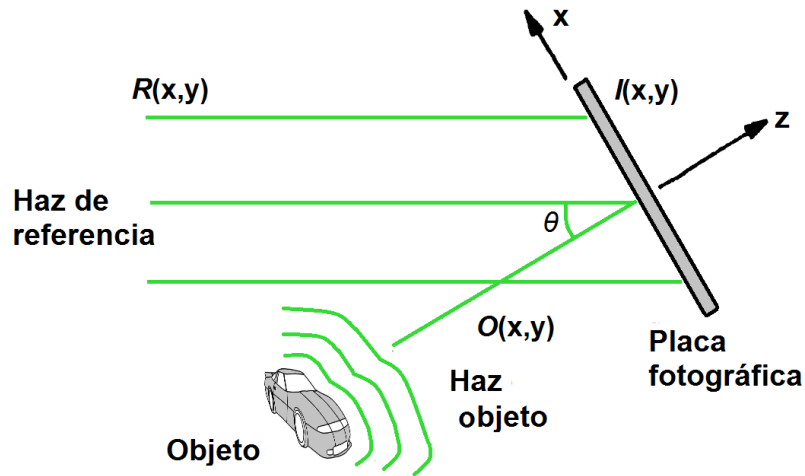


Figura 2.4 Configuración holográfica fuera de eje.

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |R(x, y) + O(x, y)|^2 \\
 &= [R(x, y) + O(x, y)][R(x, y) + O(x, y)]^* \\
 &= |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 \\
 &\quad + |r(x, y)||o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \exp[i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)] \\
 &\quad + |r(x, y)||o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)] \\
 &= |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 + 2|r(x, y)||o(x, y)| \cos[\phi(x, y) + 2\pi(f_{px}x + f_{py}y)].
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

La etapa de grabado de la holografía fuera de eje, que se muestra en la Fig. 2.5, es en la que se genera un holograma con una función de transmitancia descrita como

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y), \tag{2.7}$$

donde β es un parámetro determinado por el tipo de material de la placa fotográfica, τ es el factor de la cantidad del tiempo de exposición y h_0 trata de la irradiancia transmitida por el materia fotosensible al no estar expuesto por alguna luz incidente.

La amplitud luminosa en todo el holograma es descrita como

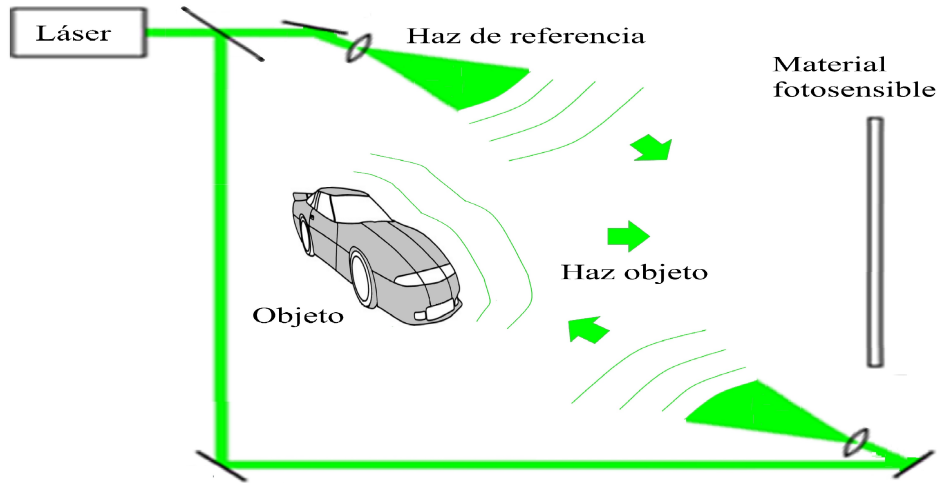


Figura 2.5 Etapa de grabado en un esquema holográfico fuera de eje.

$$\begin{aligned}
 h(x, y) = & h_0 + \beta\tau\{|r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 \\
 & + |r(x, y)||o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \exp[i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)] \\
 & + |r(x, y)||o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)]\}.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Una vez realizado un proceso químico de revelado en la película fotográfica, se proseguirá con la reconstrucción de la imagen del objeto en el laboratorio, con lo que se continúa con la siguiente etapa de la técnica holográfica.

2.2.2 Etapa de reconstrucción.

Para reconstruir el haz objeto codificado en el holograma, se hace incidir el haz de referencia R (o un haz con las mismas características ópticas) sobre la película fotográfica con el patrón de interferencia [Ec. (2.8)]. La representación matemática del frente de onda reconstruido U_R en la etapa de reconstrucción (ver Fig. 2.6) es descrito como

$$\begin{aligned}
U_R(x, y) &= R(x, y)h(x, y) \\
&= [h_0 + \beta\tau|r(x, y)|^2]|r(x, y)| \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)] \\
&\quad + \beta\tau|o(x, y)|^2|r(x, y)| \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)] \\
&\quad + \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \\
&\quad + \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \exp[-i4\pi(f_{px}x + f_{py}y)].
\end{aligned} \tag{2.9}$$

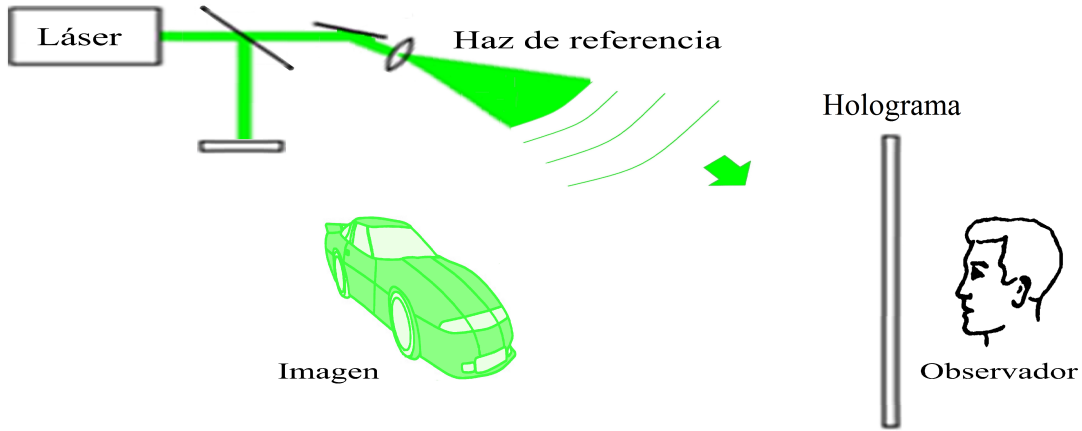


Figura 2.6 Etapa de reconstrucción en un esquema holográfico fuera de eje.

Reescribiendo cada término de la Ec. (2.9) reconstruido y particionado en sus individuales contribuciones u_1, u_2, u_3, u_4 de U_R , es dado como

$$U_R(x, y) = u_1(x, y) + u_2(x, y) + u_3(x, y) + u_4(x, y), \tag{2.10}$$

donde cada contribución estará conformada por

$$u_1(x, y) = [h_0 + \beta\tau|r(x, y)|^2]|r(x, y)| \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \tag{2.11}$$

$$u_2(x, y) = \beta\tau|o(x, y)|^2|r(x, y)| \exp[-i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \tag{2.12}$$

$$u_3(x, y) = \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)], \quad (2.13)$$

$$u_4(x, y) = \beta\tau|r(x, y)|^2|o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \exp[-i4\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (2.14)$$

donde la contribución u_1 es el haz de referencia atenuado o transmitido a través del holograma (es una contribución de baja frecuencia), u_2 es una aureola de luz generada por la incidencia del haz de referencia en el holograma, por lo que u_1 y u_2 son ondas de luz sin difractar y que pasan a través del holograma; generando lo que conocemos como el orden cero en la reconstrucción holográfica. u_3 es una onda igual a la onda objeto, excepto que está multiplicada por un factor constante en su amplitud (dependiendo de las características del láser); lo que produce la imagen virtual del objeto. u_4 da lugar a una imagen real (imagen conjugada); en este caso incluye un factor $\exp[-i4\pi(f_{px}x + f_{py}y)]$, lo que indica que la onda es transmitida con un ángulo aproximadamente del doble que en el haz de referencia. La ubicación de las contribuciones anteriormente descritas del frente de onda reconstruido [Ec. (2.10)] se muestra en la Fig. 2.7.

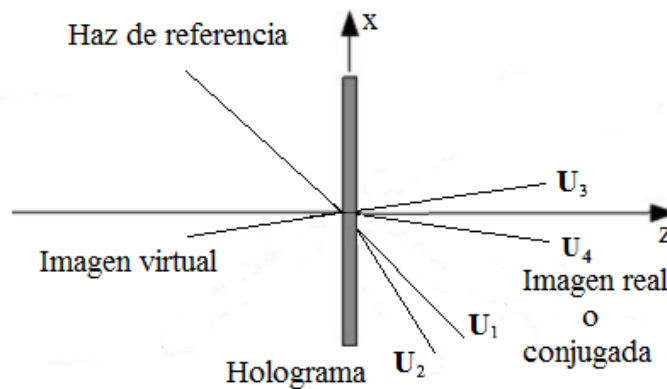


Figura 2.7 Ubicación de las contribuciones del frente de onda reconstruido con respecto al holograma.

Con lo presentado en esta parte del capítulo se comprobó matemáticamente como la holografía nos ayuda a reconstruir la imagen virtual en amplitud y fase de un haz objeto registrado en un material fotosensible.

2.3 Interferometría Holográfica (IH).

La IH compara interferométricamente dos frentes de ondas que fueron grabados y reconstruidos usando los principios de la técnica holográfica (consultar Sección 2.2). Existen dos tipos de IH que son: la de doble exposición y la de tiempo real. En la IH de doble exposición, se reconstruye una imagen virtual que contiene las diferencias de fase entre dos frentes de onda objeto registrados en una misma película fotosensible. Comúnmente, el primer holograma es creado con un frente de onda proveniente de un objeto en un estado inicial (en condiciones iniciales sin ningún cambio físico), mientras que el segundo holograma es registrado del frente de onda cuando el objeto sufrió algún cambio físico. Cuando se ilumina el holograma con los dos frentes de onda, se genera una imagen virtual con las diferencias de fase entre los dos frentes de onda de los objetos. El patrón de interferencia (con las diferencias de fase) visto en la imagen virtual, revela los cambios físicos del objeto en forma de franjas de interferencia, por lo que podemos estudiar las variaciones físicas del objeto con precisión interferométrica. En el esquema de la IH de tiempo real, solo se usa un solo holograma, este es de un objeto en su estado inicial. La reconstrucción del frente de onda registrado se hace incidir sobre el mismo objeto físico, por lo que, se hacen interferir la imagen virtual reconstruida con el objeto (posiblemente en un estado diferente o modificado). En ambos casos, la IH radica en comparar y medir las diferencias de fase de dos o más estados de un objeto en diferentes lapsos de tiempo. La medición de una deformación en un objeto puede realizarse a partir de la creación de franjas interferométricas, de la distancia de las franjas, de su correspondiente corrimiento o en la densidad de estas sobre la imagen del objeto.

2.3.1 IH de doble exposición.

El tipo de IH que se implementó en este trabajo de tesis fue el de doble exposición; el proceso y las formulaciones matemáticas de este tipo de técnica son explicados en este apartado.

2.3.1.1 Etapa de grabado de la IH de doble exposición.

Un primer frente de onda proveniente de un objeto en su estado inicial es dado como

$$O_1(x, y) = |o_1(x, y)| \exp[i\phi_1(x, y)]. \quad (2.15)$$

Mientras que la intensidad en el holograma corresponde a

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= |R(x, y) + O_1(x, y)|^2 \\ &= |r(x, y)|^2 + |o_1(x, y)|^2 + 2|r(x, y)||o_1(x, y)| \cos[\phi_1(x, y) + 2\pi(f_{px}x + f_{py}y)]. \end{aligned} \quad (2.16)$$

La etapa de grabado del primer frente de onda se puede apreciar en la Fig. 2.8.

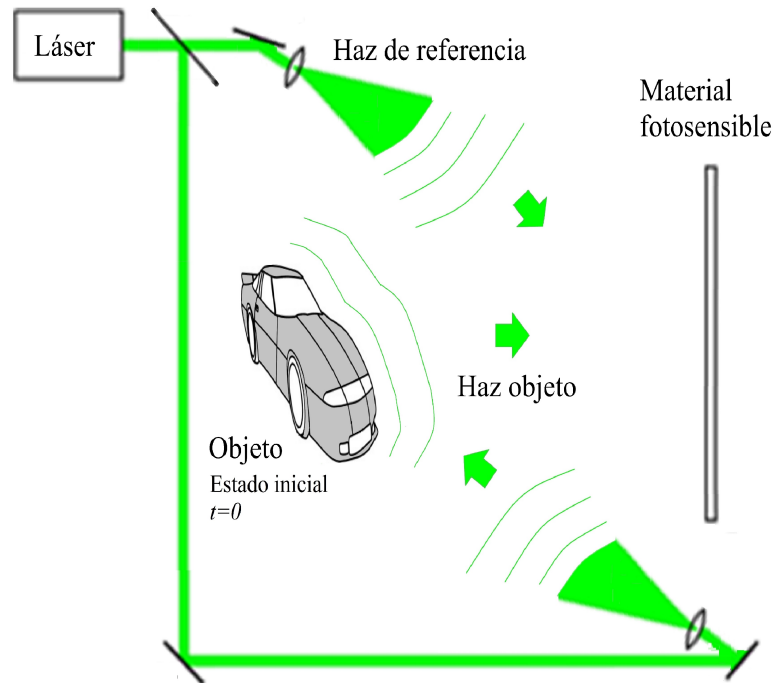


Figura 2.8 Etapa de grabado del objeto en su estado inicial ($t = 0$).

El segundo frente de onda proveniente del objeto modificado, matemáticamente es expresado como

$$O_2(x, y) = |o_2(x, y)| \exp\{i[\phi_2(x, y)]\}, \quad (2.17)$$

que puede también expresarse como

$$O_2(x, y) = |o_2(x, y)| \exp\{i[\phi_1(x, y) + \Delta\phi_{2-1}(x, y)]\}, \quad (2.18)$$

donde $\phi_2 = \phi_1 + \Delta\phi_{2-1}$, con el término $\Delta\phi_{2-1}$ que es una diferencia de fase entre las Ecs. (2.15) y (2.17) de los dos frentes de onda.

La intensidad luminosa en el material fotosensible creado a partir de O_2 es representada como

$$\begin{aligned} I_2(x, y) &= |R(x, y) + O_2(x, y)|^2 \\ &= |r(x, y)|^2 + |o_2(x, y)|^2 \\ &\quad + 2|r(x, y)||o_2(x, y)| \cos[\phi_1(x, y) + \Delta\phi_{2-1}(x, y) + 2\pi(f_{px}x, f_{py}y)]. \end{aligned} \quad (2.19)$$

La Fig. 2.9 muestra la etapa de grabado del segundo frente de onda proveniente del objeto modificado, diferente al estado inicial del objeto.

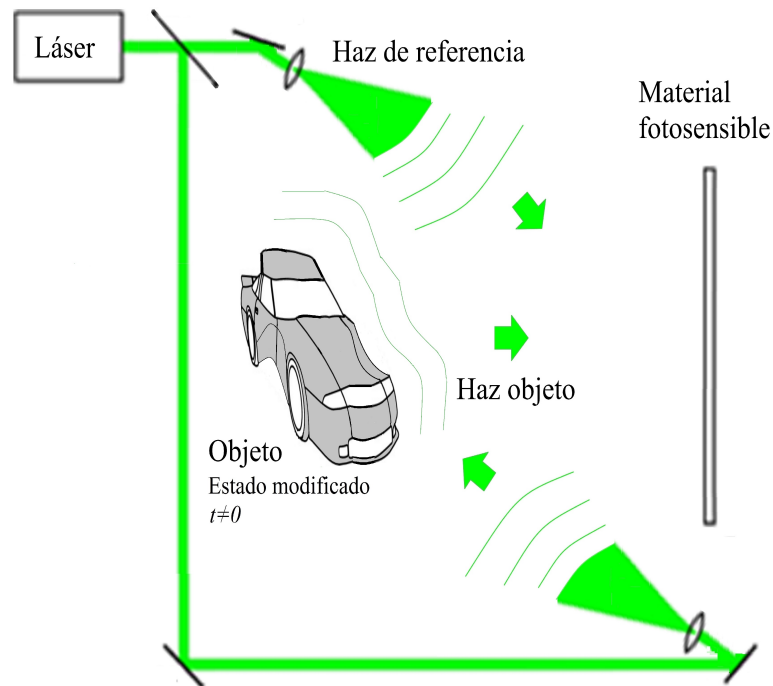


Figura 2.9 Etapa de grabado del objeto en su estado modificado ($t \neq 0$).

El total de irradiancia o intensidad total generada por los dos frentes de onda O_1 y O_2 en la placa fotográfica, y si poseen la misma amplitud ($o_2 = o_1$); se pueden reducir la expresión de los términos o_1 y o_2 a solo o , y tenemos

$$\begin{aligned}
 I_{1+2}(x, y) &= |O_1(x, y) + O_2(x, y)|^2 \\
 &= (|o_1(x, y)| \exp[i\phi_1(x, y)] + |o_2(x, y)| \exp\{i[\phi_1(x, y) + \Delta\phi_{2-1}(x, y)]\}) \\
 &\quad (|o_1(x, y)| \exp[-i\phi_1(x, y)] + |o_2(x, y)| \exp\{-i[\phi_1(x, y) + \Delta\phi_{2-1}(x, y)]\}) \\
 &= |o_1(x, y)|^2 + |o_2(x, y)|^2 + 2|o_1(x, y)||o_2(x, y)| \cos[\Delta\phi_{2-1}(x, y)] \\
 &= 2|o(x, y)|^2 \{1 + \cos[\Delta\phi_{2-1}(x, y)]\},
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

donde $\Delta\phi_{2-1}$, es la diferencia de fase o la interferencia de fase.

El registro del interferograma en una placa fotográfica es representada como

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau[I_{1+2}(x, y)]. \tag{2.21}$$

2.3.1.2 Etapa de reconstrucción con la IH de doble exposición.

Para la reconstrucción de un holograma de doble exposición se sigue el proceso explicado en la Sección 2.2.2 para reconstruir el frente de onda que contiene la imagen con $\Delta\phi_{2-1}$ de los dos objetos. Se obtiene una expresión similar a la Ec. (2.13), que contienen el cambio de fase entre los dos objetos O_1 y O_2 , que es la imagen real que contiene la diferencia de fase $\Delta\phi_{2-1}$ (franjas de interferencia).

La Fig. 2.10 muestra la imagen del objeto visualizada por un observador en la etapa de reconstrucción en la IHD de doble exposición.

En la Fig. 2.11 se muestra la reconstrucción de una imagen de un objeto de fase original y de su modificado.

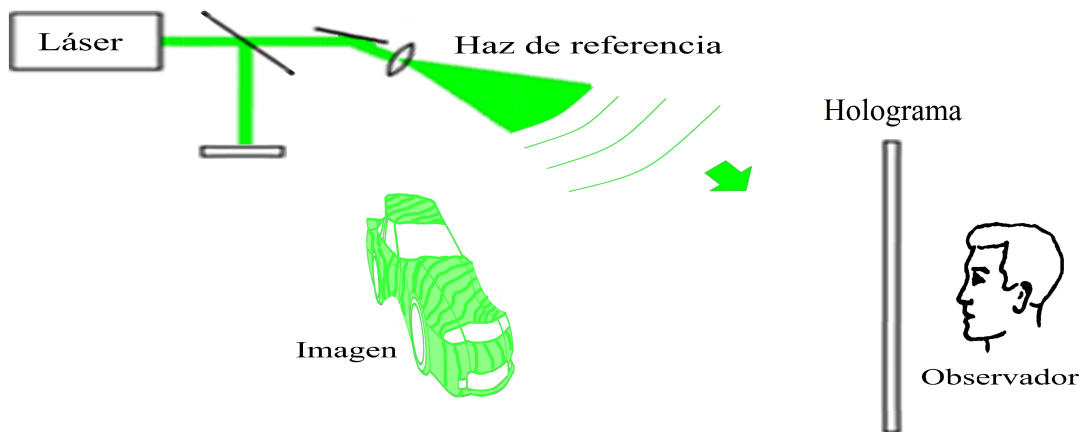


Figura 2.10 Etapa de reconstrucción con la IH de doble exposición.

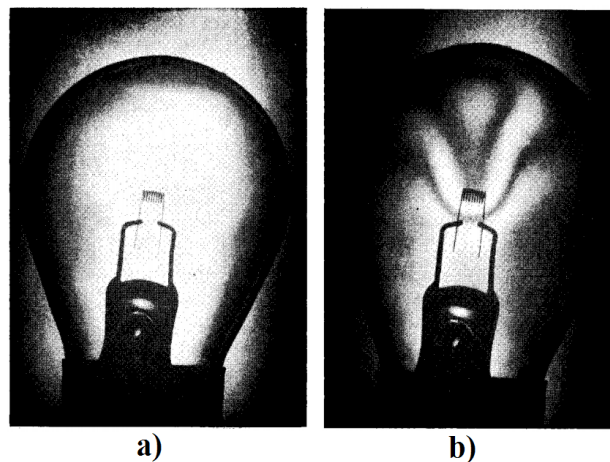


Figura 2.11 Reconstrucción obtenida con la IH. a) Imagen reconstruida del objeto en un estado inicial, b) Imagen reconstruida con el término de diferencia de fase [65].

2.4 Holografía Digital (HD).

Gracias a los nuevos descubrimientos tecnológicos, es que se han ido reinventando las diferentes técnicas holográficas, y llegan a alcanzarse características que no pueden ser logradas con los métodos holográficos convencionales (holografía analógica). Digitalizar un proceso o convertir una señal analógica a digital, abre la posibilidad de implementar un sin fin de métodos de procesamiento y transformaciones digitales de señales, que están enfocadas en la optimización, selección de datos y de cambios de dominios de datos (dominio espacial al

frecuencial y viceversa). En el campo de la holografía, la implementación de dispositivos electrónicos ha ocasionado un sin fin de posibilidades e inclusive ha dado paso a nuevas técnicas holográficas con un potencial que aumentará en base a otros nuevos descubrimientos tecnológicos.

Registro de hologramas digitales.

La HD tiene como característica de que la etapa de registro se realiza en laboratorio, y no se utilizan las placas convencionales (material fotosensible) para el registro del patrón de interferencia (forma análogica), sino que se utilizan dispositivos electrónicos (sensores de imagen), donde se registra digitalmente el patrón de interferencia y se almacena en una computadora. Mientras que la etapa de reconstrucción es realizada utilizando métodos y formulaciones matemáticas.

El frente de onda registrado digitalmente, es reconstruido numéricamente como un campo óptico que se propaga por el espacio libre. Usando principios básicos de procesamiento de señales, el holograma se puede trabajar en el dominio de frecuencias usando la TF y después regresando al dominio espacial. Estando en el dominio de frecuencias se abre la puerta a un gran número de posibilidades de procesamiento de datos y métodos de evaluación de fase en hologramas desde el plano-holograma [41, 42]. En años recientes, la implementación de dispositivos electrónicos ha ido en aumento debido a las funcionalidades y ventajas (como el de registrar hologramas en estas las veces que se desee) que estos otorgan.

En el caso de que el haz propagado por el objeto tenga mayores o menores dimensiones (tamaño) que el CCD, suele ser necesario utilizar un lente entre el objeto y el plano de registro. Este lente será el encargado de colimar el frente de onda, es decir recolectar luz y ampliar o disminuir un frente de onda para su registro por el dispositivo electrónico. Dicho lente, no modifica la fase del frente de onda del haz objeto, sin embargo, los frentes de onda registrados serán del tamaño adecuado para ser digitalizados correctamente. Para observar la posición del lente implementado para la reducción de frente de onda objeto se puede ver en la Fig. 2.12.

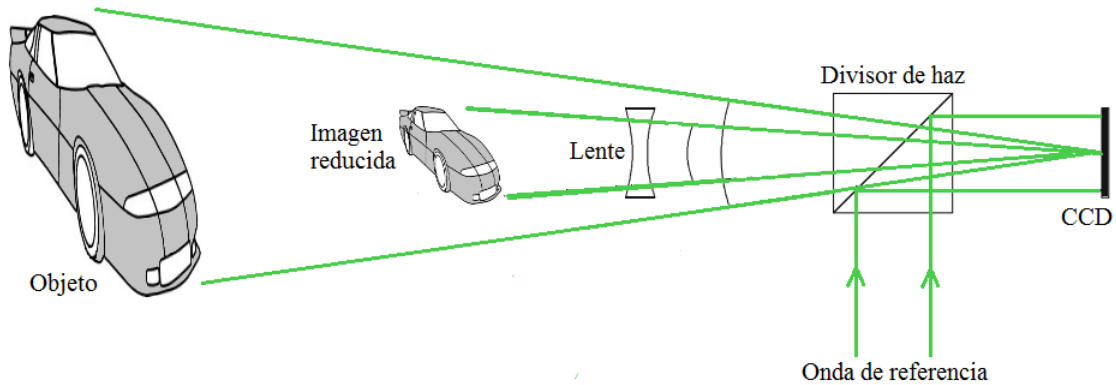


Figura 2.12 Registro de hologramas de objetos grandes.

Reconstrucción de hologramas digitales.

La reconstrucción de hologramas digitales, comúnmente es realizada con el uso de las formulaciones matemáticas de difracción; que son capaces de reconstruir un campo óptico a cualquier distancia detrás del plano-holograma.

La intensidad total del un campo óptico registrado aplicando alguna teoría de difracción es representa como

$$I(x, y) = |U_r(x', y')|^2, \quad (2.22)$$

donde U_r es el campo reconstruido numéricamente con las aproximaciones de difracción, x' y y' son las coordenadas cartesianas reconstruidas del plano calculado en x y y , respectivamente.

La fase de U_r es calculada de la forma

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{Re}[U_r(x', y')]}{\text{Im}[U_r(x', y')]}, \quad (2.23)$$

donde $\text{Re}[\]$ denota la parte real y $\text{Im}[\]$ la parte imaginaria de U_r .

2.4.1 La Transformada de Fourier (TF) en un holograma fuera de eje.

La TF es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio espacial (temporal) y el dominio frecuencial o de frecuencias [125].

La TF en dos dimensiones de una señal f es expresada como

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y) \exp[2\pi(f_x x + f_y y)], \quad (2.24)$$

donde f_x y f_y son las contribuciones de las frecuencias en el dominio espacial de x e y , respectivamente.

La TF de una función real es una función compleja. Es decir, $F(f_x, f_y) = \text{Re}(f_x, f_y) + \text{Im}(f_x, f_y)i$, que tiene su parte real y parte imaginaria de $F(f_x, f_y)$.

Una de las propiedades de la TF que se utilizan en este trabajo es la propiedad de simetría. Si realizamos la TF de una función real positiva en relación de la intensidad; obtenemos la TF con una distribución hermitiana, que es un valor simétrico con respecto al centro [51], es decir

$$F(f_x, f_y) = F(-f_x, -f_y),$$

que es lo mismo a tener el valor conjugado de la función real.

Aplicando la TF a la Ec. (2.21) (holograma fuera de eje), se obtiene una imagen en el espacio de Fourier donde se aprecia la simetría de la TF [126]. La Fig. 2.13 muestra la imagen del espectro en frecuencias, el orden cero, las imágenes real y virtual de un holograma de fuera de eje.

2.4.2 Comparación entre las teorías de difracción y la TF para la evaluación de fase.

En la IH, el frente de onda reconstruido de un holograma puede ser calculado numéricamente con las teorías de difracción (Fresnel, Fraunhofer y Rayleigh-Sommerfeld). La formulación de Fresnel, carga con una gran complejidad de cálculos matemáticos, y el tiempo de desarrollo de esta teoría de difracción en una computadora es grande, y requiere de una gran demanda de recursos de procesamiento, lo que retrasa la obtención de resultados. Una alternativa con menor consumo de recursos de máquina y de un tiempo de procesamiento menor en comparación a las teorías típicas de difracción, es el uso de la Transformada rápida de Fourier

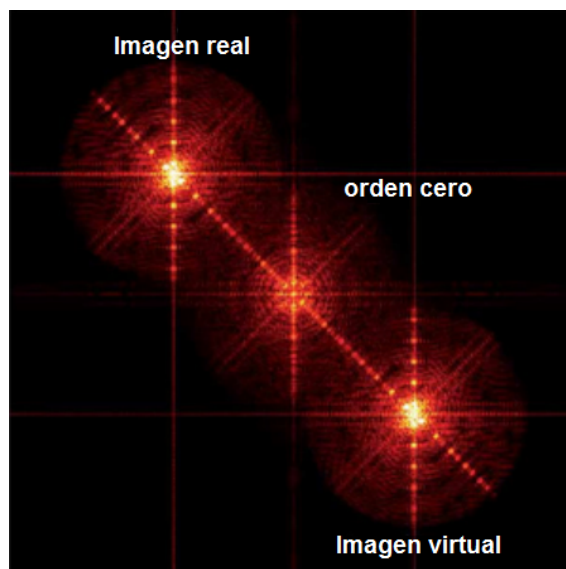


Figura 2.13 Espectro en frecuencia de un holograma fuera de eje, con una señal portadora entre el orden cero y la imagen real y/o virtual [121].

(por sus siglas en inglés de Fast Fourier Transform FFT) para evaluar la fase de un frente de onda (conocido como el método de la TF) [49, 111].

Otra de las ventajas del uso del método de la TF; además del reducido proceso matemático, es que la TF presenta la propiedad de separabilidad [49, 51], gracias a esta podemos seleccionar cierta información en el dominio de frecuencias y trabajar con esta en el dominio espacial. Por lo que, al aplicar la TF en hologramas, podemos separar las bajas frecuencias y otras frecuencias indeseadas que generan ruido y aberraciones en la imagen reconstruida en el dominio espacial. Dicho de otra manera, la diferencia entre la reconstrucción de Fresnel y la lograda con la TF, es que en este último, la información está localizada; esto significa que está ubicada dentro cierta área en la imagen del plano holograma. Al tener las frecuencias localizadas es que podemos trabajar con filtros digitales en el espacio de frecuencias y conseguir la información requerida con una buena calidad [51].

Técnicas avanzadas en IHD aplican la TF en el plano-imagen y una apertura o diafragma para la obtención de la imagen del objeto, y que principalmente influye en 4 criterios básicos de procesamiento: 1) En el tipo de filtrado y 2) procesamiento numérico, 3) en la resolución

espacial de objeto (control) y 4) en el ruido de decorrelación. Esquemas holográficos que implementan una apertura, están caracterizados por el agregado de una frecuencia portadora en cualquiera de los dos haces, lo cuál no afectará el proceso de la IHD, solo permitirá la localización de la información requerida. Además, aquí se añade un lente para formar la imagen sobre el área necesaria por el sensor imagen. Esta lente se asociará con la apertura, y limitará el haz objeto (la imagen) que pasa a través del sistema óptico; con el fin de posicionar y modular las frecuencias de la imagen. Aunque en para fines muy estrictos, los hologramas de Fresnel y los obtenidos gracias a una apertura no son muy diferentes (los hologramas en el plano-imagen), de hecho. La configuración de un sistema óptico con una apertura generará un holograma de Fresnel de una apertura en el sistema de imágenes, por lo que los resultados matemáticos obtenidos no son muy diferentes (desde el punto de vista de la imagen captada, que será la de la abertura y no la de todo el frente de onda sin modular); en los dos casos se tienen los tres órdenes de difracción de un holograma y estos no se traslapan.

El método de la TF nos permite suprimir fácilmente los valores indeseados de baja frecuencia (ruido de iluminación de fondo) en la reconstrucción del frente de onda, además que logramos un mayor número de altas frecuencias con las que se trabaja el plano de Fourier.

El procesamiento de los hologramas con el TF se caracteriza por una mejor relación entre el número de píxeles utilizados para el registro de la imagen de la apertura. Además al tener un mayor tamaño la apertura logramos una mejor recolección de luz, y logramos separar las bajas frecuencias y las altas frecuencias, con lo que logramos incrementar la resolución espacial y filtrar frecuencias indeseadas [51, 111]. Dado el hecho, de que se aplica la TF de una función real positiva en función de intensidad; se obtiene la imagen de espectro Fourier con una distribución hermitiana; que es un valor simétrico con respecto al centro que es fácil filtrar [51]. Otra ventaja al utilizar el método de la TF para la evaluación del término de fase es que se logra un ligero incremento en el número de franjas en el mapa de la diferencia de fase, esto en comparación cuando se usa una de las teorías de reconstrucción para obtener el término de fase [111]. Una comparación en el número de franjas de interferencia obtenida con los dos métodos se muestra en la Fig. 2.14.

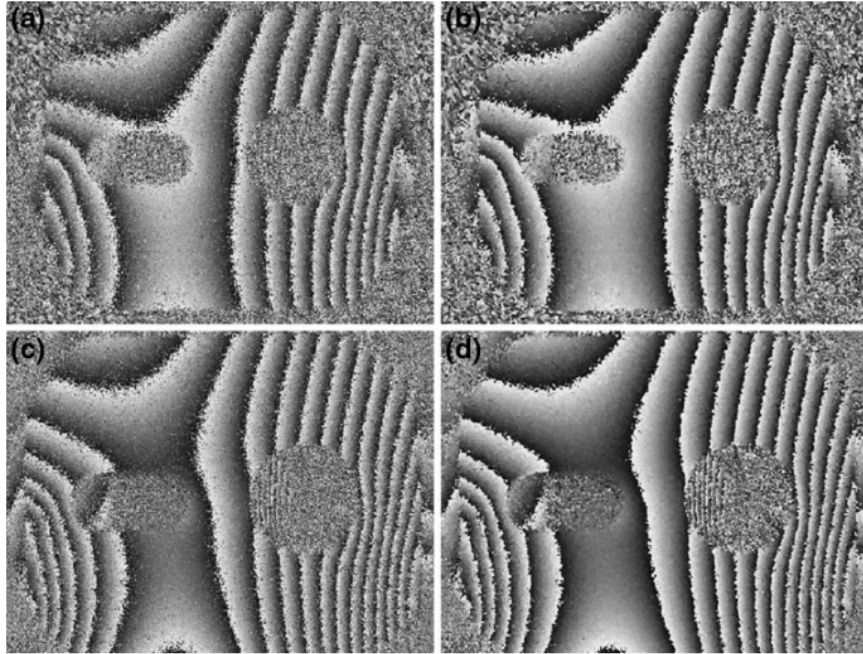


Figura 2.14 Diferencias de fase. (a) Reconstrucción con la teoría de Fresnel sin filtrar, (b) Fresnel con filtro, (c) Reconstrucción con el método de la TF sin filtrar, (d) TF con filtro [107].

2.5 Evaluación de la fase usando el método de la TF.

Para evaluar el término de fase ϕ en un holograma fuera de eje utilizando el método de la TF, por ejemplo, se utiliza la Ec. (2.6), que también puede ser escrita de la forma

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (2.25)$$

donde a representan las variaciones de irradiancia indeseadas (contribuciones de baja frecuencia) e iluminación de fondo y b se refiere a la iluminación proveniente del objeto.

El patrón de interferencia es escrito (por conveniencia) como

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[2\pi(f_{px}x + f_{py}y)] + c^*(x, y) \exp[-2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (2.26)$$

donde

$$c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y) \exp[i\phi(x, y)]. \quad (2.27)$$

El siguiente paso es aplicar la FFT bidimensional a la Ec. (2.26) y obtener dichas contribuciones de a y c descritas en el espacio de frecuencias. Obteniéndose un término en el plano de Fourier como

$$I(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_{px}, f_y - f_{py}) + C^*(f_x - f_{px}, f_y - f_{py}), \quad (2.28)$$

donde las letras A , C y C^* representan las contribuciones del holograma en el espectro de Fourier.

La evaluación de fase puede ser implementada utilizando un solo término C del espectro de Fourier, por lo que se hará un filtrado pasa-banda. Después, al resultado del filtro se le aplica la Transformada Inversa de Fourier [en inglés, Inverse Fourier Transform (IFT)] para obtener c . Al final se obtiene la fase ϕ y una portadora en ella, descrita como

$$\phi(x, y) + 2\pi(f_{px}x + f_{py}y) = \arctan \frac{\text{Re}[c(x, y)]}{\text{Im}[c(x, y)]}. \quad (2.29)$$

Capítulo 3

Método propuesto basado en la IHD y aplicado a líquidos.

La IHD también usa la holografía para comparar frentes de onda provenientes de objetos de fase. La diferencia de fase obtenida con la IHD es asociada a una diferencia en las propiedades físicas de una muestra líquida, en dos tiempos diferentes de registro. En el estudio de líquidos, los cambios de fase principalmente son asociados con la evolución o un cambio de la temperatura y/o de la concentración vía una variación del IR de una o varias sustancias en diferentes estados o lapsos de tiempo.

3.1 Objetos de fase.

Un objeto de fase puede ser creado usando un contenedor transparente con uno o varios fluidos en su interior [78]. Cambios en las propiedades físicas (temperatura y/o concentración) en una determinada sustancia líquida, provoca lo que se conoce como una variación en la LCO [127, 128]. Imaginemos un frente de onda [como el expresado en la Ec. 2.3] que se propaga por el espacio libre, y que al ser dispersado por un objeto traslucido, el término de fase ϕ del frente de onda será modificado en su LCO de acuerdo con la morfología del objeto, que a su vez depende del IR n y del espesor o de la longitud geométrica L del objeto y por él cuál viaja la luz. Un frente de onda dispersado por un objeto de fase tiene la forma

$$U(x, y) = |u(x, y)| \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} LCO(x, y) \right], \quad (3.1)$$

o bien

$$U(x, y) = |u(x, y)| \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} n(x, y) L(x, y) \right], \quad (3.2)$$

donde $LCO = n \times L$, L se refiere a la longitud geométrica del objeto y n , como se dijo, al IR.

Con el fin de medir variaciones de fase entre dos sustancias S_1 y S_2 usando la IHD de doble exposición (ver Sección 2.3.1) debemos de registrar dos hologramas H_{S_1} y H_{S_2} , respectivamente, de cada una de las sustancias. Los hologramas registrados pueden proceder de la evolución de una sola sustancia o de comparar dos sustancias.

La descripción del objeto de fase constituido por S_1 (ver Fig. 3.1), genera un frente de onda de la forma

$$U_{S_1}(x, y) = |u_{s_1}(x, y)| \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} n_{S_1}(x, y) L_{S_1}(x, y) \right], \quad (3.3)$$

donde U_{S_1} se refiere al frente de onda dispersado por la primera sustancia, n_{S_1} y L_{S_1} son el IR y la longitud geométrica (dimensiones) de la sustancia uno, respectivamente.

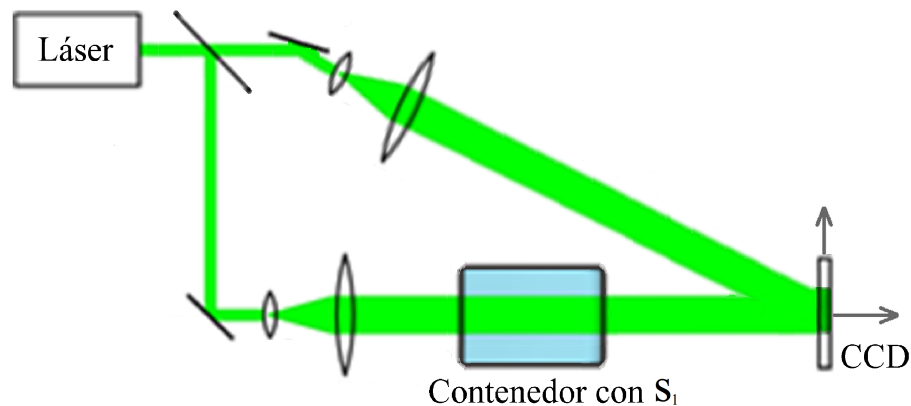


Figura 3.1 Sistema óptico para el registro de un holograma generado a partir de una sustancia líquida S_1 .

El segundo holograma H_{S_2} es el registro de un objeto de fase que sufrió un cambio en sus propiedades físicas, esto con respecto al primer objeto de fase, por lo que se tiene un segundo frente de onda (ver Fig. 3.2) dispersado y descrito como

$$U_{S_2}(x, y) = |u_{s_2}(x, y)| \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} n_{S_2}(x, y) L_{S_2}(x, y) \right], \quad (3.4)$$

donde U_{S_2} se refiere al frente de onda dispersado por la segunda sustancia, n_{S_2} y L_{S_2} son el IR y la longitud geométrica (dimensiones) de la sustancia dos, respectivamente.

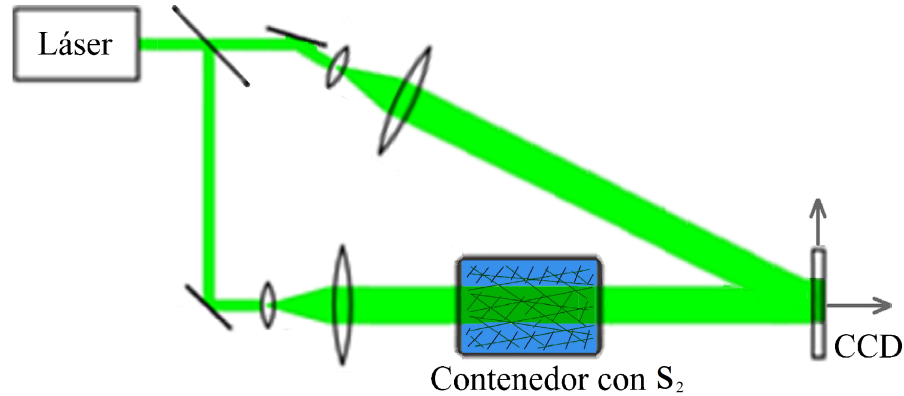


Figura 3.2 Sistema óptico para el registro de un holograma generado a partir de una sustancia líquida S_2 .

La diferencia de fase entre los frentes de onda reconstruidos de los hologramas H_{S_1} y H_{S_2} , respectivamente, puede expresarse como

$$\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n_{S_2-S_1}(x, y)] [\Delta L_{S_2-S_1}(x, y)], \quad (3.5)$$

donde $\Delta n_{S_2-S_1} = n_{S_2} - n_{S_1}$ y $\Delta L = L_{S_2} - L_{S_1}$ indican una diferencia del IR de la sustancia, y de la diferencia de la longitud del objeto de fase, respectivamente. Si alguna de las cantidades $\Delta n_{S_2-S_1}$ o $\Delta L_{S_2-S_1}$ es conocida en la Ec. (3.5), la otra puede ser conocida utilizando los valores conocidos.

3.2 La apertura rectangular en la IHD.

El uso de una apertura en el sistema holográfico de doble eje es una práctica común en el estudio de vibraciones de alta frecuencia en objetos sólidos. Aunque en líquidos no se ha

reportado investigación alguna. La ubicación de la apertura será la misma en el estudio de los objetos sólidos que en el estudio de sustancias líquidas; esta se puede apreciar en la Fig. 3.3. Una ventaja de la IHD al utilizar una apertura, es que el frente de onda proveniente del objeto puede ser controlado en su incidencia sobre el área del sensor deseada. Pero sin duda, una de la principal ventaja de la aplicación de una apertura en el sistema óptico será la modulación de las frecuencias correspondientes a la imagen virtual y a la separación de las frecuencias indeseadas en el espectro de Fourier.

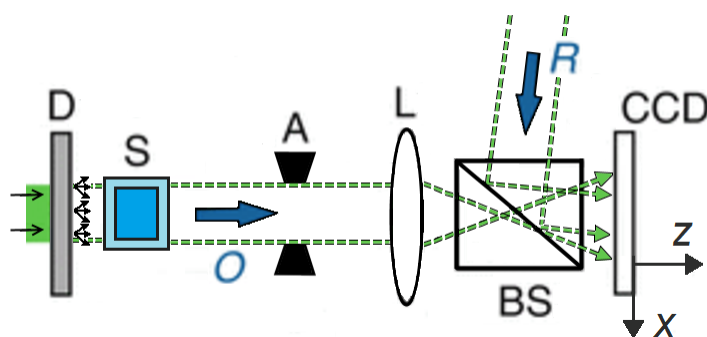


Figura 3.3 Diagrama de ubicación y operación de la apertura. D: difusor; S: muestra líquida; A: apertura rectangular; L: lente positivo de 75 mm; BS: (50/50) divisor de haz cúbico; CCD: Charge-Coupled Device; R: haz objeto; O: haz de referencia.

3.2.1 Proceso para la evaluación de fase.

En la Sección 2.5 se explicó el método de la TF para la evaluación de la fase de un frente de onda. En la actual sección se muestra el proceso experimental realizado para la evaluación del término de fase de un holograma.

En la Fig. 3.4 se muestra un holograma obtenido con el sistema óptico mostrado en la Fig. 3.3.

Una vez registrado el holograma, se procede a aplicarle la TF. En la imagen del plano holograma podemos visualizar toda las contribuciones de frecuencias que conforman al holograma. La TF de un holograma de doble eje se muestra en la Fig. 3.5.

Una vez visualizada la imagen del plano holograma, se procede a realizar un filtrado pasa banda para seleccionar la contribución del patrón de interferencia que contiene la información



Figura 3.4 Holograma registrado a partir de la IHD con una apertura.

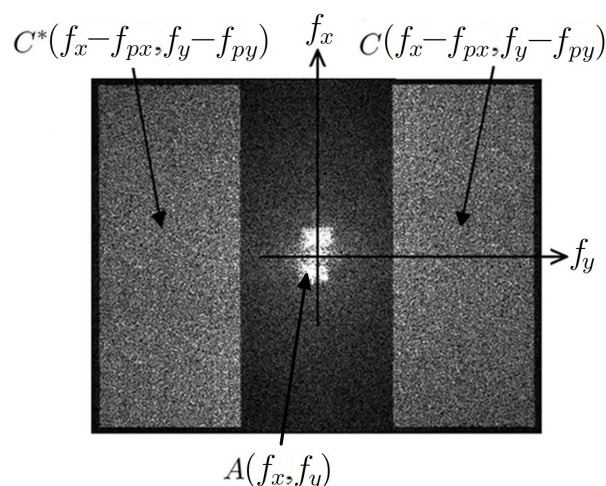


Figura 3.5 Imagen del plano-holograma.

de fase del objeto de interés, se recuperan las contribuciones pertenecientes a la imagen virtual; como se muestra en la Fig. 3.6.

Después se realiza la IFT a la imagen del plano-holograma filtrado (ver Fig. 3.6), se aplica la Ec. (2.29) para obtener el término de fase de la solución líquida ϕ_S dentro del tubo de vidrio, aunque con un valor de portadora, que se suprime matemáticamente cuando se realiza la diferencia de fase.

3.3 Cálculo del IR de líquidos en estado estático.

Las propiedades físicas que son posible asociar a una variación de IR o Δn_s son la densidad, peso, color, capilaridad entre otras. Un Δn_s puede señalar que las propiedades físicas no

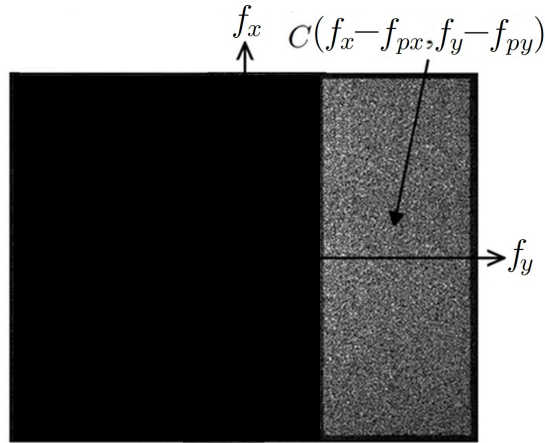


Figura 3.6 Imagen del plano-holograma filtrado.

se encuentran dentro de un rango establecido para su comercialización o contienen alguna modificación, adulteración o simplemente sus propiedades físicas no son equitativas.

3.3.1 Diferencia de fase generada por un contenedor cilíndrico.

Como ya se había mencionado, la fase de frentes de onda propagados a través de un objeto de fase, adopta las características morfológicas del objeto. La diferencia de fase entre dos frentes de onda propagados a través de un cilindro (tubo de vidrio) con una sustancia (a analizar), toma la forma de la diferencia de la LCO de los frentes de onda.

La fase generada por el contenedor cilíndrico lleno de la solución acuosa consistió en una fase determinada, que puede asociarse con un espacio geométrico descrito con una hipérbola. Esta geometría en el LCO dependerá de las propiedades físicas del líquido en su interior, del tipo del material y el ancho de las paredes que lo constituyen. En la Fig. 3.7 se muestran las características y propiedades de un contenedor cilíndrico, y que afecta al la LCO.

La fase de un frente de onda propagado por un contenedor con la solución S_1 se puede deducir como

$$\phi_{S_1}(x, y) = k[d_t(x, y) - d_i(x, y)]n_g(x, y) + d_i(x, y)n_{S_1}(x, y). \quad (3.6)$$

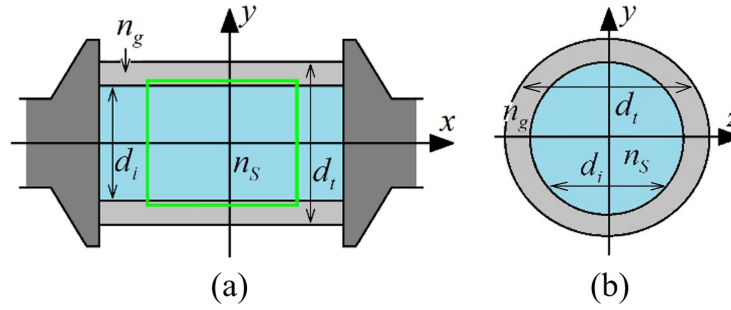


Figura 3.7 Contenedor de vidrio: (a) vista xy , en donde la región en verde es la región registrada por el dispositivo de registro de imagen. n_g y n_s son los IR del vidrio y de la mezcla líquida, respectivamente. d_i y d_t son las secciones transversales internas y externas del contenedor. (b) vista yz .

y para una segunda solución S_2 se tiene

$$\phi_{S_2}(x, y) = k[d_t(x, y) - d_i(x, y)]n_g(x, y) + d_i(x, y)n_{S_2}(x, y). \quad (3.7)$$

La diferencia de fase de los dos frentes de onda provenientes de S_1 y S_2 está en relación al cambio de los dos frentes de onda. La diferencia de fase de los frentes de onda de las soluciones S_1 y S_2 , en las que el contenedor de vidrio permanece constante en sus dimensiones (L) descritas en la Ec. (3.5) se puede expresar como

$$\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y) = kd_i(x, y)[\Delta n_{S_2-S_1}(x, y)], \quad (3.8)$$

o

$$\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y) = kd_i(x, y)[n_{S_2}(x, y) - n_{S_1}(x, y)]. \quad (3.9)$$

Como se puede observar en la Ec. (3.9), se tiene una expresión que no depende de las contribuciones de las paredes del vidrio; solo depende de las dimensiones internas d_i del contenedor.

3.3.2 Cálculo del IR en líquidos sin conocer d_i .

Una solución líquida dentro del tubo de vidrio crea un objeto de fase que depende del IR del líquido que está en su interior. Para calcular el IR de una solución desconocida (S_2); se

puede realizar si se conoce una de las dos soluciones a utilizar, consideremos la solución S_1 conocida. De la Ec. (3.9) se puede despejar el IR de la solución S_2 , quedando

$$n_{S_2}(x, y) = \frac{\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y)}{kd_i} + n_{S_1}(x, y). \quad (3.10)$$

Como se puede observar en la Ec. (3.10), está depende de la variable d_i .

Para calcular n_{S_2} sin que dependa de d_i se propone lo siguiente: Se suponen dos soluciones conocidas S_0 (sustancia de referencia) y S_1 , cuya diferencia de fase se llamada como $\Delta\phi_{ref}$ y es descrita como

$$\Delta\phi_{ref}(x, y) = kd_i(x, y)[n_{S_1}(x, y) - n_{S_0}(x, y)], \quad (3.11)$$

o

$$\Delta\phi_{ref}(x, y) = kd_i(x, y)[\Delta n_{S_1-0}(x, y)], \quad (3.12)$$

donde n_{S_1} y n_{S_0} son valores conocidos y $\Delta\phi_{ref}$ es el valor de la diferencia de fase de las sustancias antes mencionadas. Despejando d_i de la Ec. (3.12) se tiene

$$d_i(x, y) = \frac{\Delta\phi_{ref}(x, y)}{\Delta n_{ref}(x, y)} k^{-1}. \quad (3.13)$$

Sustituyendo la Ec. (3.13) en la Ec. (3.10) se tiene que

$$n_{S_2}(x, y) = \frac{\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y)\Delta n_{ref}(x, y)}{\Delta\phi_{ref}(x, y)} + n_{S_1}(x, y). \quad (3.14)$$

Como se puede observar en la Ec. (3.14), se tiene una expresión matemática con la que es posible conocer el IR de S_2 (n_{S_2}) de forma independiente de las dimensiones del contenedor cilíndrico.

Un aspecto a destacar del sistema óptico propuesto es que al utilizar un contenedor cilíndrico común, se puede suponer que la distancia interna del cilindro varía desde uno de sus extremos al otro. Con lo que se obtiene la máxima distancia en el centro del tubo y la mínima en los extremos del contenedor de vidrio. Con esto, las regiones que están más cercas de las paredes del tubo (las distancias más pequeñas) son las que detectan diferencias menores de

fase. Por el contrario, en el centro del contenedor cilíndrico se detectarán diferencias de fase mayores. Lo anterior se puede ver en la Fig. 3.8.

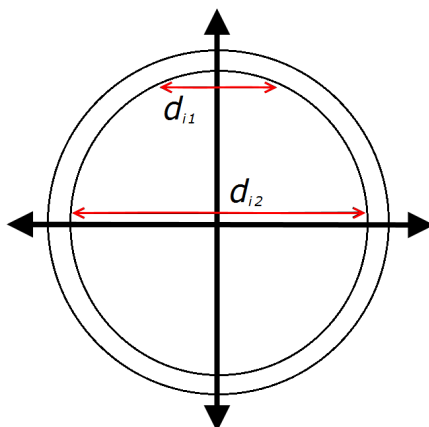


Figura 3.8 Distancias transversales del contenedor (tubo de vidrio cilíndrico) $d_{i1} < d_{i2}$.

Cuando un número muy alto de línea de rayos de luces atraviesa un tubo la de vidrio, se crea un espacio geométrico (perfil de onda) dependiendo de las características morfológicas de un objeto de fase. La Fig. 3.9 muestra la creación de un frente de onda con un perfil de onda de una hipérbola cuando un grupo de rayos de luz interactúa con un tubo de vidrio.

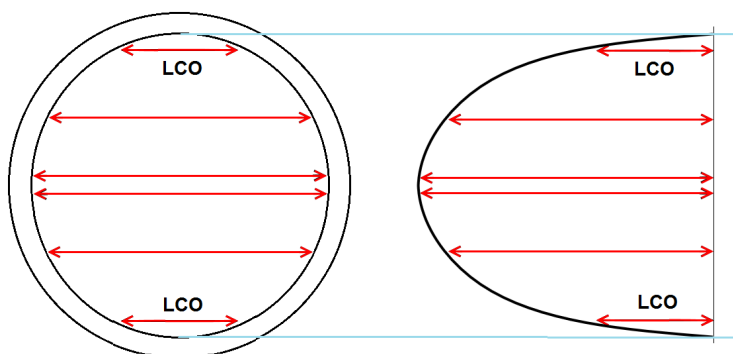


Figura 3.9 Perfil hiperbólico del LCO característico de un tubo de vidrio cilíndrico.

La expresión matemática utilizada para la elaboración dos semicírculo juntos o una hipérbola que dependiendo de un valor de radio constante es

$$y = 2\sqrt{r^2 - x^2}, \quad (3.15)$$

donde r es el radio del círculo, x e y se refieren al plano de coordenadas cartesianas.

La diferencia de fase de dos perfiles de onda descritos con una hipérbola en función de una diferencia del IR ($\Delta n_{S_2-S_1}$) es dado como

$$U_{2semicirculo} = \frac{2\pi}{\lambda} [(\Delta n_{S_2-S_1})(y)]. \quad (3.16)$$

3.3.3 Cálculo de variaciones de concentración en dos soluciones líquidas.

Hablar de variaciones del IR es un concepto no muy significativo para algunas persona que no están familiarizadas con conceptos básicos de óptica. Con el fin de buscar nuevas aplicaciones alternas a esta teoría y utilizando conceptos más comunes de otras áreas (química o en ingeniería), se estudia la relación de las variaciones del IR con las variaciones de concentración en muestras líquidas.

La diferencia del IR entre dos soluciones esta dada en función del cambio en la concentración (CON) y/o Temperatura (T) de las dos soluciones, expresándose como sigue

$$\Delta n_{S_2-S_1}(x, y) = \left[\frac{\partial n_s}{\partial CON} \right]_T [CON_{S_2}(x, y) - CON_{S_1}(x, y)] + \left[\frac{\partial n_s}{\partial T} \right]_{CON} [T_{S_2}(x, y) - T_{S_1}(x, y)], \quad (3.17)$$

donde $\left[\frac{\partial n_s}{\partial CON} \right]_T$ y $\left[\frac{\partial n_s}{\partial T} \right]_{CON}$ son los valores que muestran la dependencia de n con CON y T , respectivamente. CON_{S_2} y T_{S_2} son los valores de concentración y temperatura de la segunda solución líquida S_2 , y lo mismo para los valores CON_{S_1} y T_{S_1} en la sustancia S_1 .

La diferencia del IR con respecto a la concentración [Ec. (3.17)] depende de los valores de la concentración iniciales y finales y el valor de $\frac{\partial n_s}{\partial CON}$. Cuando la temperatura es constante durante el tiempo en que se registran los dos hologramas, entonces la diferencia de fase entre las dos sustancias se reduce a

$$\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y) = k\{d_i(x, y)\left[\frac{\partial n_s}{\partial CON}\right][CON_{S_2}(x, y) - CON_{S_1}(x, y)]\}. \quad (3.18)$$

Como se puede apreciar en la Ec. (3.18) la diferencia de fase tiene una dependencia de la longitud interna d_i del tubo de vidrio. Para eliminar dicha dependencia se usa la Ec. (3.13) con lo que se tiene

$$d_i(x, y) = \frac{\Delta\phi_{ref}(x, y)}{\left[\frac{\partial n_s}{\partial CON}\right][\Delta CON_{ref}(x, y)]}k^{-1}. \quad (3.19)$$

Para calcular la diferencia de concentración $\Delta CON_{S_2-S_1}$ se sustituye la en Ec. (3.19) en la Ec. (3.18), quedando la expresión de la diferencia de concentración entre dos soluciones

$$\Delta CON_{S_2-S_1}(x, y) = \frac{\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y)\Delta CON_{ref}(x, y)}{\Delta\phi_{ref}(x, y)}. \quad (3.20)$$

donde $\Delta CON_{S_2-S_1}$ es la diferencia de concentración entre las dos sustancias. Despejando ΔCON_{S_2} se tiene

$$CON_{S_2}(x, y) = \frac{\Delta\phi_{S_2-S_1}(x, y)\Delta CON_{ref}(x, y)}{\Delta\phi_{ref}(x, y)} + CON_{S_1}. \quad (3.21)$$

que es una expresión que puede calcular la concentración en S_2 .

El proceso empleado para la medición de diferencias de concentración entre dos sustancias, usando un sistema óptico con una apertura y el método de la TF, se puede observar en la Fig. 3.10.

3.4 Cálculo de variación del IR en sustancias líquidas en eventos dinámicos.

La evolución en el tiempo de las propiedades físicas de un líquido es de gran importancia para muchas áreas de la ciencias.

El procedimiento para medir variaciones del IR en eventos dinámicos, utilizando la IHD se muestra en la Fig 3.11.

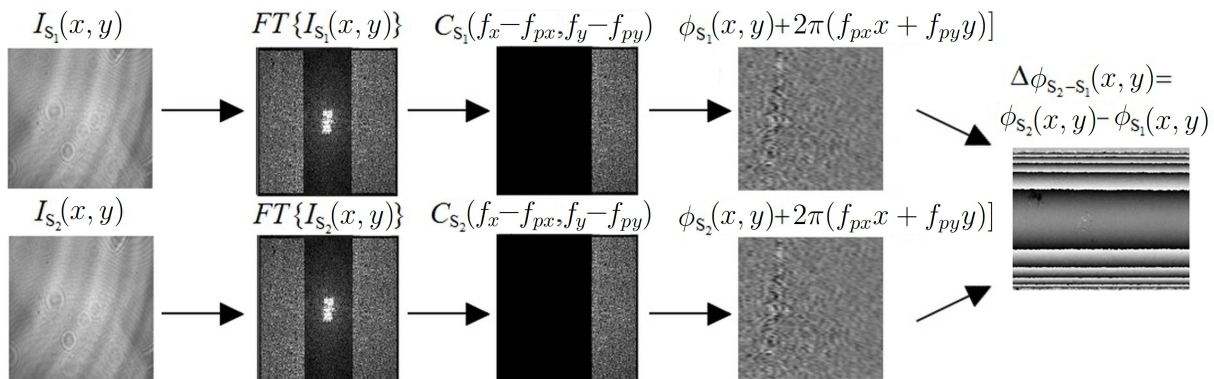


Figura 3.10 Procedimiento de la IHD para eventos estáticos.

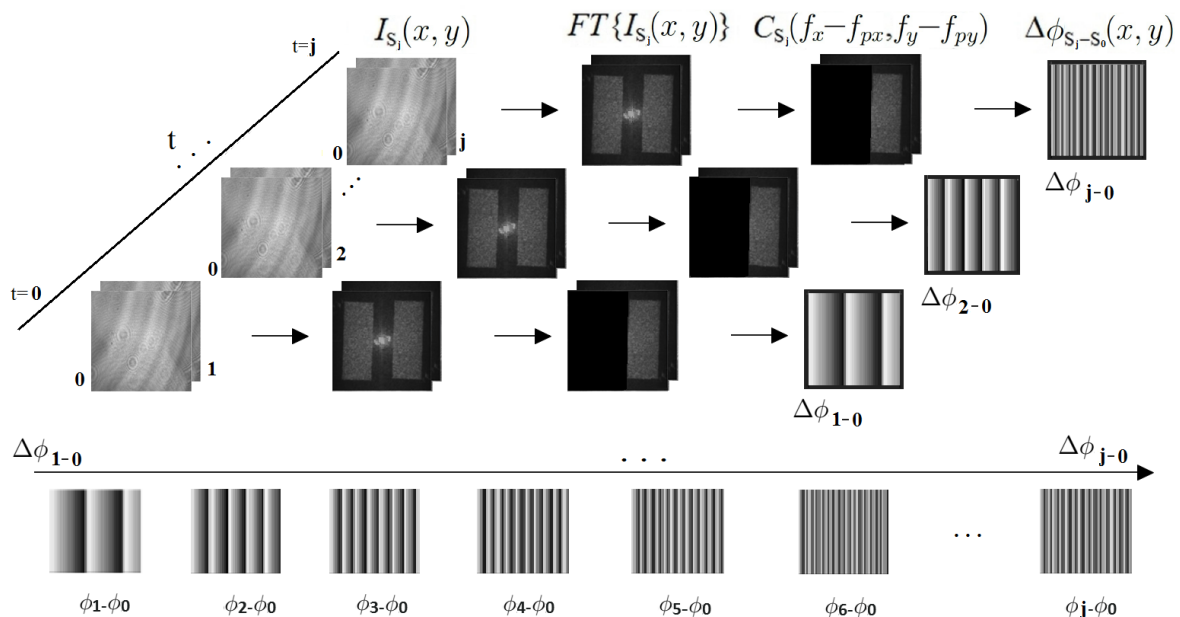


Figura 3.11 Procedimiento de la IHD para eventos dinámicos.

3.4.1 Diferencia de fase generada por contenedores rectangulares.

Supongamos un frente de onda propagándose a través de un contenedor rectangular, su LCO es un grupo de líneas constantes (si no existe un cambio físico) que representan la trayectoria de luz, y que es un frente de onda plano que salen del contenedor rectangular. Aunque

para fines reales, una alteración de las propiedades físicas de una sustancia dentro del contenedor rectangular no se encuentran en igual medida en toda la muestra a analizar, ya que no todas partículas elementales de las sustancias se encuentran con la misma energía cinética o el mismo grado de excitación; ya que existen pequeñas diferencias físicas en la sustancia dependiendo de la región en que se mida el cambio del IR. Lo anterior, es un punto que debe de considerarse y que no se obtiene un perfil de onda totalmente plano al ser propagado por un contenedor rectangular. La Fig. 3.12 muestra un contenedor plano rectangular transparente, con una sustancia líquida en su interior.

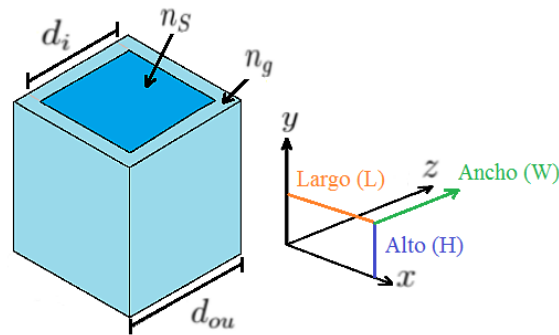


Figura 3.12 Contenedor rectangular, donde: d_i y d_t son las longitudes internas y externas del cubo de vidrio. n_s y n_g son los IR de la sustancia y del material de las paredes del contenedor, respectivamente.

La diferencia de fase entre dos frentes de onda propagados por un contenedor rectangular pueden expresarse como

$$\Delta\phi_{t-0}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta LCO = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{d_i} [n_{S_t}(x, y, t) - n_{S_0}] dz, \quad (3.22)$$

donde d_i es el espesor interno del contenedor rectangular; LCO s refiere a la longitud de camino óptico, n_{S_t} se refiere al IR enfriándose en el tiempo t y n_{S_0} es el IR de la muestra con la temperatura inicial.

Resolviendo la integral de la Ec. (3.22) y recordando que se obtiene un valor aproximado de la diferencia de fase, se deduce la expresión:

$$\Delta\phi_{t-0}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} d_i(x, y) [\Delta n_{S_{t-0}}(x, y)], \quad (3.23)$$

en donde consideramos una variación del IR en la muestra.

3.4.2 Determinación del valor de temperatura en una muestra líquida.

Es posible relacionar la propiedad óptica del IR con la propiedad de temperatura en un objeto de fase, como ya se demostró en la Ec. (eq:DphiDn) que relaciona un cambio del IR con una diferencia de fase, aunque para este caso en particular se considera un contenedor constante d_i , y puesto que los valores de concentración serán constantes en los dos hologramas y solo se tiene un cambio en el IR, se tiene la expresión dada como

$$\Delta n_S(x, y, t) = \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_{Con} [T_t(x, y, t) - T_0(x, y, 0)]. \quad (3.24)$$

donde $\Delta n_S(x, y, t) = n_S(x, y, t) - n_S(x, y, 0)$ significa el cambio IR de una sustancia en la que se mide la evolución de temperatura T en el tiempo t , que va desde $t=0$ como estado inicial, a cualquier otro tiempo $t=1,1,2,3,\dots$. La Ec. (3.24) solo depende de la variación de temperatura y no de la concentración, por lo que el valor de temperatura en un tiempo t de una sustancia líquida será determinado como

$$T_t(x, y, t) = T_0(x, y, 0) + \left[\frac{\Delta\phi_t(x, y, t)}{d_i(x, y)} \frac{\lambda}{2\pi} \right] / \left[\frac{\partial n_S}{\partial T} \right]_{Con}. \quad (3.25)$$

Capítulo 4

Resultados experimentales.

En el presente capítulo se presentan los resultados experimentales que comprueban la teoría desarrollada (ver Capítulo 3) con la IHD usando variaciones del IR para medir dos de las propiedades físicas de los líquidos (temperatura y/o concentración). Además, con la teoría desarrollada en IHD es posible cuantificar y detectar cambios en las propiedades físicas, que pudieran considerarse como adulteraciones, entre dos o más sustancias líquidas.

4.1 Medición de IR en sustancias salinas en eventos estáticos.

La Fig. 4.1 muestra el sistema implementado en laboratorio para medir los valores del IR y cuantificar variaciones en la concentración de muestras de agua salina. El sistema óptico fue implementado sobre una mesa óptica con sistema neumático para eliminar las vibraciones de baja frecuencia provenientes de eventos externos que llegasen a afectar las mediciones.

El principal aporte experimental de este trabajo de tesis es el agregado de una apertura; que permitirá obtener un mayor número de frecuencias espaciales para reconstruir el frente de onda dispersado por un objeto de fase. Al utilizar una mayor región del dispositivo de captura, se obtendrá mayor número de frecuencias en el plano-holograma que describen al objeto del plano-imagen en la imagen virtual, lo que mejorará la precisión de reconstrucción del objeto de fase.

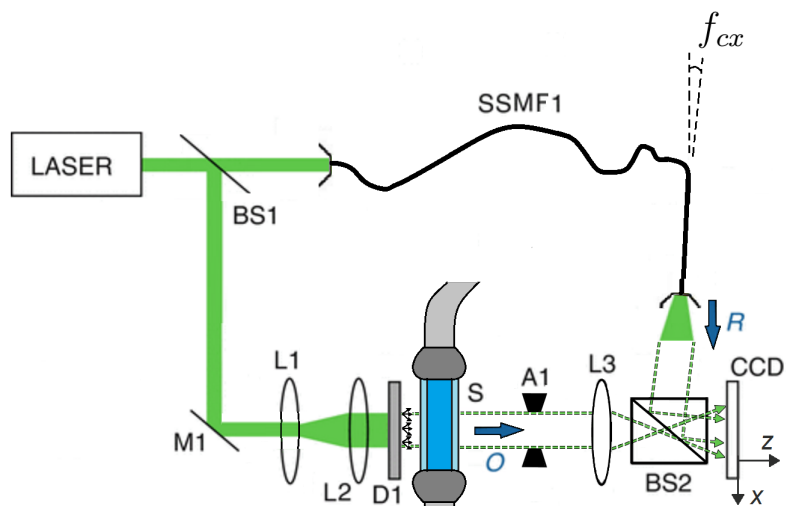


Figura 4.1 Sistema óptico experimental para medir el IR en sustancias líquidas. BS1: (50/50) divisor de haz plano; BS2: (50/50) divisor de haz cúbico; M1: espejo; L1, L2, L3: lentes; D1: difusor; S: tubo de vidrio cilíndrico (contenedor); A1: apertura rectangular; CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (por sus siglas en inglés); SMMF1: segmento de fibra de óptica monomodal; f_{cx} : frecuencia portadora a lo largo de la dirección x del plano el sensor; O: haz objeto; R: haz de referencia.

En el sistema óptico se utilizó un láser (ver Fig. 4.2) de He-Ne de $\lambda = 543.5$ nm con una potencia de 0.80 mW, el modelo es 05 – LGR – 173 de la marca Melles Griot.



Figura 4.2 Láser He-Ne con $\lambda = 543.5$.

En el arreglo óptico se utilizó una cámara CMOS (por sus siglas en inglés Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) monocromática de la marca Pixelink de 1.3 megapíxeles $[1280(H) \times 1024(V)]$ y 8 bits de rango dinámico. Ver Fig. 4.3.



Figura 4.3 Cámara CMOS de la marca Pixelink de 1.3 megapíxeles.

Se utilizó la bomba de infusión o inyector de líquidos *KDS200* (ver Fig. 4.4) para evitar pequeños desplazamientos en el tubo de vidrio al momento de introducir en el tubo de vidrio la solución acuosa a analizar.



Figura 4.4 Bomba de líquidos KDScientific 200.

La luz proveniente del láser es dividida en dos haces al ser reflejada y transmitida por un divisor de haz plano *BS1*. El haz reflejado llega hasta un espejo *M1*, que lo incide sobre un grupo de lentes; uno es un lente positivo *L1* que funcionará como expansor, mientras que el

otro es lente $L2$ que servirá como colimador del frente de onda. El frente de onda colimado llegará hasta un difusor $D1$ que generará una gran cantidad de fuentes puntuales y alta frecuencia en el frente de onda, el cual es un vidrio satinado común de 5 mm de espesor. El frente de onda de luz difusa iluminará el tubo de vidrio con la sustancia líquida a analizar S , a partir de aquí la luz esparcida se convierte en el frente de objeto O . Posteriormente, el frente de onda monocromático llegará hasta la apertura rectangular $A1$ que limitará (modulará) en dimensiones el frente de onda objeto, este frente modulado es colectado por el lente positivo $L3$ y lo llevará hasta el divisor de haz cúbico $BS2$, en donde se producirá el patrón de interferencia registrado por el $CMOS$. Por otro lado, la luz transmitida por $BS1$ o también llamado frente de onda de referencia R viaja a través de un segmento de fibra óptica monomodal, y al terminar la trayectoria sobre la fibra, este saldrá e iluminará el divisor de haz cúbico $BS2$, que como ya se mencionó es donde se crea la interferencia de los dos haces.

4.1.1 Preparación de soluciones líquidas.

Las soluciones salinas utilizadas en las pruebas experimentales se elaboraron de la siguiente forma: se usó 50 ml de agua destilada como base (S_{mol0}) en todas las mezclas generadas, usando diferentes bases, se preparó un grupo de soluciones agregando pequeñas cantidades de NaCl (0.25, 0.5, 0.75, 1.25 y 1.5 g) a cada una, obteniéndose sustancias con diferente molaridad. Cada una de ellas fue etiquetada como $S_{mol1} = 0.086$, $S_{mol2} = 0.172$, $S_{mol3} = 0.258$, $S_{mol4} = 0.344$, $S_{mol5} = 0.43$ y $S_{mol6} = 0.516$ mol según sus valores de molaridad. La elaboración de cada mezcla se realizó en base a la siguiente fórmula:

$$Soluta (g) = \left(\frac{\text{molaridad del soluto (mol)}}{1 l} \right) \{Solvente (l)\} \{masa molar de soluto (g/mol)\}. \quad (4.1)$$

Para el caso de una mezcla salina $S_{mol1} = 0.086$ mol, se sabe que se tiene como base de solvente 50 ml (0.05 l), la masa molar del NaCl es de 58.44 g/mol, y se quiere obtener una solución con 0.086 mol, así que sustituyendo en la Ec. (4.1) se obtiene el agregado del soluto a la mezcla:

$$Soluta (g) = \left(\frac{0.086 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \right) (0.05 \text{ L})(58.44 \text{ g/mol}) = 0.25 \text{ g de NaCl}.$$

La Tabla 4.1 muestra las sustancias obtenidas con determinadas cantidades en gramos de NaCl y sus correspondientes molaridades.

Tabla 4.1 Tabla de soluciones salinas ocupadas para el calculo del IR y el ΔCON .

| Sustancia | Molaridad (mol) | Cantidad de NaCl (g) |
|------------|-----------------|----------------------|
| S_{mol0} | 0.003 | 0 |
| S_{mol1} | 0.086 | 0.25 |
| S_{mol2} | 0.172 | 0.5 |
| S_{mol3} | 0.258 | 0.75 |
| S_{mol4} | 0.344 | 1 |
| S_{mol5} | 0.430 | 1.25 |
| S_{mol6} | 0.516 | 1.5 |

4.1.2 Cálculo del IR en soluciones salinas.

Para el grupo de mezclas (S_{mol0} , S_{mol1} , S_{mol2} ... S_{mol6}), se generó su holograma correspondiente ($H_{S_{mol0}}$, $H_{S_{mol1}}$, $H_{S_{mol2}}$... $H_{S_{mol6}}$), para obtenerlos, se inyectó (~ 15 ml) de cada solución en el tubo cilíndrico de vidrio a una velocidad constante de ~ 36 ml/s con el dispositivo KDS200. El proceso utilizado para la obtención de las diferencias de fase entre las sustancias subsecuentes puede verse en la Fig. 3.10. Cabe resaltar, que para evitar mapas de fase envueltos con alta frecuencia, las diferencias de NaCl entre cada sustancia subsecuente es menor a 0.25 g, sin embargo, estas altas frecuencias pueden ser superadas si se utiliza la aproximación de fase que se describe en los próximos apartados de esta tesis.

Para el cálculo del IR de cualquier sustancia de la Tabla 4.1, se usa como sustancia desconocida a S_2 de la Ec. (3.14), requiriéndose generar todos los mapas de fase envuelta entre las sustancias de menor molaridad a la sustancia deseada desconocida, usándolos a su vez como

complemento para el cálculo de $\Delta\phi_{S_2-S_1}$ en la Ec. (3.14), debido a que no podemos usar mapas de fase con alta frecuencia. Los mapas 2D de las diferencias de fase envuelta generados por el par de sustancias de molaridades con gran diferencia (que generan alta frecuencia,) se observan en la Fig. 4.5.

Posteriormente, para calcular el mapa de la diferencia de fase envuelta de referencia $\Delta\phi_{ref}$ con la Ec. (3.11), se usan los hologramas generados por las sustancias S_{mol0} y S_{mol1} de la Tabla 4.1. Los valores del IR tienen que ser conocidos y son usados para quitar la dependencia de d_i . Los IR son: $n_{S_{mol0}} = 1.3330$ (agua destilada) y $n_{S_{mol1}} = 1.3339$, de las sustancias S_{mol0} y S_{mol1} , respectivamente. De estas sustancias se genera un $\Delta\phi_{ref}$ que es utilizado para todos los cálculos del IR de las sustancias.

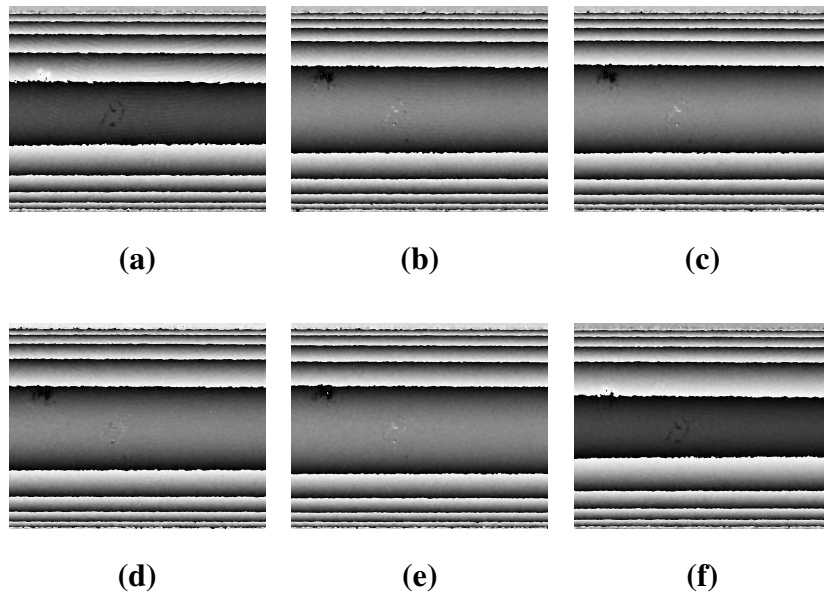


Figura 4.5 Diferencias de fase ($\Delta\phi$) de los mapas envueltos de las siguientes soluciones líquidas: (a) $s_{mol1} = 0.086$ mol y $s_{mol0} = 0.003$ mol (agua destilada), (b) $s_{mol2} = 0.172$ mol y $s_{mol1} = 0.086$ mol, (c) $s_{mol3} = 0.258$ mol y $s_{mol2} = 0.172$ mol, (d) $s_{mol4} = 0.344$ mol y $s_{mol3} = 0.258$ mol, (e) $s_{mol5} = 0.43$ mol y $s_{mol4} = 0.344$ mol, (f) $s_{mol6} = 0.516$ mol y $s_{mol5} = 0.43$ mol.

En la Tabla 4.2 se enlistan las diferencias de fase calculadas del grupo de soluciones salinas y sus posteriores con menor molaridad. En el cálculo del IR de S_2 (ver Tabla 4.1) y que toma el nombre de n_{S_2} [según la Ec. (3.14)], S_1 será la sustancia inmediata con menor molaridad,

Tabla 4.2 Representación de las diferencias de fase de las soluciones salinas.

| Diferencia | Sustancias utilizadas |
|------------|-----------------------|
| D1 | $S_{mol1} - S_{mol0}$ |
| D2 | $S_{mol2} - S_{mol1}$ |
| D3 | $S_{mol3} - S_{mol2}$ |
| D4 | $S_{mol4} - S_{mol3}$ |
| D5 | $S_{mol5} - S_{mol4}$ |
| D6 | $S_{mol6} - S_{mol5}$ |

es decir la sustancia S_{mol1} (ver Tabla 4.1). Para generar $\Delta\phi_{S_2-S_1}$ debemos añadir la diferencia de fase a nuestro punto de partida o nuestro valor base, que es dado por el agua destilada o la sustancia S_{mol0} , es decir $\Delta\phi_{S_1-S_0}$. Por lo que en la Ec. (3.14) se tiene $\Delta\phi_{S_2-S_1} = D2 + D1$ o la sumatoria de las diferencias de fase total [según los valores de la diferencias en la Tabla 4.2]. Luego, usando la diferencia de fase total, $\Delta\phi_{ref}$, $n_{S_{mol0}}$ y $n_{S_{mol1}}$ en la Ec.(3.14), es que se calcula el del IR de la sustancia desconocida deseada, que para este caso es $S_2 = 0.172$ mol.

Por último, se describe el proceso para el cálculo del IR para la sustancia S_{mol6} (ver Tabla 4.1). Recordemos que $\Delta\phi_{ref}$, $n_{S_{mol0}}$ y $n_{S_{mol1}}$ en la Ec.(3.14) serán los mismos para todos los casos, lo único en lo que se difiere es en la fase total, la cual es descrita como $\Delta\phi_{S_2-S_1} = D6 + D5 + D4 + D3 + D2 + D1$ [usando los valores de diferencia de la Tabla 4.2].

La IHD es una técnica de campo completo, lo que significa que es posible medir los valores de diferencia de fase de toda la imagen registrada. En la Fig. 4.6 se muestra la distribución del IR en S_2 (ver Tabla 4.1) al utilizar la Ec. (3.14).

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema óptico propuesto, se compararon los resultados obtenidos con aquellos encontrados en el libro: *CRC handbook of chemistry and physics* de la Ref. [129] (ver Tabla 4.3).

La Fig. 4.7 muestra gráficamente la desviación de los valores con la IHD y los encontrados en la Ref. [129].

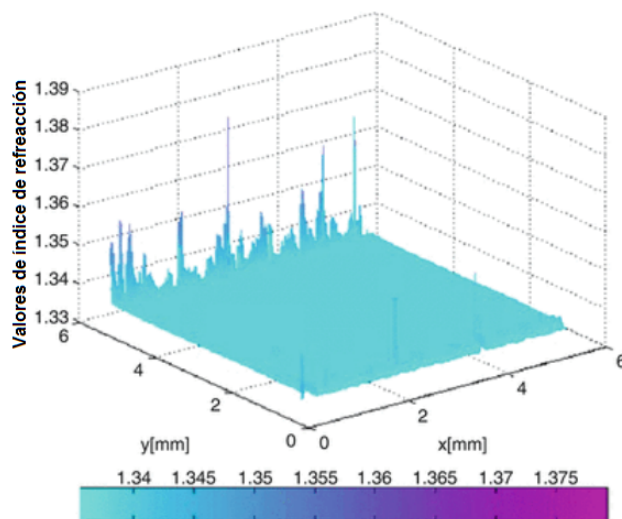


Figura 4.6 Distribución de los valores del IR de la muestra $S_{mol2} = 0.172$ moles.

Tabla 4.3 Comparación entre los valores de IR obtenidos experimentalmente con la IHD y los reportados en la Ref. [129].

| Sustancias | IR en la Ref [124] | IR medido con IHD (n_{s_2}). | Variación del IR ($\Delta n_{S_2-S_1}$). |
|------------|--------------------|----------------------------------|--|
| S_{mol1} | 1.3339 | 1.3339 | ± 0.0 |
| S_{mol2} | 1.3347 | 1.3348 | ± 0.0001 |
| S_{mol3} | 1.3356 | 1.3357 | ± 0.0001 |
| S_{mol4} | 1.3364 | 1.3365 | ± 0.0001 |
| S_{mol5} | 1.3373 | 1.3374 | ± 0.0001 |
| S_{mol6} | 1.3382 | 1.3383 | ± 0.0001 |

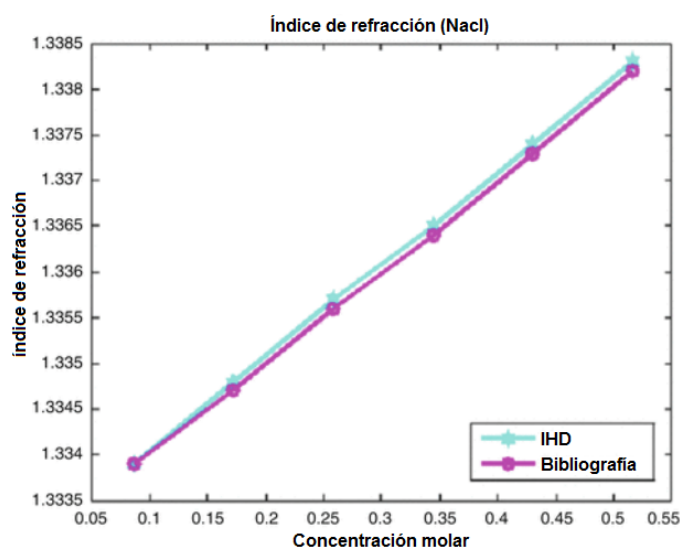


Figura 4.7 Desviación de los valores de concentración calculados con la IHD y los reportados en la literatura (Ref. [129]).

4.1.3 Método de aproximación de fase para el cálculo del IR.

De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos a través del método de medición del IR en la Sección 4.1.2, se tiene el inconveniente de que este método solo funciona cuando los mapas de diferencias de fase 2D no tiene altas frecuencias en la franjas de interferencia, es decir, el método está limitado o no funciona, cuando la sustancias tienen una diferencia mayor de 0.25 g o una diferencia de hasta 0.0009 en el valor del IR. Es por tal motivo, que se presenta el Método de aproximación de fase para el cálculo de IR como una solución para tratar los mapas de fase con altas frecuencias a través de 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 esta diferencia de fase ideal simulada, permitiendo de esta forma conocer el IR de la sustancia desconocida. Este algoritmo correlacionará la región central, que generalmente es la más definida de los mapas de fase experimentales, con la diferencia de fase simulada.

Para comprobar el funcionamiento del método en base a la aproximación de fase para el cálculo del IR (ver Sección 3.3.1) se realizó una simulación en el entorno de programación Matlab. El algoritmo propuesto simula un perfil de onda de la diferencia de fase producida por un contenedor cilíndrico cuando se tiene un par de sustancias S_1 y S_2 , y cuyos valores del IR son: $n_{S_1} = 1.3330$; y $n_{S_2} = 1.3339$; respectivamente. El radio del contenedor simulado es de $d_i = 1.5$ mm [que es el radio en la Ec. (3.15)] o puede ser calculado con la Ec. (3.13), también para simular los perfiles de la diferencia de fase se usó una longitud de onda de $\lambda = 532$ nm [usados en la Ec. (3.16)]. La Fig. 4.8 muestra los perfiles de fase (con una geometría que sigue una hipérbola) generados por un contenedor cilíndrico que en un primer instante contiene una sustancia cuyo IR es $n_{S_1} = 1.3330$; [ver Fig. 4.8(a)] y posteriormente cuando este contiene una sustancia cuyo IR es $n_{S_2} = 1.3339$; [ver Fig. 4.8(b)].

La Fig. 4.9 muestra las diferencias de fase envuelta y desenvuelta de la Fig. 4.8(a) y la Fig. 4.8(b).

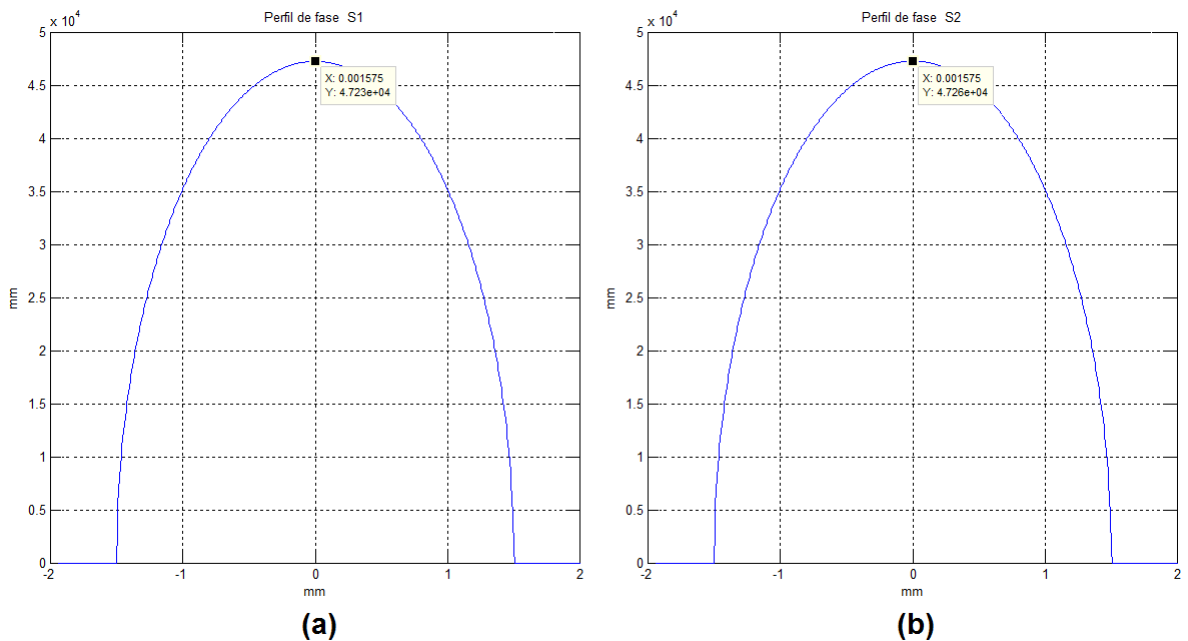


Figura 4.8 Perfiles de onda generados a partir de las fases desenvueltas de un contenedor cilíndrico con muestras líquidas cuyos IR son: (a) $n_{S_1} = 1.3330$; y (b) $n_{S_2} = 1.3339$;

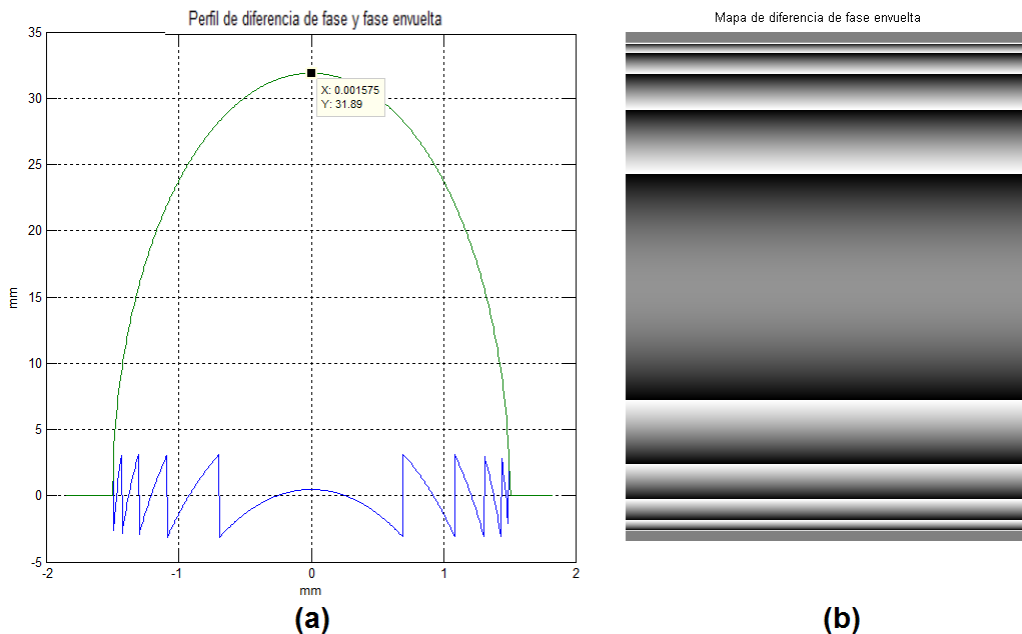


Figura 4.9 Diferencia de fase de la simulación de los frentes de onda generados a partir de los valores de $n_{S_1} = 1.3330$; y $n_{S_2} = 1.3339$. (a) Perfil de la diferencia de fase y fase envuelta de las sustancias simulados, mostrandose en verde la diferencia de fase desenvuelta y en la línea en azul la diferencia de fase envuelta. (b) Mapa 2D de la diferencia de fase envuelta.

El mapa de fase envuelto en la Fig. 4.9(b) es relativamente fácil de desenvolver por cualquier algoritmo de desenvolviendo de fase. En cambio, si se realiza la simulación del perfil de la diferencia de fase de onda que es originado por una una sustancia con $n_{S_1} = 1.3330$ y otro perfil de onda generado por una segunda sustancia con $n_{S_2} = 1.3372$ se obtiene la diferencia de fase del perfil de las sustancias que se observan en la Fig. 4.10(a) y donde la Fig. 4.10(b) muestra la diferencia de fase 2D obtenida.

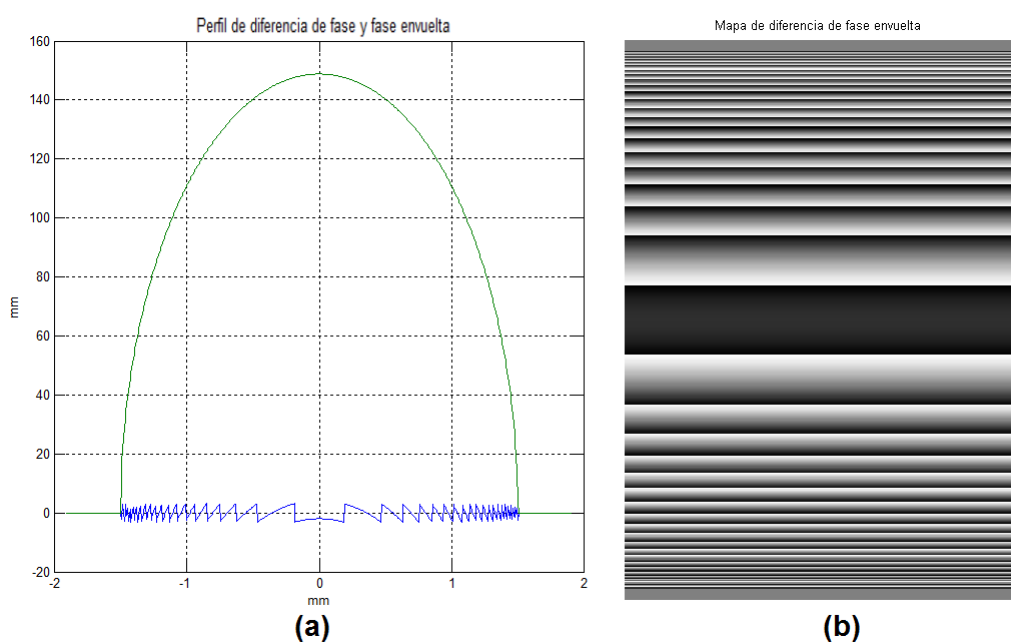


Figura 4.10 Diferencia de fase de la simulación generada a partir con los siguientes los valores de IR, $n_{S_1} = 1.3330$; y $n_{S_2} = 1.3372$;. (a) Perfil de la diferencia de fase entre los frentes de onda de las sustancias simulados, en verde se muestra la diferencia de fase desenvuelta y en la línea en azul se representa la diferencia de fase envuelta. (b) Mapa en 2D de la diferencia de fase envuelta.

A diferencia del mapa 2D obtenido en la Fig. 4.9(b), el nuevo mapa obtenido da la Fig. 4.10(b), donde este no puede ser desenvuelto por cualquier algoritmo de desenvolvimiento de fase. Por lo que no podemos saber la magnitud de la diferencia de fase obtenida por las sustancias que generaron la diferencia de fase 2D de la Fig. 4.10(b). En el caso de la Fig 4.11, se muestra dos casos de distribución de fase desenvuelta a partir de una mapa de fase envuelta de baja frecuencia [ver Fig. 4.11(a)] y la fase desenvuelta de un mapa de fase envuelta de alta

frecuencia [ver Fig. 4.11(b)]. Con esta imagen se visualiza como con un mapa de fase de baja frecuencia es posible contabilizar la totalidad de la distribución de fase (con la geometría de una hipérbola), a diferencia del mapa de fase de alta frecuencia, donde no es posible identificar el inicio de la distribución de fase.

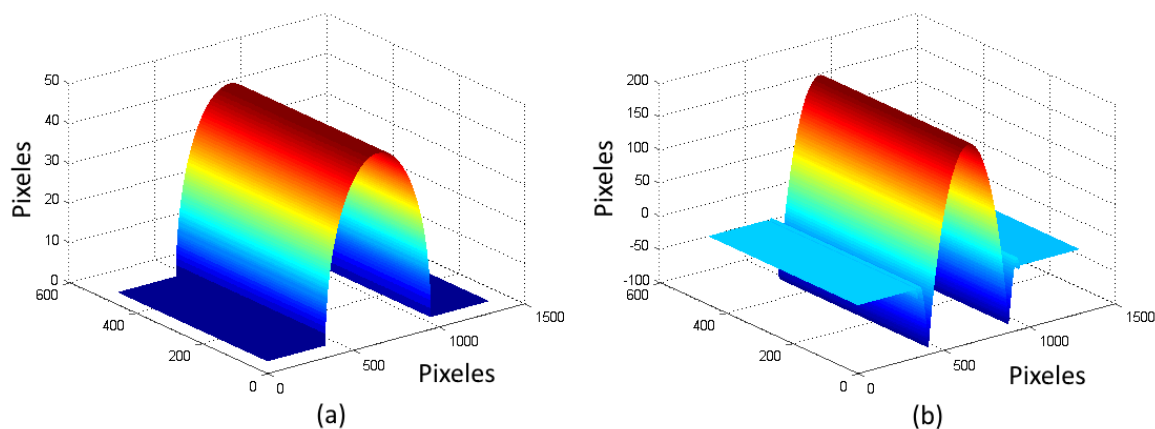


Figura 4.11 Distribuciones de fase desenvuelta a partir de un mapa de fase envuelta con: (a) baja frecuencia en las franjas, (b) alta frecuencia en las franjas.

Resultados del IR utilizando una aproximación de fase.

En los casos experimentales que se observan en la Fig 4.12, se muestran diferentes mapas 2D de la diferencias de fase envuelta para diferentes valores de sustancias, y se entiende la importancia de la región central del mapa de fase envuelta, considerándose como la mayor diferencia de fase.

La diferencia de fase generada experimentalmente al utilizar las sustancias S_{mol6} y S_{mol0} (ver Tabla 4.1) se puede observar en la Fig. 4.13.

El algoritmo de comparación de fase recolecta una región de 200 filas del mapa 2D de la diferencia fase real envuelta, después, numéricamente se crea una elipse con un supuesto valor de IR (que cambia durante la simulación), para generar una fase envuelta simulada. La correlación de la diferencia de fase envuelta experimental y la diferencia de fase envuelta simulada obtiene

un valor de error cuadrático determinado. La Fig. 4.14 muestra el proceso de comparación y selección de la diferencia de fase con menor error a la diferencia de fase experimental.

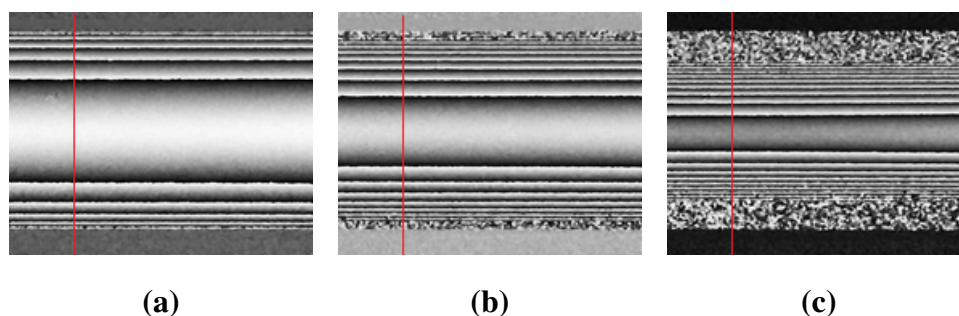


Figura 4.12 Diferencias de fase ($\Delta\phi$) de los mapas envueltos de las siguientes soluciones líquidas, donde la línea en rojo es la sección transversal de la diferencia de fase experimental: (a) $s_2 = 0.1$ mol y $s_1 = 0.0003$ (agua destilada), (b) $s_2 = 0.2$ mol y $s_1 = 0.003$ mol, (c) $s_2 = 0.5$ mol y $s_1 = 0.003$ mol.

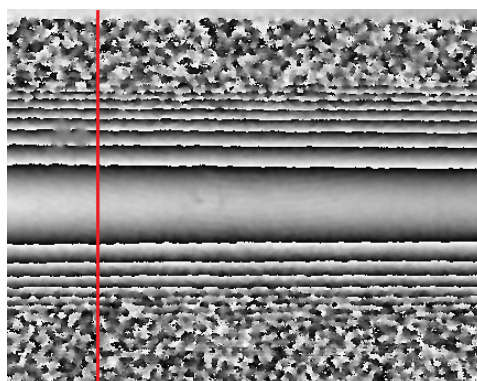


Figura 4.13 Mapa en 2D de la diferencia de fase envuelta generada entre S_6 y S_0 , donde la línea en rojo es la sección transversal de la diferencia de fase experimental

La Tabla 4.4 enlista los resultados obtenidos del cálculo de la diferencia del IR entre dos sustancias (ver Tabla 4.1). En los resultados de la Tabla 4.4 se aprecia que el error aumenta conforme se va calculando los mapas de diferencias de fase con una mayor frecuencia de líneas.

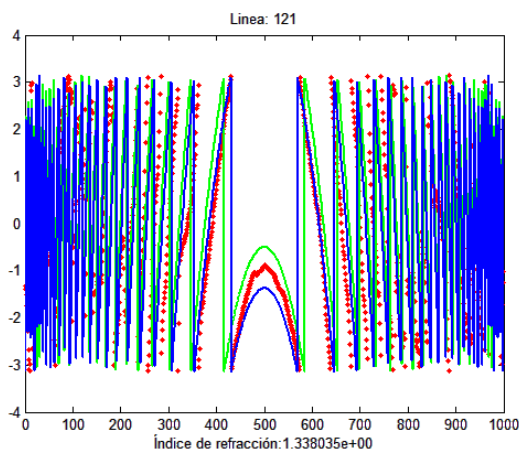


Figura 4.14 Aproximación de fase entre S_6 y S_0 . La línea azul representa la diferencia de fase envuelta encontrada con menor error; la línea verde representa la diferencia de fase que es comparada y que cambia de valor; la línea roja punteada significa la diferencia de fase envuelta real obtenida en laboratorio.

Tabla 4.4 Comparación entre los valores de IR de las muestras líquidas encontrados con la IHD y los encontrados en la literatura.

| Mezclas comparadas | IR (real) [129] | IR con la aproximación de fase de la IHD | Variación |
|-----------------------|-----------------|--|--------------|
| $S_{mol1} - S_{mol0}$ | 1.3339 | 1.3339 | ± 0.0 |
| $S_{mol2} - S_{mol0}$ | 1.3347 | 1.3347 | ± 0.0 |
| $S_{mol3} - S_{mol0}$ | 1.3356 | 1.3357 | ± 0.0001 |
| $S_{mol4} - S_{mol0}$ | 1.3364 | 1.3365 | ± 0.0001 |
| $S_{mol5} - S_{mol0}$ | 1.3373 | 1.3375 | ± 0.0002 |
| $S_{mol6} - S_{mol0}$ | 1.3382 | 1.3384 | ± 0.0002 |

4.1.4 Medición de ΔCON en soluciones salinas.

En este apartado se describe el esquema de IHD propuesto para la medición de variaciones de concentración en dos sustancias líquidas. En la Fig. 4.1, se muestra el esquema del sistema óptico utilizado. Como primer paso, se obtuvo $\Delta\phi_{ref}$ (con el primer grupo S_{mol1} y S_{mol0}) para obtener el valor de d_i en cada columna de la imagen del tubo de vidrio y posteriormente, se calculó la diferencia de concentración usando la Ec. (3.20) entre el grupo de las muestras líquidas a analizar (ver Tabla 4.2), usándose los mapas fase envueltos de la Fig. 4.5.

La Tabla 4.5 enlista los resultados obtenidos del cálculo de la diferencia de concentración entre dos sustancias usando la Ec. (3.20).

Tabla 4.5 Comparación entre los valores de concentración de las muestras líquidas encontrados con la IHD y los encontrados en la literatura.

| Mezclas comparadas | $\Delta CON_{S_2-S_1} (Real)$ [129] | $\Delta CON_{S_2-S_1} (IHD)$ | Variación |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------|
| $S_1 - S_0$ | 0.083 | 0.083 | ± 0.0 |
| $s_2 - S_1$ | 0.086 | 0.086 | ± 0.0 |
| $S_3 - S_2$ | 0.086 | 0.088 | ± 0.002 |
| $S_4 - S_3$ | 0.086 | 0.081 | ± 0.005 |
| $S_5 - S_4$ | 0.086 | 0.082 | ± 0.004 |
| $S_6 - S_5$ | 0.086 | 0.085 | ± 0.001 |

4.2 IHD en eventos dinámicos.

El método propuesto de IHD, también es utilizado para el cálculo de la evolución de la diferencia de temperatura en una muestra líquida y ya que es un evento dinámico, es posible obtener la variación de fase utilizando solo los valores de la imagen de fase envuelta, sin necesidad de visualizar franjas de interferencia de fase para el cálculo de variaciones de propiedades físicas que cambien en el tiempo.

4.2.1 Medición de la evolución de temperatura en líquidos.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al utilizar los cuadros (frames) de un video para determinar la variación de temperatura en el proceso de enfriamiento de agua destilada.

En la Fig. 4.15, se muestra el sistema óptico de la IHD implementado en eventos dinámicos, su diseño se realizó en base a un interferómetro Mach-Zehnder común, con la particularidad de un pequeño desplazamiento en el brazo de referencia para obtener la configuración holográfica fuera de eje (ver Fig. 4.15). Con la implementación de este sistema se busca monitorear y cuantificar la evolución de la energía calorífica (temperatura) en una cada pequeña región de una muestra líquida durante un lapso de tiempo determinado en el proceso de enfriamiento.

En el sistema óptico se utilizó una celda de cuarzo rectangular como contenedor del líquido, del cual se requiere monitorear la evolución de la temperatura. Las dimensiones internas de la celda de cuarzo son: $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 45\text{mm}$ (largo \times ancho \times altura). La celda de cuarzo utilizada puede verse en la Fig. 4.16.

El termómetro usado para verificar la exactitud de los datos obtenidos fue el modelo 90090-00 de la marca Cole-Parmer. Este termómetro cuenta con un rango de temperatura de -50 a 150°C (con $\pm 1^{\circ}\text{C}$). El termómetro digital utilizado puede apreciarse en la Fig. 4.17.

El dispositivo de captura de imágenes del sistema óptico cuenta con un rango dinámico de 14 bits, mayor al del habitual (que por lo general es de 8 bits), lo que aumentará la sensibilidad de las mediciones. Para el registro de hologramas se utilizó una cámara CCD de 14 bits de

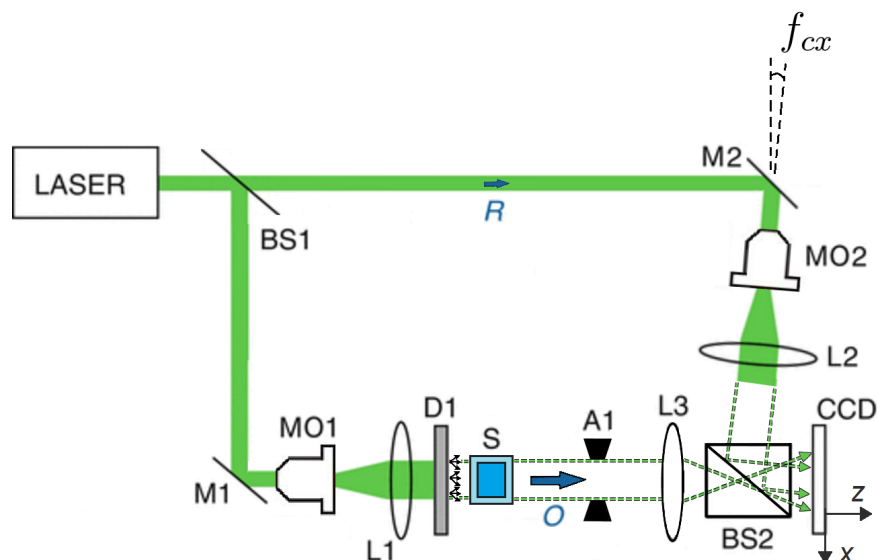


Figura 4.15 Sistema óptico implementado en la medición de temperatura. BS1: (50:50) divisor de haz plano; BS2: (50:50) divisor de haz cubico; M1, M2: espejos; MO1, MO2: (10×) objetivo de microscopio; L1, L2, L3: lentes; D1: difusor; S: celda de cuarzo; A1: apertura rectangular; CCD: charge-coupled device (por sus siglas en inglés); f_{cx} : frecuencia portadora a lo largo de la dirección x del plano el sensor; O: haz objeto; R: haz de referencia.



Figura 4.16 Celda de cuarzo

rango dinámico de la marca PCO, conocida como el modelo pco.pixelfly.usb que puede verse en la Fig 4.18.

El diseño y construcción del sistema óptico es muy parecido al presentado en la Sección 4.1, la gran diferencia con el otro sistema, es que este no utiliza la fibra monomodal, demostrándose que la IHD es capaz de funcionar con las dos configuraciones, es decir, con fibra óptica y sin ella. La descripción del funcionamiento del sistema óptico (Fig. 4.15) consta de un frente de onda monocromática proveniente de un láser a una potencia de 5 mW es dividido por un



Figura 4.17 Termómetro de bolsillo con un rango de -50 a 150°C



Figura 4.18 Cámara CCD *pco.pixelfly.usb*

divisor de haz plano $BS1$. El haz reflejado por $BS1$, a su vez, es dirigido por el espejo $M1$ hacia un objetivo de microscopio $MO1$. Al salir de $MO1$, la luz proveniente de $MO1$ es colimado por $L1$, y se propagará hasta el difusor $D1$. La luz difusa generada por $D1$ creará un frente de onda de alta frecuencia, además con esto se evitará las aberraciones ópticas en forma de anillos concéntricos que son provocadas por partículas de polvo o fisuras en los elementos ópticos utilizados. Después, esta luz difusa pasará a través de un recipiente transparente de cuarzo de $10 \times 10 \times 50$ mm (ver Fig. 4.16) llenado con la muestra líquida caliente a analizar S . El frente de onda dispersado por el contenedor (ya con su fase modificada según los valores de temperatura de la muestra y el cual toma el nombre de haz objeto) es modulado y recolectado por una apertura rectangular $A1$ y una lente positiva $L3$ con una distancia focal de 75 mm, respectivamente. Finalmente, este frente de onda objeto se hace interferir con el haz transmitido (frente de onda de referencia) dentro de un divisor de haz cúbico $BS2$ colocado frente a un CCD. El tamaño de $A1$ es de alrededor de $2.31 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$ ($H \times V$), la forma de la apertura más conveniente es la rectangular, ya que nos permite una mayor recolección de la luz deseada, para obtener así un mayor número de altas frecuencias que tienden a incrementar

la resolución espacial. Además, esto facilita el filtrado en el dominio de frecuencias. El CCD utilizado es el de una cámara pco.pixelfly.usb monocromática de 14-bits de rango dinámico, con 1392×1040 píxeles, y el tamaño de cada píxel de $6.45 \times 6.45 \mu\text{m}$. La velocidad de registro fue de 12 frames por segundo (fps), y la temperatura dentro del laboratorio durante la elaboración del experimento permaneció de alrededor de 19°C .

Cálculo de la evolución de temperatura en líquidos.

Para verificar el correcto funcionamiento del método propuesto, para la medición de la temperatura en un líquido, se calentó 66 ml de agua destilada a 30°C y se vertió dentro de la celda de cuarzo (ver Fig. 4.16) del sistema óptico, posteriormente se esperaron unos segundos hasta que la temperatura del agua se estableciera en 22.0°C (según la medición arrojada por el termómetro), determinándose así la temperatura inicial [T_0 de la Ec. (3.25)] del líquido. Inmediatamente se inicia la captura de hologramas (realización de un video) a una tasa de 12 fps, y se capturaron 1460 hologramas. Un algoritmo desarrollado en Matlab (ver Apéndice D), accede a los hologramas registrados dentro del archivo de video, para después realizar la evaluación de fase con el método de la TF para generar los mapas 2D de las diferencias de fase entre los hologramas del video. En la Fig. 4.19 se muestran los mapas de la diferencia de fase envuelta, y los tres píxeles [p_1 ($4.1 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$), p_2 ($8.3 \text{ mm} \times 6.7 \text{ mm}$), p_3 ($6.8 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$)] seleccionado en donde se realiza la medición de temperatura. La ubicación de los tres píxeles seleccionados para la medición de temperatura fueron ubicados en la imagen del objeto, fue de tal manera que puedan evaluar los datos de temperatura en los laterales (dos puntos) y uno más en el fondo del centro del contenedor. Cabe hacer notar que es posible calcular la temperatura en la totalidad del plano de coordenadas espaciales de los hologramas registrado, como bien lo describe la Ec. (3.25).

Los tiempos seleccionados para monitorear el proceso de enfriamiento fueron $t = 1, 21, 43, 64, 86$ y 108 (ver Fig. 4.19).

El proceso realizado para obtener la evolución de fase se puede apreciarse en la Fig 4.20.

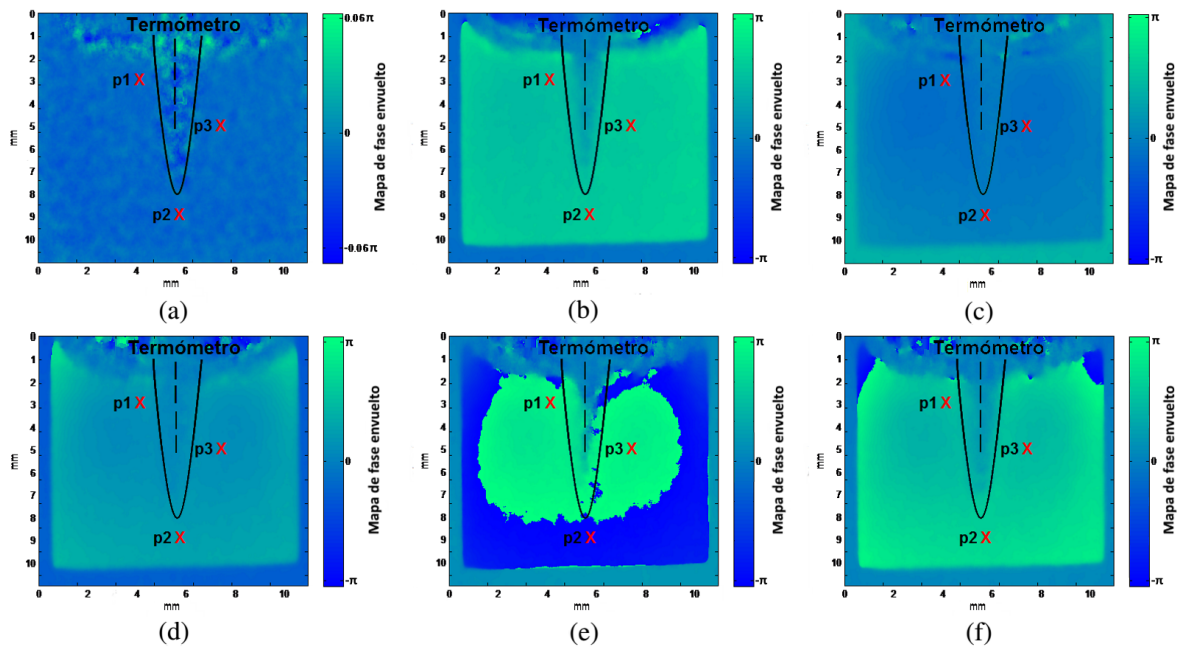


Figura 4.19 Mapas en 2D de las diferencias de fase de los mapas envueltos en los tiempos: (a) $t = 1$ s; (b) $t = 21$ s; (c) $t = 43$ s; (d) $t = 64$ s; (e) $t = 86$ s; (f) $t = 108$ s.

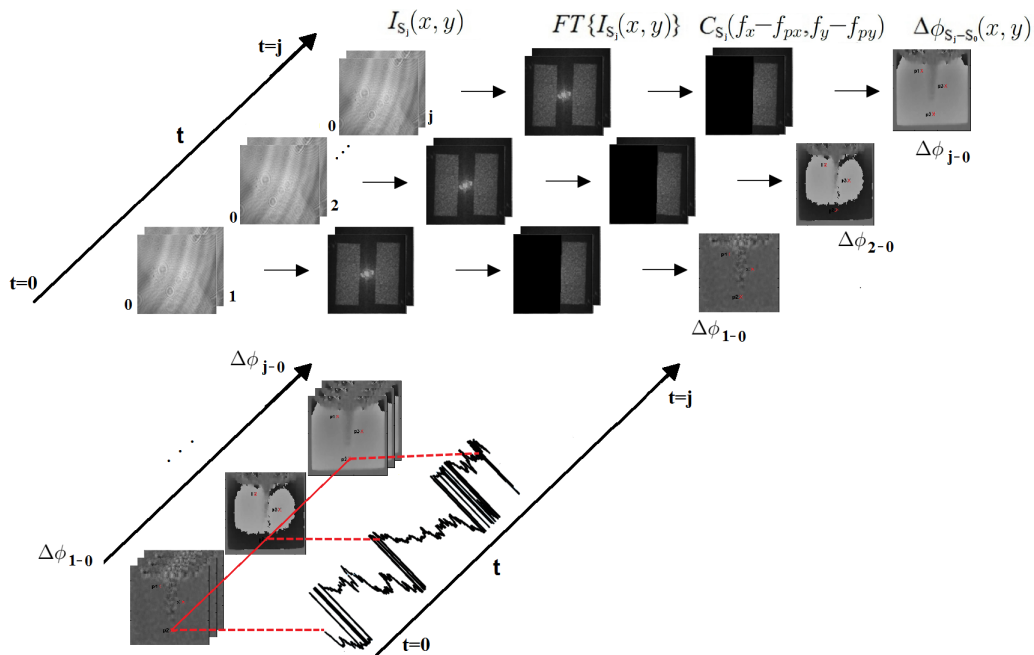


Figura 4.20 Proceso de la IHD para la medición de la evolución de la temperatura en una mezcla líquida.

Resultados de la medición de temperatura en líquidos.

En base al termómetro utilizado, las mediciones de la temperatura (con el algoritmo) se hicieron considerando dos dígitos enteros y uno decimal, la comparación de los resultados (del termómetro y técnica IHD) deber estar en los mismos rangos. El número de valores de temperatura obtenidos del proceso de enfriamiento del agua destilada dependerá de la velocidad (fps) de captura de la cámara, en el caso de este experimento se obtuvieron 1460 hologramas. El tiempo aproximado del video capturado del proceso de enfriamiento fue de alrededor de 125 segundos.

Los mapas 2D de la diferencia de fase envuelta generan un vector de temperatura dentro del rango de $-\pi$ a π . Usando este último vector y un algoritmo sencillo de desenvolvimiento de fase se genera otro vector con los valores de temperatura. Los dos vectores generados se pueden apreciar en la Fig 4.21.

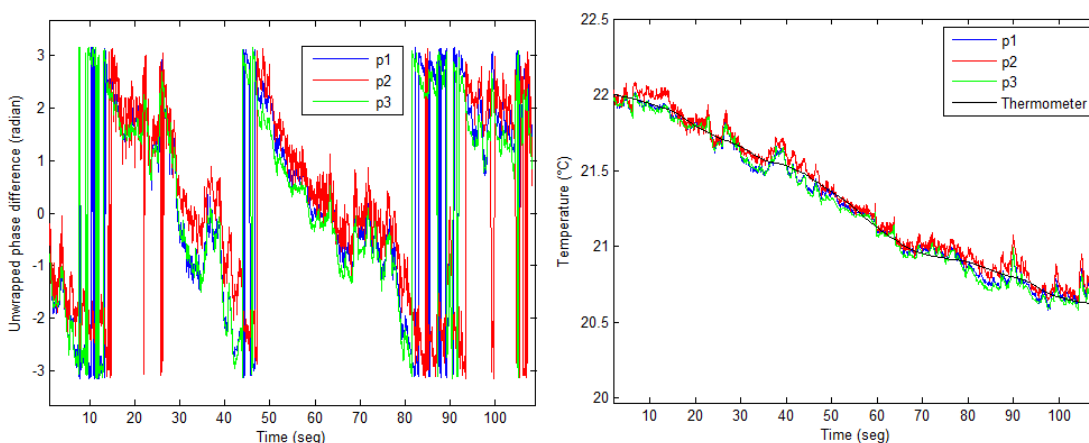


Figura 4.21 Diferencias de fase de los mapas envueltos y desenvueltos en los 3 pixeles seleccionados para el monitoreo del proceso de enfriamiento en una sustancia líquida para (a) Valores de temperatura envueltos, (b) Valores de temperatura desenvuelta.

En la Tabla 4.6 se enlista los valores de temperatura medidos con el termómetro, los obtenidos con la IHD y la desviación entre estos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se comprueba lo enunciado por la ley del enfriamiento de Newton o enfriamiento newtoniano, que establece que la tasa de pérdida de calor

Tabla 4.6 Valores de temperatura y su comparación con los obtenidos con el termómetro.

| Tiempo (s) | Termómetro (°C) | Temp. en $p1$ (°C) | Temp. en $p2$ (°C) | Temp. en $p3$ (°C) | Desviación (°C) |
|------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 0 | 22 | 22 | 22 | 22 | 0 |
| 1 | 21.9 | 22 | 21.9 | 21.9 | 0.1 |
| 21 | 21.6 | 21.6 | 21.5 | 21.5 | 0.1 |
| 43 | 21.3 | 21.3 | 21.2 | 21.2 | 0.1 |
| 64 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 20.9 | 0 |
| 86 | 20.7 | 20.7 | 20.6 | 20.6 | 0.1 |
| 108 | 20.2 | 20.4 | 20.4 | 20.4 | 0.2 |

de un cuerpo es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y sus alrededores. En otro aspecto, la magnitud de la variación de temperatura (decremento) disminuye cuando la temperatura final se acerca a la temperatura ambiente [130].

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro.

En esta sección del documento se presentan las conclusiones observadas en los resultados del trabajo de investigación, también, se mencionan algunas posibles consideraciones como trabajo futuro.

5.1 Conclusiones.

Para el caso estático. De los resultados experimentales presentados en el capítulo 4 se concluye que el sistema óptico implementado para medir variaciones del IR de una, dos o más mezclas líquidas, es rápido, sencillo, exacto, no invasivo y se obtienen resultados en campo completo.

Uno de los puntos destacables de la nueva propuesta es que no se requieren de elementos o contenedores especiales para colocar las soluciones; el sistema puede ser ajustado y funcionar con contenedores cilíndricos comunes. Este sistema óptico fue probado y demostró ser funcional en mediciones de variaciones del IR en líquidos en condiciones estáticas.

Con la IHD es posible asociar cambios del IR en las propiedades físicas de concentración y temperatura en un líquido. Concluyéndose, que la nueva propuesta basada en IHD tiene mayor exactitud en comparación con otros sistemas ópticos de IHD que no utilizan apertura en la medición de las propiedades físicas de líquidos. Esto se debe a que el funcionamiento de la apertura junto con el método de la TF para la evaluación la fase en hologramas, permite modular las altas y bajas frecuencias, por lo que la separación y filtrado de estas es más eficiente. Además, se aumenta la sensibilidad en el mapa de diferencia de fase envuelta (en comparación

al uso de las teorías de difracción para recuperar la fase), al usar el método de la TF para la evaluación de la fase que permite reducir el uso de recursos de máquina y el tiempo del cálculo de la diferencia de fase entre dos frentes de onda objeto.

Del primer trabajo de investigación para medir el IR de un grupo de soluciones salinas (soluciones líquidas) se obtuvo una exactitud de 0.0001, lo que indica que se tiene una mayor exactitud en comparación con otros resultados reportados en la literatura con una exactitud de 0.0002 del IR en líquidos [75].

Se presenta un método robusto basado en IHD que funciona a pesar de utilizar como contenedor cualquier tubo de vidrio fabricado sin control de calidad y que puede presentar imperfecciones en la morfología del mismo. Por lo anterior, se concluye que esta propuesta puede aplicarse en el control y monitoreo directamente en el proceso de fabricación, traslado de muestras o producto líquido que son contenidas en tubos de vidrio comunes; el método propuesto en IHD puede ser utilizado para detectar y medir adulteraciones en las propiedades de físicas de una muestra líquida.

Respecto al segundo trabajo sobre el método de la aproximación de la diferencia de fase (correlación de una fase simulada y una diferencia de fase real obtenida experimentalmente). Se obtuvieron resultados con una exactitud del orden de 0 a 0.0002, aunque esta exactitud se pierde cuando se miden diferencias del IR muy grandes, pero se puede reducir dependiendo del conocimiento y las características de la imagen del objeto de fase. Principalmente con este trabajo eliminamos la dependencia de solo considerar mapas de fase de baja frecuencia, pudiendo ahora trabajar con mapas de fase que presenten altas frecuencias.

Del tercer trabajo experimental, se concluye que es posible medir de variaciones de concentración entre dos muestras líquidas (mezclas salinas), que no tengan una variación de 0.086 mol, además, no se utiliza la calibración del sistema para su funcionamiento. De los resultados se concluye que pueden ser detectadas variaciones de concentración entre líquidos con una desviación de 0.001 moles. En soluciones salinas, puede detectarse variaciones de 0.003 gramos de cloruro de sodio (NaCl), lo que equivale a detectar 6×10^{-5} de peso de sal en 50 ml de agua destilada.

Del cuarto y último trabajo de investigación se concluye y confirma la eficiencia de la IHD para el estudio de eventos dinámicos en líquidos. Se estudió la evolución y medición de los campos de temperatura de una muestra líquida, utilizando una pequeña región del mapa de fase envuelto se puede monitorear la evolución de una diferencia de fase usando un primer holograma como base y sus consecuentes como objetos modificados en sus propiedades físicas. Se concluye de los resultado obtenidos que el sistema óptico propuesto (con la apertura) puede detectar variaciones de temperatura del orden de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ en agua destilada. La principal ventaja de utilizar un método óptico para la medición de temperatura es que no se requiere contacto con la muestra. Esta puede ser una ventaja considerable a diferencia de utilizar un termómetro; que tiene que estar en contacto con la muestra líquida a analizar.

Con este trabajo de investigación se comprueban las ventajas de la IHD que señala ser una técnica no invasiva, no destructiva, con gran exactitud, que puede ser empleada casi en tiempo real y de campo completo en objetos en condiciones estáticas y dinámicas. Como conclusión principal con esta nueva propuesta en IHD, se tiene que es posible aumentar la sensibilidad y exactitud de los datos con la implementación de una apertura rectangular que modula las altas frecuencias y permita una fácil eliminación de bajas frecuencias usando métodos de procesamiento de señales comunes. La propuesta demostró ser de gran utilidad al momento de estudiar las propiedades física de concentración y temperatura de muestras líquidas.

5.2 Trabajo a futuro.

- Implementar el algoritmo en el entorno de programación Labview; en base a la complejidad de los algoritmos y otras investigaciones, Labview puede ser una opción más veloz que Matlab.
- Se desea implementar un algoritmo basado en redes neuronales que permita calcular de manera rápida el mapa en 2D de la diferencia de fase envuelta y por consiguiente la obtención del IR. Lo tardado de esta propuesta es el entrenamiento de la red neuronal, pero una vez este, es una opción que puede ser muy rápida en la obtención del IR.

- Mejorar la precisión de los datos de medición del sistema óptico en las condiciones estáticas con el uso de una cámara de mayor rango dinámico, por ejemplo una de 14 bits en lugar de 8 bits. Hacer uso de un láser que tenga menor longitud de onda. Al tener menor longitud de onda se generarán más franjas de interferencia en los mapas de fase envueltos, y la diferencias de fase calculadas serán menores. El inconveniente será el no generar mapas de fase con un gran número de franjas.
- Mejorar el proceso de filtrado y desenvolvimiento de fase mediante el desarrollo de filtros y métodos especialmente diseñados.
- Desarrollar un prototipo portátil capaz de medir diferencias del IR en sustancias líquidas.

Apéndice A: Código de Matlab del cálculo del IR en líquidos.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% Cálculo del IR en soluciones salinas
%%%%%%%% Parametros para inciar el algortimo %%%%%%%%%
close all; clc; clear all; format long;
x=linspace(0,0.0052,1024); %para la eescala
%%%%%%%% Lectura de hologramas %%%%%%%%%
foto1 = imread('NaCl086-1.bmp');
foto2 = imread('ref1.bmp');
%%%%%%%% Muestra hologramas %%%%%%%%%
figure (1); imagesc(foto1); colormap gray; axis off;
figure (2); imagesc(foto2); colormap gray; axis off;
%%%%%%%% Inicia el método de la evaluación de la fase con el TF %%%%%%%%%
%%%%%%%% Sustancia 1 %%%%%%%%%
%%%%%%%% Obtencio de la TF %%%%%%%%%
fh1=fftshift(fft2(foto1));
figure (3); image(0.0025*abs(fh1)); axis off; colormap gray; hold on;
%%%%%%%% Filtrado de la contribución de frecuencia esperada %%%%%%%%%
fm1=928; fm2=1270; c1=20; c2=991;
rect1=[fm1,c1,fm2-928,c2];
rectangle('Position',rect1,'EdgeColor','g','LineWidth',2);
recorte1=fh1(c1:c2,fm1:fm2);
f1x=zeros(size(foto1)); f1x(c1:c2,fm1:fm2)=recorte1;
figure(4); image(0.0025*(abs(f1x))); colormap gray; axis off;
%%%%%%%% Suatancia 2 %%%%%%%%%
fh2=fftshift(fft2(foto2));
recorte2=fh2(c1:c2,fm1:fm2);
f2x=zeros(size(foto2)); f2x(c1:c2,fm1:fm2)=recorte2;
%%%%%%%% Transformada Inversa %%%%%%%%%
ifx1=ifft2(f1x); ifx2=ifft2(f2x);
R1=real(ifx1); I1=imag(ifx1);
R2=real(ifx2); I2=imag(ifx2);
%%%%%%%% Cálculo de fase %%%%%%%%%
phase1=atan2(I1,R1);
phase2=atan2(I2,R2);
%%%%%%%% Acomodo de los saltos de fase %%%%%%%%%
if phase1 >= phase2;
    dif=phase1-phase2;
else
    dif=phase1-phase2+(2*pi);

```

```

end
figure (5); imagesc(dif); colormap gray; axis off;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Proceso de filtrado de fase %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
B = fspecial('disk',9);
Real = filter2(B,cos(dif),'same'); Imag = filter2(B,sin(dif),'same');
fasefil = atan2(Imag, Real);
figure (6); imagesc(fasefil); colormap gray, axis off;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Desenvolvimiento de fase %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
IM=Real+(Imag*1j);
[recortefase]=GoldsteinUnwrap2D_r1(IM);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Normalización de la distribución de fase %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mni=abs(min(min(recortefase)));
desenvueltanor=recortefase+mni;
figure (7); mesh(desenvueltanor);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Calculo del Ir con las diferencias de fase obtenidas %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Suma de las diferebcias de fase con menor molaridad %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
sumadefases= desenrefynacl0861+desenNacl086yNacl171+desenNacl172yNacl258;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Valores del índice de refracción de referencia %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Nnacl=1.3339;          % IR con 0.086
Nad=1.3330;          % IR del agua destilada
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Expresión metamática %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ni=((Nnacl-Nad).*(sumadefases))./(desenrefynacl0861)+Nad;
figure(10);mesh(ni);

```

Apéndice B: Código de Matlab de aproximación del mapa de fase envuelto.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Aproximación de diferencia de fase con el mapa de fase envuelta
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%close all, clear all; clc; format longE;
% ref1.bmp          ---          ref2.bmp
% NaCl086-1.bmp     ---          NaCl086-2.bmp     ---          NaCl086-3.bmp
% NaCl172-1.bmp     ---          NaCl172-2.bmp     ---          NaCl172-3.bmp
% NaCl258-1.bmp     ---          NaCl258-2.bmp     ---          NaCl258-3.bmp
% NaCl344-1.bmp     ---          NaCl344-2.bmp     ---          NaCl344-3.bmp
% NaCl430-1.bmp     ---          NaCl430-2.bmp     ---          NaCl430-3.bmp
% NaCl516-1.bmp     ---          NaCl516-2.bmp     ---          NaCl516-3.bmp

%foto2 = double(imread('NaCl516-2.bmp'));
%foto1 = double(imread('ref2.bmp'));

figure (1); imagesc(foto1); colormap gray; axis off;
figure (2); imagesc(foto2); colormap gray; axis off;
foto1p=foto1; foto1=foto2; foto2=foto1p;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Recorte del holograma en le muestra 1 %%%%%%%%%
fh1=fftshift(fft2(foto1));
figure (3); image(0.0025*abs(fh1)); axis off; colormap gray; hold on;
fm1=855; fm2=1260; c1=295; c2=1010;
recorte1=fh1(c1:c2, fm1:fm2);
min1=min(min(recorte1)); max1=max(max(recorte1));
f1x=zeros(size(foto1)); f1x(c1:c2, fm1:fm2)=recorte1;
figure(4); image(0.0025*(abs(f1x))); colormap gray; axis off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Recorte del holograma en le muestra 1 %%%%%%%%%
fh2=fftshift(fft2(foto2));
recorte2=fh2(c1:c2, fm1:fm2);
f2x=zeros(size(foto2)); f2x(c1:c2, fm1:fm2)=recorte2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo de fase de cada holograma filtrado %%%%%%%%%
ifx1=ifft2(f1x);          ifx2=ifft2(f2x);
R1=real(ifx1);           I1=imag(ifx1);
R2=real(ifx2);           I2=imag(ifx2);
phase1=atan2(I1,R1);
phase2=atan2(I2,R2);

```

```

%%%%%%%%%%%% Diferencia de fase %%%%%%%%%%%%%%
if phase1 >= phase2;
    dif=phase1-phase2;
else
    dif=phase1-phase2+(2*pi);
end
figure (5); imagesc(dif); colormap gray; axis off;

%%%%%%%%%%%% Filtrado del mapa de fase evuelto %%%%%%%%%%%%%%
B = fspecial('disk',9);
Real = filter2(B,cos(dif),'same'); Imag = filter2(B,sin(dif),'same');
fasefil = atan2(Imag, Real); % fase filtrada, solo para visualizar
figure (6); imagesc(fasefil); colormap gray; axis off;

%%%%%%%% Lectura de diferencia de fase %%%%%%%%%%
%load reflyNaCl086-2;
% load NaCl086-2yNaCl172-2;
% load NaCl172-1yNaCl258-1;
% load NaCl258-2yNaCl344-2;
% load NaCl344-2yNaCl430-2;
% load NaCl430-2yNaCl516-2;
%%
% figure; imagesc(fasefil); colormap gray; axis off;
fasefil=B1-pi;
figure (11); imagesc(fasefil); colormap gray;
%%%%%%%% Selección de inicio y final de linea %%%%%%%%%%
iniciodelinea=120; %colocamos el inicio de linea
findelinea=625; %colocamos el final de linea

%%%%%%%% Valores de inicio %%%%%%%%%%
ck=515; %simulado % pixel del centro
%ck=525; % real
res1=1024-ck; res2=ck-res1; dim=(1024-res2)+1; % Resto de pixeles
nagua=1.3330; % índice de refracción del agua destilada
r=1.5e-3; % radio interno del tubo
lamda=543e-9; % longitud de onda del láser utilizado
xr=-r+[0:dim-1]*(2*r/(dim-1)); % Base del vector a utilizar
circuferencia=[]; tindice=[]; % valores de salida
%Estáticas 2015

%%%%%%%% calculo de aproximación %%%%%%%%%%
for linea=iniciodelinea:findelinea % Selecciona la línea

```

```

errorparcial=100000;
indice=1.3383;
%la función con ruido extraida
fncruido=fasefil(ck-floor(dim/2):ck+floor(dim/2),linea);
fncaprox=zeros(size(dim)); %inicializa a ceros la fncaprox

%%%%% creación la elipse %%%%%%%%%%%
for co=0:1800 % incrementa la curva de aproximación
    nparcial2=(indice+.000000051*co)-0.0003
    nparcial=indice+.000000051*co;
    Dn=nparcial-nagua;
    Dphaser=(4*pi*Dn/lamda)*sqrt(r*r-xr.*xr); % cración del semicirculo

%%%%% Calculo de la diferencia de fase %%%%%%%%%%%
n2p=floor(max(Dphaser)/(2*pi));
for k=0:n2p+1
    f=find( (Dphaser>=((k)*2*pi)) & (Dphaser<=((k+1)*2*pi)) );
    fncaprox(f)=Dphaser(f)-(k)*2*pi;
    pause(0.000001)
end
fncaprox=fncaprox-pi; % baja la función "pi" para visualizar

%%%%%%%%%% minimos cuadrados %%%%%%%%%%%
fncruidorec=(fncruido(100:dim-100))'; % función con ruido recortada
%funciones senos y coseno de la función dada
fncruidoreccos=cos(fncruidorec); fncruidorecsen=sin(fncruidorec);
fncaproxrec=fncaprox(100:dim-100); % función a aproximar recortada
%funciones seno y coseno de la funcion aproximada
fncaproxreccos=cos(fncaproxrec); fncaproxrecsen=sin(fncaproxrec);
% calculo del error minimo en funciones coseno
cc2=sum((fncruidoreccos-fncaproxreccos).^2);
% calculo del error minimo en funciones suma
cs2=sum((fncruidorecsen-fncaproxrecsen).^2);
error=cc2+cs2; %suma de errores.

% compara la diferencia con un valor muy grande inicial de cada linea y
% verifica el error
if(error<errorparcial)
    errorparcial=error;
    indice=nparcial;
    fncaproxfinal=fncaprox;
    Dphaserfinal=Dphaser;
figure (1);plot(1:length(fncruido),fncruido,'r', ...
    1:length(fncaprox),fncaprox,'g', ...

```



```

        1:length(fncaproxfinal),fncaproxfinal,'b');
name=['Linea: ', int2str(linea)]; ...
name2=['Índice de refracción:',num2str(indice-0.000265,'%e')];
title(name);xlabel(name2);
pause(0.000001);
end

figure (1);plot(1:length(fncruido),fncruido,'.r', ...
    1:length(fncaprox),fncaprox,'g', ...
    1:length(fncaproxfinal),fncaproxfinal,'b','LineWidth',1.5);
title(name);xlabel(name2);
pause(0.000001);
end
%cirenvuelta=[cirenvuelta;fncaproxfinal];
circuferencia=[circuferencia;Dphaserfinal];
tindice=[tindice;indice];
end

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Filtrado del mapa de fase evuelto %%%%%%%%%%%%%%%
B = fspecial('disk',9);
Real = filter2(B,cos(dif),'same'); Imag = filter2(B,sin(dif),'same');
fasefil = atan2(Imag, Real); % fase filtrada, solo para visualizar
figure (6); imagesc(fasefil); colormap gray, axis off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Generación del objeto de fase %%%%%%%%%%%%%%%
IM=Real+(Imag*1j);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Desenvolvimiento del mapa de fase envuelto %%%%%%%%%%%%%%%
[recortefase]=GoldsteinUnwrap2D_r1(IM);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Normalización de la fase desenvuelta %%%%%%%%%%%%%%%
mni=abs(min(min(recortefase)));
desenvueltanor=recortefase+mni;
figure (9); mesh(desenvueltanor);

desenvueltanoractual=desenvueltanor;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% fase de referencia %%%%%%%%%%%%%%%
load reflyNaCl086-2; desenrefynacl0861=desenvueltanor;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Diferencia de fase entre sustancias %%%%%%%%%%%%%%%
%load desenNacl086yNacl171#13122013; desenNacl086yNacl171=desenvueltanor;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Colocación de variables %%%%%%%%%%%%%%%
Nnacl=1.3339; % Suatancia con 0.086 mols
Nad=1.3330; % Indice de refraccion del agua destilada

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo de diferencias de índice de refracción %%%%%%%%%%%%%%%
ni=((Nnacl-Nad).*(desenvueltanoractual))./desenrefynacl0861);
ni=ni-Nad;
figure(10);mesh(ni);

%sumadefases= desenrefynacl0861+desenNacl086yNacl171; % Suma de fase total
% Cálculo del valor del índice de refracción de la sustancia de 172 mols %
%ni=((Nnacl-Nad).*(sumadefases))./desenrefynacl0861)+Nad;
%figure(10);mesh(ni);

```

Apéndice D: Código de Matlab para medir los valores de temperatura.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Medición de evolución de temperatura en líquidos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all, clear all; warning OFF;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Datos de Filtrado %%%%%%%%%
y1=32; y2=1018; x1=1016; x2=1375; iniciodefor=2; nI=1460;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Lectura de primer holograma %%%%%%%%%
name = ['foto_',num2str(1,'%04i'),' .tif'];
eval(['I' num2str(1) '= imread(name);'])
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Filtrado en el espectro de Fourier %%%%%%%%%
fh1=fftshift(fft2(I1)); clear name;
f1x=zeros(size(I1)); clear I1;
rec1=fh1(y1:y2,x1:x2); f1x(y1:y2,x1:x2)=rec1;
ifx1=ifft2(f1x); R1=real(ifx1); I1=imag(ifx1); phase1=atan2(I1,R1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Vector de temperatureas %%%%%%%%%
reg=3; %número de regiones
faspixvr(reg,nI)=0; vdesen=faspixvr; vtemp=faspixvr; vtempo=faspixvr;
T0=22.0; %Temperatura inicial
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Lectura y Comparación de hologramas %%%%%%%%%
for ii = iniciodefor:nI; disp(ii-1)
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Lectura de hologramas %%%%%%%%%
    name = ['foto_',num2str(ii,'%04i'),' .tif']; eval(['I2' '= imread(name);'])
    fh2=fftshift(fft2(I2)); clear I2 name;
    f2x=zeros(size(phase1));
    rec2=fh2(y1:y2,x1:x2); f2x(y1:y2,x1:x2)=rec2; ifx2=ifft2(f2x);
    clear fh2 rec2
    R2=real(ifx2); I2=imag(ifx2); phase2=atan2(I2,R2);
    clear ifx2 f2x R2 I2

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Comparación de diferencias de fase %%%%%%%%%
    if (phase2-phase1)<-pi;
        dif=phase2-phase1+2*pi;
    elseif (phase2-phase1)>=pi;
        dif=phase2-phase1-2*pi;
    else
        dif=phase2-phase1;
    end
    clear phase2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Filtrado de mapa de diferencia de fase %%%%%%%%%

```

```

    B=fspecial('disk',1); Real=filter2(B,cos(dif),'same');
    Imag=filter2(B,sin(dif),'same'); clear B dif;
    fasefil = atan2(Imag, Real);
    figure (4); imagesc(fasefil); colormap winter;
    c = colorbar; c.Label.String = 'Temperature change'; ylabel('Pixels');
    xlabel({'Pixles','(a)'});

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Región 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    py=280; px=500; text(px,py,'X','Color','r','FontWeight','Bold','FontSize',16);
    text(px-110,py,'p1','FontWeight','Bold','FontSize',16); drawnow;
    faspixvr(1,ii)=fasefil(py,px);
    vdesen(1,:)=unwrap(faspixvr(1,:));
    vtemp(1,ii)=round(T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*vdesen(1,ii))/-0.0001,1);
    vtempo(1,ii)=T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*vdesen(1,ii))/0.0001;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Región 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    py=840; px=705; text(px,py,'X','Color','r','FontWeight','Bold','FontSize',16);
    text(px-110,py,'p2','FontWeight','Bold','FontSize',16); drawnow;
    faspixvr(2,ii)=fasefil(py,px);
    vdesen(2,:)=unwrap(faspixvr(2,:));
    vtemp(2,ii)=round(T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*vdesen(2,ii))/0.0001,1);
    vtempo(2,ii)=T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*vdesen(2,ii))/0.0001;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Región 3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    py=470; px=920; text(px,py,'X','Color','r','FontWeight','Bold','FontSize',16);
    text(px-110,py,'p3','FontWeight','Bold','FontSize',16); drawnow;
    faspixvr(3,ii)=fasefil(py,px);
    vdesen(3,:)=unwrap(faspixvr(3,:));
    vtemp(3,ii)=round(T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*vdesen(3,ii))/0.0001,1);
    vtempo(3,ii)=T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*vdesen(3,ii))/0.0001;
    vtempo(:,ii) %Muestra los datos de temperaturus
end
clear y1 y2 x1 x2 phase1;
faspixvr1=faspixvr(1,:); vtemp1=vtemp(1,:);
faspixvr2=faspixvr(2,:); vtemp2=vtemp(2,:);
faspixvr3=faspixvr(3,:); vtemp3=vtemp(3,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Despliegue de variación de fase envuelta %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
xrange=linspace(0,108.15,nI);
figure (1); plot(xrange,faspixvr1,'DisplayName','p1');hold on;
plot(xrange,faspixvr2,'DisplayName','p2');
plot(xrange,faspixvr3,'DisplayName','p3');
ax = gca;
ax.YTick = [-3*pi,-2*pi,-pi,0,pi,2*pi,3*pi];

```

```

ax.YTickLabel = {'-3\pi', '-2\pi', '-\pi', '0', '\pi', '2\pi', '3\pi'};
xlabel('Time (seg)')
ylabel('Unwrapped phase difference (radian)')
axis([1 109 -pi-.5 pi+.5]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Visualización de temperaturas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
windowSize = 250;
b = (1/windowSize)*ones(1,windowSize);
a = 1;
%load temperaturas
xrange2=linspace(1,108.15,nI);
y1 = filter(b,a,vdesen(1,:)); y2 = filter(b,a,vdesen(2,:));
y3 = filter(b,a,vdesen(3,:));
vtempof(1,:)=(T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*y1)/0.0001)-.1;
vtempof(2,:)=(T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*y2)/0.0001)-.12;
vtempof(3,:)=T0+((0.0005435)/((2*pi)*10)*y3)/0.0001;

figure (54);
plot(xrange2,vtempo(1,:),xrange2,vtempo(2,:),xrange2,vtempo(3,:) ...
     ,xrange2,vtempof(2,:));
axis([2 109 vtempo(1,nI)-.5 T0+.5]);
grid on; xlabel('Time (seg)'); ylabel('Temperature (°C)');

```

Apéndice E: Artículo de mediciones del IR

Author's Proof

Chapter 17 Index of Refraction Measurements in Liquid Substances of Full Field Using Holographic Interferometry

C.A. Guerrero, T. Saucedo, M.A. Araiza, E. De la Rosa, and C. Olvera

Abstract We present a novel method based on Digital Holographic Interferometry to detect slight physical variations of refractive index with high sensitivity in liquid substances. The technique is grounded in the measurement of a phase difference between two reconstructed wavefields. The optical system was tested using a series of sodium chloride (NaCl) solutions to detect a variation in its physical property such as concentration. A first hologram records a wavefront coming from the light scattered by a common cylindrical glass container filled with certain NaCl solution. Later, a second hologram is recorded when the solution mentioned above slightly changes its concentration. The difference between the phase maps obtained from the correlation from the two holograms will provide information about a refractive index variation, which is directly related to a concentration change. The achieved results have proven to be more accurate and faster to get than with other techniques. The process requires just a few special optical elements and is able to measure the three-dimensional distribution of the refractive index of a sample. This method can be extended to identify adulteration in liquids, measure the variation in refractive index in gaseous flames, apart from analyzing and visualizing the mechanical properties of a liquid sample.

Keywords Digital holographic interferometry • Phase measurement • Refractive index • Phase difference • Non-destructive methods

17.1 Introduction

Physical properties of liquids such as concentration, weight, color and others are important parameters that can be used as an identification tool or "fingerprint" of some solutions [1, 2]. Likewise analysis of the variations of one or more of such parameters is important to some areas of science. For example, in medicine, the study of certain physiological fluids (like urine) is an important aspect that may indicate the state of health of the body [3]. Generally speaking, detailed analysis of any variations in parameters in a medical solution can mark the difference for a suitable treatment of a disease when necessary [4]. On the other hand, adulteration problems in many commercial substances have increased in the last days, and we require reliable and simple techniques to detect changes of the liquid properties that can help controlling adulteration of liquids [5].

Optical techniques are able to detect changes in concentration of liquid solutions through measurements of the unique optical parameter of a medium called refractive index [6, 7]. The typical optical technique to determine a refractive index utilizes the displacement of the angle of a beam refracted by a sample, and these methods use a prism [8–11], square [12, 13] and special containers [14]. Additionally, these methods are easy to implement and understand, and require few optical elements. However the refracted angle is difficult to measure, and ultimately you can only make a good estimation of the measured angle, which decreases the accuracy of measurements and we can only get the refractive index in the illuminated region [15].

Advanced optical techniques of full-field, non-destructive, non-contact, non-invasive, with a metrology potential to detect a variety of physical parameters variation in fluids with high resolution and stability have been developed [16–18]. These are called Schlieren, Shadowgraph, Interferometry techniques, from which come the DHI [19].

C.A. Guerrero (✉) • M.A. Araiza • E. De la Rosa • C. Olvera
Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Av. Ramón López Velarde #801, Zacatecas C.P. 98000, Mexico
e-mail: capacti@gmail.com

T. Saucedo
Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas, Calzada Solidaridad Esq. Con Paseo La Bufa S/N,
Zacatecas C.P. 98060, Mexico

© Springer International Publishing Switzerland 2016
A. Martínez-García et al. (eds.), *Fifth International Symposium on Experimental Mechanics & Ninth Symposium on Optics in Industry (ISEM-SOI 2015)*, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, DOI 10.1007/978-3-319-28513-9_17

Apéndice F: Artículo en la revista Metrology and Measurement Systems (MMS)

Metrol. Meas. Syst., Vol. ... (201.), No., pp. 1–9.



METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS

Index 330930, ISSN 0860-8229
www.metrology.pg.gda.pl



MEASUREMENTS OF CONCENTRATION DIFFERENCES BETWEEN LIQUID MIXTURES USING DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

Carlos Guerrero-Méndez¹, Tonatiuh Saucedo A.², M. Araiza-Esquivel¹, Raúl E. Balderas-Navarro³, Alfonso López-Martínez¹, Carlos Olivera-Olivera¹

¹) Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde #801, C.P. 98000, Zacatecas, México (✉ capaciti@gmail.com, arai zamias@yahoo.com, alopez2601@hotmail.com, oliveraca@gmail.com, +52 492 92 29699)

²) Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas, Calzada Solidaridad Esq. Con Paseo La Bufa S/N, C.P. 98060, Zacatecas, México (tsaucedo@fisica.uaz.edu.mx)

³) Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO-UASLP), Av. Karakorom 1470, Lomas 4ta. Sección, C.P. 78210, San Luis Potosí, México (raul.balderas@gmail.com)

Abstract

We present an alternative method to detect and measure the concentration changes in liquid solutions based on refractive index variations using Digital Holographic Interferometry (DHI). First, a hologram is recorded when a wavefront from light comes across a common cylindrical glass container filled with a certain liquid solution. A second hologram is recorded after the concentration changes slightly. Differences in phase obtained from the correlation of the first hologram with the second one provide information about the refractive index variation, which is directly related to the changes in physical properties related to the concentration. This method can be used to detect adulterations or to measure of a slight concentration variation on the order of 0.001 moles which is equivalent to a difference of 0.003 g of sodium chloride in solutions with high sensitivity, accuracy, and speed. This method also allows the phase difference among each pixel of two samples to be measured and calculated. This makes it possible to generate a global measurement of the phase difference of the entire sensed region.

Keywords: Digital Holographic Interferometry, refractive index measurements, phase difference, full-field measurements.

© 201X Polish Academy of Sciences. All rights reserved

1. Introduction

Liquid mixtures can be classified based on their physical properties such as concentration, weight, color, and boiling temperature, among others [1]. The concentration of a liquid solution refers to the amount of solute (in moles or mass) dissolved in a certain quantity of solvent [2]. Methods and tools for accurate measurements that can detect slight concentration variations are greatly important for science, regulatory agencies, food processors, and consumers. Expensive liquids have potential for adulteration, including olive oil, fruit juices, honey, alcoholic drinks, and gasoline. For this reason, a fast and accurate technique is required to validate the concentrations of products or liquid mixtures. Optical techniques are non-destructive and are generally preferred for this purpose.

The index of refraction is one of the most important optical properties of an object [3]. In liquid solutions, this parameter is unique and proportional to the concentration of a substance [4]. Commonly, the refractive index is determined using Snell's law, which involves the displacement of the angle of an incident beam with respect to a refracted beam by a phase object. Some methods based on this law use prisms [5-8], squares [9,10], and special containers [11]. However, these methods, require a good estimation of the angles, which reduces their accuracy. Other disadvantages are that they only use a small region (only a point) to obtain the

Article history: received on, ...; received in revised form on, ...; accepted on, ...; available online on

MMS-00180-2015-03



Authors:

Carlos Guerrero, Tonatiuh Saucedo, Ma. Araiza, Raúl Balderas, Alfonso López, Carlos Olvera

Decision letter:

August 28, 2016

MMS-00180-2015-03

MEASUREMENTS OF CONCENTRATION DIFFERENCES BETWEEN LIQUID MIXTURES USING DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

Dear Dr Carlos Guerrero,

I am pleased to inform you that your manuscript, entitled: MEASUREMENTS OF CONCENTRATION DIFFERENCES BETWEEN LIQUID MIXTURES USING DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY, has been finally accepted for publication in our journal, the issue 1/2017.

Thank you for submitting your work to us.

Kindest regards,
Janusz Smulko
Editor-in-Chief
Metrology and Measurement Systems

Apéndice G: Artículo en la revista *Optical Engineering (OE)*

Real-time measurement of temperature profiles during the cooling process of liquids using digital holographic interferometry.

Carlos Guerrero-Mendez^{a,b,*}, Tonatiuh Saucedo Anaya^b, M. Araiza-Esquivel^a, Raúl E. Balderas-Navarro^c, Alfonso López-Martínez^d, Carlos Olvera-Olvera^b

^aUniversidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Av. Ramón López Velarde 801, Zacatecas, México, C.P. 98000.

^bUniversidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Física, Calzada Solidaridad Esq. Con Paseo La Bufa S/N, Zacatecas, México, C.P. 98060.

^cInstituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO-UASLP), Av. Karakorom 1470, Lomas 4ta. Sección, San Luis Potosí, México, C.P. 78210.

Abstract. We present an alternative optical method to monitor the temperature profiles during the cooling process of a liquid sample using Digital Holographic Interferometry (DHI). This is accomplished, based on phase variations which are linked to variations in the refractive index and the temperature property of a liquid. In DHI, first, a hologram is recorded by using an object beam scattered from a rectangular container with a liquid at a certain temperature. A second hologram is recorded when the temperature decreases slightly. A phase difference between two holograms indicates a temperature variation and is possible to obtain the temperature value in each small point of the sensed optical field. The relative phase map between the two object states is obtained simply and quickly via the Fourier-transform method. Experimental results of this work reveal that the temperature values measured by this method and those obtained with a thermometer have an excellent congruence, and it is shown that it is possible to analyse variations between temperature profiles in dynamic events.

Keywords: digital holographic interferometry, refractive index difference, liquids temperature, phase difference.

*Carlos Guerrero-Mendez, capacti@gmail.com

1 Introduction

Thermal conditions of liquid samples are of interest for many areas of science, and determining the temperature in liquid substances is very important in engineering applications, such as the design of air-conditioning, heat transfer equipment, machines and industrial processes, or in the beginning to design a thermal energy storage system.¹ Commonly, temperature values of substances are determined using devices which need to be in contact with the specimen, but they affect the dynamic evolution or the mechanical properties of the fields of temperature in a substance. By contrast, common optical techniques are non-invasive, non-contact, non-destructive that they have been developed for this purpose which use the thermo-optical effect,² which is thermal modulation

Referencias

- [1] J. M. Coulson, J. F. Richardson, F. M. Vázquez y J. R. Backhurst. *Ingeniería química*. Reverté, (1979).
- [2] D. M. Himmelblau. *Principios básicos y cálculos en ingeniería química*. Pearson Educación, (1997).
- [3] S. Burbano y C. Gracia. *Física general*. Tébar, (2003).
- [4] V. C. Olguín. *Física: principios con aplicaciones*. Pearson Educación, (2006).
- [5] E. Hecht. *Optics*. Addison-Wesley, (2002).
- [6] D. Gabor. “A new microscopic principle”. *Nature*, **V161** N4098, pp. 777–778 (1948).
- [7] D. Gabor. “Holography, 1948-1971”. *Science*, **V177** N4046, pp. 299-313 (1972).
- [8] D. Gabor. “Microscopy by reconstructed wave-fronts”. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **V197** N1051, pp. 454–487 (1949).
- [9] D. Gabor. “Microscopy by reconstructed wave fronts: **II**”. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, **V64** N6, pp. 449–469 (1951).
- [10] W. E. Kock. “Nobel prize for physics: Gabor and holography”. *Science*, **V174** N1, pp. 674–975 (1971).
- [11] B. Lengyel. *Lasers*. John Wiley & Sons, (1962).
- [12] E. Leith y J. Upatnieks. “Reconstructed wavefronts and communication theory”. *JOSA*, **V52** N10, pp. 1123-1128 (1962).
- [13] E. Leith y J. Upatnieks. “Wavefront reconstruction with continuous-tone objects”. *JOSA*, **V53** N12, pp. 1377–1381 (1963).
- [14] E. Leith y J. Upatnieks. “Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects”. *JOSA*, **V54** N1, pp. 1295–1301 (1964).
- [15] H. J. Caulfield. *Handbook of optical holography*. Elsevier, (2012).

- [16] Y. Denisyuk. “Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field”. *Soviet Physics Doklady*, **V7** N1, pp. 543–550 (1962).
- [17] Y. Denisyuk. “On the reproduction of the optical properties of an object by the wave field of its scattered radiation”. *Opt. Spectroscopy*, **V15** N1, pp. 279–284 (1963).
- [18] Y. Denisyuk. “On the reproduction of the optical properties of an object by the wave field of its scattered radiation. II”. *Opt. Spectroscopy*, **V18** N1, pp. 153–160 (1965).
- [19] R. L. Powell y K. Stetson. “Hologram interferometry”. *JOSA*, **V56** N9, pp. 1161–1163 (1966).
- [20] C. M. Vest. *Holographic Interferometry*. John Wiley & Sons, (1979).
- [21] J. D. Hovanesian, V. Brcic y R. L. Powell. “A new experimental stress-optic method: Stress-holo-interferometry”. *Experimental Mechanics*, **V8** N8, pp. 362–358 (1968).
- [22] W. Schumann y M. Dubas. *Holographic Interferometry: From the Scope of Deformation Analysis of Opaque Bodies*. Springer Series in Optical Sciences. (2013).
- [23] R. Pryputniewicz y K. A. Stetson. “Measurement of vibration patterns using electro-optic holography”. *33rd Annual Technical Symposium*, **V1** N1, pp. 456–467 (1990).
- [24] T. Kreis. *Handbook of Holographic Interferometry*. John Wiley & Sons, (2005).
- [25] J. A. Leendertz. “Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect”. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **V3** N3, pp. 214–218 (1970).
- [26] K. Haines y B. P. Hildebrand. “Contour generation by wavefront reconstruction”. *Physics Letters*, **V19** N1, pp. 10–11 (1965).
- [27] J. S. Zelenka y J. R. Varner. “A new method for generating depth contours holographically”. *Applied Optics*, **V7** N10, pp. 2107–2110 (1968).
- [28] T. D. Dudderar y J. A. Gilbert. “Real-time holographic interferometry through fibre optics”. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **V18** N1, pp. 39–43 (1985).
- [29] A. V. Lugt. “Signal detection by complex spatial filtering”. *Information Theory, IEEE Transactions on*, **V10** N2, pp. 139–145 (1964).
- [30] G. W. Stroke. “Lensless fourier-transform method for optical holography”. *Applied Physics Letters*, **V6** N10, pp. 201–203 (1965).
- [31] C. Knox y R. E. Brooks. “Holographic motion picture microscopy”. *Underwater Photo-Optical Instrumentation Applications*, **V1** N1, pp. 39–48 (1971).
- [32] J. N. Shurkin. *Engines of the Mind: The Evolution of the Computer from Mainframes to Microprocessors*. Norton, (1996).

- [33] B. R. Brown, y A. W. Lohmann. “Complex spatial filtering with binary masks”. *Applied Optics*, **V5** N6, pp. 967–969 (1966).
- [34] A. W. Lohmann y D. P. Paris. “Binary fraunhofer holograms, generated by computer”. *Applied Optics*, **V6** N10, pp. 1739–1748 (1967).
- [35] B. R. Brown y A. W. Lohmann. “Computer-generated binary holograms”. *IBM Journal of research and Development*, **V13** N2, pp. 160–168 (1969).
- [36] J. W. Goodman y R. W. Lawrence. “Digital image formation from electronically detected holograms”. *Applied Physics Letters*, **V11** N3, pp. 77–79 (1967).
- [37] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov y L. P. Yaroslavskii. “Reconstruction of a hologram with a computer”. *Soviet Physics Technical Physics*, **V17** N1, pp. 333–337 (1972).
- [38] U. Schnars y W. Jüptner. “Direct recording of holograms by a ccd target and numerical reconstruction”. *Applied Optics*, **V33** N2, pp. 179–181 (1994).
- [39] L. Onural y P. D. Scott. “Digital decoding of in-line holograms”. *Optical Engineering*, **V26** N11, pp. 261124–261124 (1987).
- [40] W. S. Haddad, D. Cullen, J. C. Solem, J. W. Longworth, A. McPherson, K. Boyer y C. K. Rhodes. “Fourier-transform holographic microscope”. *Applied Optics*, **V31** N24, pp. 4973–4978 (1992).
- [41] M. Takeda, H. Ina y S. Kobayashi. “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry”. *JOSA*, **V72** N1, pp. 156–160 (1982).
- [42] T. Kreis. “Digital holographic interference-phase measurement using the fourier-transform method”. *JOSA*, **V3** N6, pp. 847–855 (1986).
- [43] U. Schnars y W. Jüptner. “Principles of direct holography for interferometry”. *Proceedings of 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*, **V1** N1, pp. 115–120 (1993).
- [44] U. Schnars. “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms”. *JOSA*, **V11** N7, pp. 2011–2015 (1994).
- [45] U. Schnars. *Digitale Aufzeichnung und mathematische Rekonstruktion von Hologrammen*. VDI-Verl. Dusseldorf, (1994).
- [46] G. Pedrini, Y. L. Zou y H. J. Tiziani. “Digital double-pulsed holographic interferometry for vibration analysis”. *Journal of Modern Optics*, **V42** N2, pp. 367–374 (1995).
- [47] H. Tiziani y G. Pedrini. “Digital double-pulse holographic interferometry for vibration analysis”. *Shock and Vibration*, **V3** N2, pp. 117–125 (1996).

- [48] G. Pedrini, Y. Zou y H. Tiziani. “Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method”. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, **V5** N3, pp. 313–321 (1996).
- [49] G. Pedrini, H. Tiziani y Y. Zou. “Digital double pulse-tv-holography”. *Optics and lasers in Engineering*, **V26** N2, pp. 199–219 (1997).
- [50] G. Pedrini, P. Fröning, H. Fessler y H. Tiziani. “In-line digital holographic interferometry”. *Applied Optics*, **V37** N26, pp. 6262–6269 (1998).
- [51] G. Pedrini, S. Schedin y H. Tiziani. “Lensless digital-holographic interferometry for the measurement of large objects”. *Optics Communications*, **V171** N1, pp. 29–36 (1999).
- [52] G. Pedrini, W. Osten y M. E. Gusev. “High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement”. *Applied Optics*, **V45** N15, pp. 3456–3462 (2006).
- [53] G. Pedrini, I. Alexeenko, W. Osten y U. Schnars. “On-line surveillance of a dynamic process by a moving system based on pulsed digital holographic interferometry”. *Applied Optics*, **V45** N8, pp. 935–943 (2006).
- [54] J. Trolinger. “The holography of phase objects”. *31st Annual Technical Symposium*, **V1** N1, pp. 128–139 (1987).
- [55] P. Hariharan. *Optical holography: principles, techniques and applications*. Cambridge University Press, (1996).
- [56] V. Kebbel, B. Grubert, H-J. Hartmann, W. Jüptner y U. Schnars. “Application of digital holography to space-borne fluid science measurements”. *IAF, International Astronautical Congress, 49 th, Melbourne, Australia*, **V1** N1, pp. 214–250 (1998).
- [57] D. W. Sweeney y C. M. Vest. “Measurement of three-dimensional temperature fields above heated surfaces by holographic interferometry”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **V17** N12, pp. 1443–1454 (1974).
- [58] R. Goldstein. *Fluid Mechanics Measurements, Second Edition*. Taylor & Francis, (1996).
- [59] B. W. Grange, W. H. Stevenson y R. Viskanta. “Refractive index of liquid solutions at low temperatures: an accurate measurement”. *Applied Optics*, **V15** N4, pp. 585–859 (1976).
- [60] B. P. Chandra y S. C. Bhaiya. “A simple, accurate alternative to the minimum deviation method of determining the refractive index of liquids”. *American Journal of Physics*, **V51** N2, pp. 160–161 (1983).
- [61] M. D. Edmiston. “Measuring refractive indices”. *The Physics Teacher*, **V24** N3, pp. 160–163 (1986).

- [62] M. R. Shenoy, S. Roy y K. Thyagarajan. “Simple prism coupling technique to measure the refractive index of a liquid and its variation with temperature”. *Review of Scientific Instruments*, **V61** N3, pp. 1010-1013 (1990).
- [63] F. Docchio, S. Corini, M. Perini y R. S. Gasana. “A simple and reliable system for measuring the refractive index of liquids using a position-sensitive detector”. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, **V44** N1, pp. 68–70 (1995).
- [64] J. P. L C-H. Fan. “Precision laser-based concentration and refractive index measurement of liquids”. *Microscale Thermophysical Engineering*, **V2** N4, pp. 261–272 (1998).
- [65] S. Nemoto. “Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement”. *Applied Optics*, **V31** N31, pp. 6690–6694 (1992).
- [66] E. Moreels, C. De Greef y R. Finsy. “Laser light refractometer”. *Applied Optics*, **V23** N17, pp. 3010–3013 (1984).
- [67] L. W. Tilton y J. K. Taylor. “Refractive index and dispersion of distilled water for visible radiation, at temperatures 0 to 60 C”. *J. Res. Natl. Bur. Stand*, **V20** N1, pp. 419–477 (1938).
- [68] I. Thormählen, J. Straub y U. Grigull. “Refractive index of water and its dependence on wavelength, temperature, and density”. *Journal of physical and chemical reference data*, **V14** N4, pp. 932–945 (1985).
- [69] G. R. Toker. *Holographic Interferometry: A Mach–Zehnder Approach*. Taylor & Francis, (2012).
- [70] L. Gabelmann-Gray y H. Fenichel. “Holographic interferometric study of liquid diffusion”. *Applied Optics*, **V18** N3, pp. 343–345 (1979).
- [71] C. Zhao, J. Li y P. Ma. “Diffusion studies in liquids by holographic interferometry”. *Optics & Laser Technology*, **V38** N8, pp. 658–662 (2006).
- [72] A. Anand, V. K. Chhaniwal y C. S. Narayanamurthy. “Diffusivity studies of transparent liquid solutions by use of digital holographic interferometry”. *Applied Optics*, **V45** N5, pp. 904–909 (2006).
- [73] J. Colombani y J. Bert. “Holographic interferometry for the study of liquids”. *Journal of Molecular Liquids*, **V134** N1, pp. 8–14 (2007).
- [74] J. Colombani y J. Bert. “Holographic interferometry for the study of liquids ii”. *Journal of Molecular Liquids*, **V13** N12, pp. 101–115 (2009).
- [75] M. Hossain, D. S. Mehta y C. Shakher. “Refractive index determination: an application of lensless fourier digital holography”. *Optical Engineering*, **V45** N10, pp. 106203–106203 (2006).

- [76] Y. Zhang, J. Zhao, J. Di, H. Jiang, Q. Wang, J. Wang, Y. Guo y D. Yin. “Real-time monitoring of the solution concentration variation during the crystallization process of protein-lysozyme by using digital holographic interferometry”. *Optics Express*, **V20** N16, pp. 18415–18421 (2012).
- [77] J. Zhao, Y. Zhang, H. Jiang y J. Di. “Dynamic measurement for the solution concentration variation using digital holographic interferometry and discussion for the measuring accuracy”. *International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013)*, **V1** N1, pp. 87690D-1–87690D-8 (2013).
- [78] J. Colombani y J. Bert. “Holographic interferometry study of the dissolution and diffusion of gypsum in water”. *Geochimica et cosmochimica acta*, **V71** N8, pp. 1913–1923 (2007).
- [79] D. C. Yin, Y. Inatomi, H. M. Luo, H. S. Li, H. M. Lu, Y. J. Ye y N. I. Wakayama. “Interferometry measurement of protein concentration evolution during crystallization and dissolution with improved reliability and versatility”. *Measurement Science and Technology*, **V19** N4, pp. 045303–04541 (2008).
- [80] A. Anand, V. K. Chhaniwal y B. Javidi. “Imaging embryonic stem cell dynamics using quantitative 3-d digital holographic microscopy”. *Photonics Journal*, **V3** N3, pp. 546–554 (2011).
- [81] W. S. Haddad, D. Cullen, J. C. Solem, J. W. Longworth, L. A. McPherson, K. Boyer y C. K. Rhodes. “Fourier-transform holographic microscope”. *Electronic Imaging’91, San Jose, CA*, **V1** N1, pp. 81-88 (1991).
- [82] D. Dirksen, H. Droste, B. Kemper, H. Delere, M. Deiwick, H. H. Scheld y G. Von Bally”. “Lensless fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples. *Optics and Lasers in Engineering*, **V36** N3, pp. 241–249 (2001).
- [83] G. Sheoran, A. Anand y C. Shakher. “Lensless fourier transform digital holographic interferometer for diffusivity measurement of miscible transparent liquids”. *Review of scientific instruments*, **V80** N5, pp. 063106–063106 (2009).
- [84] M. He, Y. Guo, Q. Zhong y Y. Zhang. “A new method of processing mach–zehnder interference fringe data in determination of diffusion coefficient”. *International Journal of Thermophysics*, **V30** N6, pp. 1823–1837 (2009).
- [85] W. Sun, J. Zhao, J. Di, Q. Wang y L. Wang. “Real-time visualization of karman vortex street in water flow field by using digital holography”. *Optics Express*, **V17** N22, pp. 20342–20348 (2009).
- [86] J. Di, B. Wu, X. Chen, J. Liu, J. Wang y J. Zhao. “Real-time visualization and analysis of airflow field by use of digital holography”. *SPIE Optical Metrology 2013*, **V1** N1, pp. 878827–878827 (2013).

- [87] A. Ahadi, A. Khoshnevis y M. Z. Saghir. “Windowed fourier transform as an essential digital interferometry tool to study coupled heat and mass transfer”. *Optics & Laser Technology*, **V57** N1, pp. 304–317 (2014).
- [88] J. Wang, J. Zhao, J. Di, A. Rauf y J. Hao. “Dynamically measuring unstable reaction–diffusion process by using digital holographic interferometry”. *Optics and Lasers in Engineering*, **V57** N1, pp. 1–5 (2014).
- [89] J. Zhao y J. Di. “Electronic imaging & signal processing dynamic visualization of complex flow fields using digital holographic interferometry”. *Spie Newsroom*, **V1** N1, pp. 10.1117/2.1201507.006052/1–10.1117/2.1201507.006052/3 (2015).
- [90] A. Mialdun y V. Shevtsova. “Measurement of the solet and diffusion coefficients for benchmark binary mixtures by means of digital interferometry”. *The Journal of chemical physics*, **V134** N4, pp. 044524–044532 (2011).
- [91] M. G. He, S. Zhang, Y. Zhang y S. G. Peng. “Development of measuring diffusion coefficients by digital holographic interferometry in transparent liquid mixtures”. *Optics Express*, **V23** N9, pp. 10884–10899 (2015).
- [92] C. Shakher, M. Hossain, D. S. Mehta y G. Sheoran. “Measurement of temperature field in steady laminar free convection flow using digital holography”. *Ninth International Symposium on Laser Metrology*, **V1** N1, pp. 71551X-1–71551X-9 (2008).
- [93] Md. Mosarraf y C. Shakher. “Temperature measurement in laminar free convective flow using digital holography”. *Applied Optics*, **V48** N10, pp. 1869–1877 (2009).
- [94] S. Sharma, G. Sheoran y C. Shakher. “Digital holographic interferometry for measurement of temperature in axisymmetric flames”. *Applied Optics*, **V51** N16, pp. 3228–3235 (2012).
- [95] S. Sharma, G. Sheoran y C. Shakher. “Investigation of temperature and temperature profile in axi-symmetric flame of butane torch burner using digital holographic interferometry”. *Optics and Lasers in Engineering*, **V50** N10, pp. 1436–1444 (2012).
- [96] R. Doleček, P. Psota, V. Lédl, T. Vít, J. Václavík y V. Kopecký. “General temperature field measurement by digital holography”. *Applied Optics*, **V52** N1, pp. A319–A325 (2013).
- [97] R. R. Bommareddi. “Applications of optical interferometer techniques for precision measurements of changes in temperature, growth and refractive index of materials”. *Technologies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, **V2** N2, pp. 54–75 (2014).
- [98] A. Ahadi y M. Z. Saghir. “Determination of the glass wall effect in optical measurement of temperature in liquid using mach–zehnder interferometer”. *Applied Optics*, **V54** N13, pp. D74–D81 (2015).

- [99] J. Zhao, J. Di, B. Wh, J. Wang, Q. Wang y J. Hongzhen. “Visual and dynamic measurement of temperature fields by use of digital holographic interferometry”. *SPIE Optical Metrology 2013*, **V1** N1, pp. 878828-1–878828-5 (2013).
- [100] B. Wu, J. Zhao, J. Wang, J. Di, X. Chen y J. Liu. “Visual investigation on the heat dissipation process of a heat sink by using digital holographic interferometry”. *Journal of Applied Physics*, **V114** N19, pp. 193103-1–193103-6 (2013).
- [101] J. Zhu, J. Dai, X. Cheng, C. Cheng, J. Zhang y Y. Li. “Temperature measurement of a horizontal cylinder in natural convection using a lateral shearing interferometer with a large shear amount”. *Optical Engineering*, **V54** N3, pp. 034109-1–034109-8 (2015).
- [102] Q. Wang, J. Zhao, X. Jiao, J. Di y H. Jiang. “Visual and quantitative measurement of the temperature distribution of heat conduction process in glass based on digital holographic interferometry”. *Journal of Applied Physics*, **V111** N9, pp. 093111-1–093111-5 (2012).
- [103] B. G. Manukhin, M. E. Gusev, D. A. Kucher, S. A. Chivilikhin y O. V. Andreeva. “Optical diagnostics of the process of free liquid convection”. *Optics and Spectroscopy*, **V119** N3, pp. 392–397 (2015).
- [104] B. Skarman, K. Wozniak y J. Becker. “Digital in-line holography for the analysis of Bénard-convection”. *Flow Measurement and Instrumentation*, **V10** N2, pp. 91–97 (1999).
- [105] O. Dupont, J. L. Dewandel, J. C. Legros. “Use of electronic speckle pattern interferometry for temperature distribution measurements through liquids”. *Optics Letters*, **V20** N17, pp. 1824–1826 (1995).
- [106] C. Yang, Y. Fu, J. Zhao, H. Miao, C. Zhu y P. Zhang. “Dynamic measurement via laser interferometry: crystal growth monitoring and modal parameter analysis”. *International Conference on Experimental Mechanics 2014*, **V9302** N1, pp. 93021V-1-93021V-10 (2015).
- [107] L. Heflinger, R. Wuerker y R. Brooks. “Holographic interferometry”. *Journal of Applied Physics*, **V37** N2, pp. 642–649 (1966).
- [108] N. Bochner y J. Pipman. “A simple method of determining diffusion constants by holographic interferometry”. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **V9** N13, pp. 1825–1830 (1976).
- [109] U. Schnars y W. Jueptner. “Direct recording of holograms by a ccd target and numerical reconstruction”. *Applied Optics*, **V33**, N2, pp. 179–181 (1994).
- [110] C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten y W. Jüptner. “Digital recording and numerical reconstruction of lensless fourier holograms in optical metrology”. *Applied Optics*, **V38** N22, pp. 4812–4820 (1999).

- [111] M. Karray, P. Slangen y P. Picart. “Comparison between digital fresnel holography and digital image-plane holography: the role of the imaging aperture”. *Experimental Mechanics*, **V52** N9, pp. 1275–1286 (2012).
- [112] J. W. Kane, M. M. Sternheim, J. C. Vázquez y D. J. Mirabent. *Física*. Reverté, (1989).
- [113] V. Hopp. *Fundamentos de tecnología química*. Reverté, (1994).
- [114] M. Cracolice. *Basics of Introductory Chemistry with Math Review*. Cengage Learning, (2009).
- [115] D. Reger, S. Goode y D. Ball. *Chemistry: Principles and Practice*. Cengage Learning, (2009).
- [116] O. E. N. De Patentes y Marcas. *Técnicas industriales diversas: transportes*. Clasificación internacional de patentes. Oficina Española de Patentes y Marcas, (1999).
- [117] F. A. Jenkins y H. E. White. *Fundamentals of Optics*. Tata McGraw-Hill Education.
- [118] D. C. Harris, V. B. Navarro y A. B. Murcia. *Análisis químico cuantitativo*. Reverté, (2006).
- [119] G. W. D. Seese. *Química*. Pearson Educación, (2005).
- [120] B. S. Rinkevichyus, O. A. Evtikhieva y I. L. Raskovskaya. *Laser Refractography*. Springer New York, (2010).
- [121] H. M. G. Gutiérrez y R. O. Reyes. *Física*. Cengage Learning, (2010).
- [122] M. Born, E. Wolf, A. B. Bhatia, D. Gabor, A. R. Stokes, A. M. Taylor, P. A. Wayman y W. L. Wilcock. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, (2000).
- [123] P. A. Tipler y G. Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología*. Reverté, (2005).
- [124] D. Gabor. “Microscopy by reconstructed wave-fronts”. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **V197** N1051, pp. 454-487 (1949).
- [125] I. R. Salavert y M. A. F. Graciani. *Nuevas tendencias en la informática: arquitecturas paralelas y programación declarativa*. Universidad de Castilla-La Mancha, (1994).
- [126] N. Pavillon, C. Arfire, I. Bergoend y C. Depeursinge. “Iterative method for zero-order suppression in off-axis digital holography”. *Optics Express*, **V18** N15, pp. 15318–15331 (2010).
- [127] P. K. Panigrahi y M. Krishnamurthy. *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*. Springer New York, (2012).

- [128] A. H. Cromer. *Física en la ciencia y en la industria*. Reverté, (1986).
- [129] W. M. Haynes. *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press, (2014).
- [130] M. L. Abell y J. P. Braselton. *Introductory Differential Equations*. Elsevier Science, (2014).