

**DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO BASADO EN  
HOLOGRAFÍA DIGITAL PARA MEDICIÓN DE ÍNDICE DE  
REFRACCIÓN EN MEDIOS TRANSPARENTES**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO  
ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
EN INGENIERÍA ÓPTICA**

PRESENTA

**ING. BRANDON RAÚL SULVARÁN SALMORENO**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. DAVID MORENO HERNÁNDEZ**



LEÓN, GUANAJUATO, NOVIEMBRE, 2021

## **DEDICATORIA**

La presente tesis se la dedico a mi madre Sara Sulvarán Salmoreno, le dedico con todo mi corazón mi tesis, ya que, sin ella no lo habría logrado y por su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de grado se realizó gracias al Centro de Investigaciones en Óptica, bajo la dirección del Dr. David Moreno Hernández y los demás miembros del comité tutorial, el Dr. Edén Narváez y el Dr. David Monzón.

Agradezco a mi madre, por confiar, creer en mí y en mis expectativas, así como siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me han guiado durante mi vida.

Al Dr. David Moreno Hernández por apoyarme en este tiempo asesorándome para la realización de esta tesis. A mi amigo y hermano de corazón, Edwin Trejo por la ayuda y aportes al proyecto de tesis, al igual que todos los momentos pasados, así también al Ing. Ricardo Valdivia, como al M.O. Diego Torres y al M.O. Adrián Coronel por facilitarme las herramientas necesarias para los diferentes procesos del proyecto.

Para finalizar, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su beca de posgrado durante la realización de maestría y citando a Gustavo Cerati: Nada de esto hubiera se hubiera logrado sin ustedes, gracias a toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy. ¡GRACIAS... TOTALES!

## RESUMEN

Las técnicas ópticas de medición son esenciales en diagnóstico médico, control de alimentos y monitoreo ambiental, por mencionar algunos. Para realizar estas mediciones se requieren de instrumentos simples de usar, robustos, de bajo costo y que tengan una sensibilidad alta en la medición.

También es necesario que estos instrumentos tengan la capacidad para analizar muestras pequeñas. Es por eso que se ha dedicado un esfuerzo importante en el desarrollo de instrumentos que tengan estas capacidades. Entre los que podemos mencionar están: los refractómetros con arquitectura interferométrica, los que utilizan rejillas Bragg en fibra, o aquellos basados en excitación plasmónica. Sin embargo, el proceso de fabricación y los esquemas de interrogación pueden ser complejos y en algunos casos son costosos.

Recientemente, han surgido una nueva clase de refractómetros basados holografía digital en línea. Los cuales tienen una sensibilidad alta, el esquema de interrogación es simple y el costo es bajo. De esta forma, en este trabajo proponemos el desarrollo de un prototipo basado en holografía digital para medir IR en medios transparentes, como pueden ser líquidos o vidrios. La metodología consiste en el registro y reconstrucción de hologramas digitales de un disco sólido que se usa como medio para poder medir el IR. Con este prototipo es posible medir índice de refracción de vidrios y líquidos transparentes con una resolución de 0.01 unidades de índice de refracción (UIR).



# ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Índice de contenido.....	IV
Índice de figuras.....	VI
Índice de tablas.....	XI
Índice de anexos.....	XI
1. Introducción.....	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Justificación.....	14
1.3 Hipótesis.....	15
1.4 Objetivos de investigación.....	15
1.4.1 Objetivo general.....	15
1.4.2 Objetivos específicos.....	15
2. Marco teórico.....	16
2.1 Importancia de medir Índices de Refracción.....	16
2.2 Refracción.....	19
2.3 Índice de Refracción.....	20
2.4 Refractómetros.....	21
2.4.1 Refractómetro de Abbe.....	21
2.4.2 Refractómetro de Pulfrich.....	22
2.4.3 Refractómetro de Hilger - Chance.....	23

2.4.4	Técnicas refractométricas modernas.....	24
2.5	Interferencia.....	25
2.6	Difracción .....	26
2.7	Principio de la Holografía .....	28
2.8	Holografía.....	29
2.9	Holografía Digital.....	31
2.9.1	Reconstrucción Numérica .....	34
2.9.1.1	Reconstrucción por Convolución.....	34
2.10	Conclusión .....	35
3.	Configuración Experimental .....	36
3.1	Funcionamiento del instrumento .....	36
3.2	Diseño Mecánico del instrumento.....	37
3.3	Adquisición de Imágenes.....	41
3.4	Procesamiento de Imágenes.....	42
3.5	Muestras Utilizadas.....	44
3.6	Conclusión.....	46
4.	Resultados .....	47
4.1	Regímenes de Difracción .....	47
4.2	Profundidad de Foco .....	47
4.3	Registro y Reconstrucción del Holograma.....	49
4.4	Resolución del Sistema.....	49
4.5	Medición del Índice de Refracción en Medios Transparentes .....	51
4.6	Determinación del índice de refracción.....	53
4.7	Conclusión .....	55

5. Conclusiones.....	56
5.1 Conclusiones Generales.....	56
5.2 Trabajo a Futuro.....	57
6. Referencias bibliográficas .....	59
7. Anexos.....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1.1 Aplicaciones de Refractómetros en diferentes industrias .....</i>	17
<i>Tabla 4.2.1 Profundidad de foco de los discos utilizados .....</i>	48
<i>Tabla 4.4.1 Tabla de error para 0.4mm .....</i>	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.2.1 Refracción de la luz [1] .....</i>	19
<i>Figura 2.4.1.1 Esquema de un refractómetro de Abbe [1].....</i>	22
<i>Figura 2.4.2.1 Esquema de un refractómetro de Pulfrich [1].....</i>	23
<i>Figura 2.4.3.1 Esquema de un refractómetro de Hilger - Chance[1] .....</i>	24
<i>Figura 2.6.1 Sistema de Coordenadas [15] .....</i>	27
<i>Figura 2.8.1 Grabado del Holograma [6] .....</i>	30
<i>Figura 2.8.2 Reconstrucción del Holograma [6].....</i>	30
<i>Fig.- 2.9.1.- (a) Grabado de Holograma, (b) Reconstrucción con la onda de referencia ER, (c) Reconstrucción con el conjugado de la onda de referencia .....</i>	32
<i>Fig. 2.9.2- Sistema de coordenadas para la reconstrucción numérica del holograma. ....</i>	33
<i>Fig. 3.1.1.- Arreglo experimental utilizado para medición de índice de refracción en medios transparentes.....</i>	37

<i>Fig.3.2.1 Esquemas y versiones del Prototipo.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 3.2.2.- Montura para módulo laser.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 3.2.3. Módulo laser ensamblado en montura.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 3.2.4.- Diseño de housing para componentes electrónicos.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 3.2.5.- Baterías Lipo con módulos cargadores.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 3.2.6.- Inserción de componentes electrónicos en el housing.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 3.3.7.- Monturas para ingreso de disco sólido y muestras transparentes.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 3.2.8.- Prototipo Ensamblado .....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 3.3.1.- Disco de solido de 150<math>\mu</math>m.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 3.3.2.- Sensor IMX477 .....</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 3.3.3.- Interfaz del software MyCam.....</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 3.4.1.- Discos difractados de 150<math>\mu</math>m en aire.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 3.4.2.- Disco recortado y difractado de 150<math>\mu</math>m.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 3.4.3.- Disco sólido reconstruido y gráfica de perfil de intensidad vs. Distancia de reconstrucción.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 3.5.1 .- Diseño para depósito de líquidos.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 3.5.2.- Depósito de líquidos.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 3.5.3. Arreglo final para análisis de líquidos.....</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 4.1.1. Disco solido difractado en a) Régimen de Fresnel b) Régimen de Fraunhofer.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 4.4.1.- Holograma, Gráfica de intensidad y Reconstrucción del disco sólido en diferentes distancias. a) 24mm b) 25.6mm.....</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 4.5.1.- Disco reconstruido de 150<math>\mu</math>m difractados en regimen de Fresnel en diversos medios. (a) BK7 (b) Silica (c) SF2.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 4.5.2.- Disco reconstruido de 150<math>\mu</math>m difractados en régimen de Fresnel en diversos medios. (a)Alcohol Isopropílico (b) Agua Destilada (c)Aceite.....</i>	<i>53</i>

*Fig. 4.6.1.- Curva de índices de refracción en líquidos.....54*  
*Fig. 4.6.2.- Curva de índices de refracción en Vidrios.....55*

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A. PLANOS DE LOS DISEÑOS REALIZADOS EN SOLIDWORKS  
PARA LAS PIEZAS DEL PROTOTIPO**

**ANEXO B. ARTICULO CIENTIFICO GENERADO A PARTIR DE ESTE  
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## NOMENCLATURA

$\nabla$	Operador Nabla
$E(r,t)$	Frente de onda
$\partial$	Derivada parcial
$c$	Velocidad de la luz en el vacío
$\sum$	Sumatoria de N términos
$A(x,y,z)$	Amplitud compleja de una onda plana
$A$	Amplitud de una onda plana
$I$	Intensidad de una onda plana
*	Complejo conjugado
$\Delta\phi$	Incremento de fase
$\phi$	Término de fase
$\lambda$	Longitud de onda de la luz
$d$	Espacio entre franjas de interferencia
$f$	Frecuencia espacial
$\Gamma(\xi,\eta)$	Difracción en el plano de observación
$\rho$	Distancia entre puntos de distintos planos
$Q$	Factor de inclinación
$E_o$	Frente de la onda de objeto
$a_o$	Amplitud de la onda objeto
$\phi_o$	Fase de la onda objeto
$E_R$	Frente de onda de referencia
$a_R$	Amplitud de la onda de referencia
$\phi_R$	Fase de la onda de referencia
$h$	Amplitud de transmisión de un holograma revelado
$h_o$	Amplitud de transmisión de un holograma sin exponer a la luz
$\beta$	Amplitud de transmisión de transmitancia contra las características de exposición del material sensible a la luz
$\tau$	Tiempo de exposición del holograma
$F$	Transformada de Fourier
$F^{-1}$	Transformada inversa de Fourier
$\exp$	Función exponencial
$g$	Función de respuesta al impulso
$\otimes$	Función de convolución
$IR$	Índice de Refracción
$CD$	Cámara Digital
$DCO$	Diferencia de Camino Óptico
$NA$	Apertura Numérica
$\max$	Máximo permitido

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

Un refractómetro es un aparato que emplea las propiedades ondulatorias de la luz para medir el índice de refracción de un medio transparente, líquido o sólido; como aceite o vidrio. La mayoría de los refractómetros trabajan midiendo el ángulo crítico entre dos materiales, uno de índice de refracción conocido y otro de índice de refracción desconocido, que se desea medir.

Los tres refractómetros más conocidos son el Pulfrich, el de Abbe y el de Hilger-Chance, los dos primeros miden los índices de líquidos o de sólidos, sin embargo, el de Pulfrich es más usado para sólidos y el de Abbe para líquidos. El de Hilger-Chance no trabaja con el ángulo crítico, se usa de manera exclusiva para sólidos y es el más preciso de los tres [1].

Actualmente se ha progresado en la investigación de holografía digital como una técnica para medir IR, ya que es una técnica que permite recuperar la fase para posteriormente medir el desplazamiento de fase introducido por un objeto en la interferencia de dos ondas.

El primer antecedente que se tiene es la microscopía holográfica en línea de esferas coloidales a escala micrométrica, esta produce patrones de dispersión heterodinos que pueden interpretarse con la teoría de Lorenz-Mie para obtener información y, en particular, resuelta en el tiempo sobre el índice de refracción del medio en suspensión. Se demostró que este enfoque de la refractometría espacialmente resuelta con mediciones en líquidos con índice de refracción calibrados, y fue utilizado para monitorear la concentración química en un canal microfluídico. Utilizando esferas coloidales disponibles en el mercado como partículas de sondeo y una cámara de vídeo estándar para la detección, se obtienen los valores del índice de refracción del fluido en la posición de cada partícula de sondeo en cada holograma y de cada partícula de la sonda con una

resolución demostrada de  $2 \times 10^{-3}$  unidades de índice de refracción (RIU) y una resolución potencial que supera las  $10^{-4}$  RIU. Cabe destacar que algunos inconvenientes para el desarrollo de estos dispositivos consisten principalmente en el tipo de instalaciones técnicas y conocimiento para realizarlos, ya que utilizan procesos muy complejos para su desarrollo [2].

Otras técnicas habituales de obtención de imágenes basadas en la holografía, como la microscopía de contraste de fase (PC) o de fase (PC) o la microscopía de contraste de interferencia diferencial (DIC), Por el contrario, La holografía digital se utiliza para medir cuantitativamente los cambios de fase. La fase medida contiene dos características específicas de la muestra, el espesor y el índice de refracción (IR).

Existen diferentes enfoques para utilizar la información de fase obtenida de una muestra en un contexto biológico. La fase puede utilizarse como una medida combinada de los cambios de grosor y de IR de las células. Por ejemplo, en el caso específico de los cambios de volumen, se altera tanto el grosor como el IR.[3]

Debido a la simplicidad y bajo costo de manufactura, en comparación a otras técnicas ópticas, la holografía nos abre un panorama en el que se puede desarrollar un refractómetro robusto, portable y con buena resolución.

Dado que los hologramas nos brindan mucha información se han desarrollado muchos trabajos que nos permiten obtener índices de refracción de partículas o esferas coloidales inmersas en suspensiones. Este método proporciona mediciones de índice de refracción en varios puntos de forma simultánea utilizando una cámara de video estándar como un detector. El método se basa en la microscopía de video holográfico en línea en el que una muestra se ilumina con un haz de luz coherente colimado. La luz se dispersa por una partícula e interfiere con la luz que no está dispersa en el plano focal de un microscopio óptico. La interferencia se amplifica y su intensidad se registra con una cámara de video. Cada imagen digitalizada es un holograma de la partícula en un medio que puede

ser interpretado con la teoría de la dispersión de la luz para medir el índice de refracción de la partícula con respecto a la del medio, con una resolución de una milésima.

Otra forma de medir el índice de refracción es utilizando fibra óptica. Esta metodología puede ser de bajo costo y alternativas viables, sencillas y altamente sensibles. Varios sensores de índice de refracción, con base en tecnología de fibra, como lo son las rejillas de período largo [3], rejillas de Bragg [4, 5] e interferómetros modales [6], se han propuesto. La mayoría de los sensores de índice de refracción basados en fibra se aprovechan de la interacción del campo evanescente con el medio externo. Sin embargo, esta técnica es puntual, en la mayoría de los casos, ya que estos dispositivos son altamente sensibles a la temperatura por lo que se requiere instalar técnicas de compensación [7-14].

En este trabajo presentamos un refractómetro simple basado en la holografía digital, donde un disco sólido (el disco se puede imprimir utilizando técnicas litográficas) el cual se coloca en una hoja de vidrio (puede ser un cubre-objeto), es iluminada con una fuente de luz coherente, el frente de onda difractado ilumina la muestra y el patrón de difracción final es registrado en una cámara digital.

El patrón de difracción final es un holograma digital que contiene las características del medio bajo prueba. La reconstrucción del holograma ofrece la información requerida para determinar el índice de refracción bajo estudio.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de instrumentación para medición de índice de refracción en medios transparentes es de interés en clasificación de muestras, control de un proceso químico, monitoreo de reacciones biológicas o detectar adulterantes en alimentos y bebidas.

De esta manera, es necesario que el instrumento tenga ciertas características como portabilidad, que sea robusto, con cierta exactitud y que las mediciones sean repetitivas.

Es por eso que en este trabajo desarrollaremos un instrumento para medir índice de refracción en medios transparentes utilizando holografía digital.

### **1.3 HIPÓTESIS**

El índice de refracción de un medio transparente cambia a causa de un cambio en el camino óptico. Así, manteniendo fija la distancia física donde se encuentra el medio a medir, se puede monitorear el cambio del índice de refracción al cambiar el medio.

### **1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar y construir un dispositivo basado en holografía digital para análisis de medición de índices de refracción en medios transparentes.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Diseñar y construir el dispositivo para medición de índice de refracción en medios transparentes.
- Desarrollar código en el software Matlab para reconstrucción de hologramas y medición de índice de refracción.
- Caracterizar el prototipo como un instrumento funcional.

## **2. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se introducen los conceptos necesarios para entender el principio de funcionamiento de un refractómetro aplicando la técnica de holografía digital. Además, se explica la importancia de la medición del índice de refracción (IR), las áreas que requieren de su medición, así como los requisitos mínimos que deben cumplir los dispositivos que la miden. Se muestran los tipos de refractómetros que existen hoy en día, así como sus ventajas y desventajas. De estos se hará énfasis en los que están basados en holografía, para posteriormente explicar los principios fundamentales de la holografía.

### **2.1 IMPORTANCIA DE MEDIR ÍNDICES DE REFRACCIÓN**

La refracción es muy importante, ya que a partir de ella se han desarrollado instrumentos y técnicas ópticas para la medición del índice de refracción para diferente tipo de muestras, las cuales abarcan desde sólidos, líquidos y gases.

El índice de refracción nos da información sobre las propiedades ópticas de diversos materiales y nos ayuda a determinar una parte importante en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Dicho esto, el índice en si es una cantidad adimensional, real para un material transparente y complejo si existe absorción.

Al realizar medición de índice de refracción de diferentes materiales nos damos cuenta de que es muy importante ya que nos permite evaluar pureza, o concentración química dependiendo del material, aunado a eso, la medición de IR nos abre una variedad de aplicaciones.

En la Tabla 2.1.1 se puede encontrar algunas de las aplicaciones de los refractómetros en diferentes áreas industriales, tales como la farmacéutica. Química, petroquímica y alimentos. Así como los requisitos especiales que deben cumplir y las especificaciones mínimas sugeridas por normativas nacionales e internacionales [4].

Aplicaciones típicas	Sustancias analizadas	Requisitos	Especificaciones mínimas (Unidades de Índice de Refracción "UIR")
<b>Industria farmacéutica</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pruebas de caracterización en desarrollo e investigación.</li> <li>• Prueba de identificación, control de pureza y medición de concentración en materias primas, semiprocesadas y productos finales.</li> </ul>	Productos farmacéuticos, soluciones de infusión, preparación de diálisis, sueros de sangre, etc.	Precisión, cumplimiento de las normas.	<b>Rango:</b> 1.320 – 1.700 UIR  <b>Resolución:</b> 0.00001 – 0.0001 UIR  <b>Precisión:</b> 0.00002 – 0.0001 UIR
<b>Industria Química</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pruebas de caracterización en desarrollo e investigación.</li> <li>• Prueba de identificación, control de pureza y medición de concentración en materias primas, semiprocesadas y productos finales.</li> <li>• Seguimiento de procesos químicos durante la producción.</li> </ul>	Productos orgánicos, hidrocarburos aromáticos, alcoholes, soluciones salinas, ácidos, bases, tintes, aceites, resinas, agentes extintores, siliconas, etc.	Control exacto de la temperatura en un amplio rango, medición de rango amplio, variedad de escalas, variabilidad de métodos de medición, opción de mediciones por intervalo.	<b>Rango:</b> 1.320 – 1.700 UIR  <b>Resolución:</b> 0.00001 – 0.0001 UIR  <b>Precisión:</b> 0.00002 – 0.0001 UIR
<b>Industria petroquímica, automotriz y aviación, tecnología de construcción y procesamiento de metales</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba de identificación y determinación de la concentración.</li> <li>• Inspección de calidad de producto de salida.</li> <li>• Prueba de estabilidad.</li> </ul>	Aceites lubricantes, combustibles, ceras, lubricantes, refrigerantes lubricantes, agentes anticongelantes, ácido de baterías, tensioactivos, etc.	Fácil manejo, disponibilidad de escala Brix, opción de compensación de temperatura.	<b>Rango:</b> 1.320 – 1.700 UIR  <b>Resolución:</b> 0.00001 – 0.001 UIR  <b>Precisión:</b> 0.00002 – 0.001 UIR

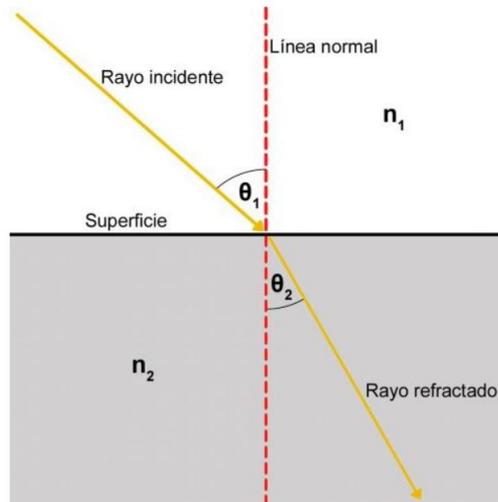
Industria de alimentos			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de calidad y pureza de materias primas materiales y productos finales.</li> <li>Determinación de concentraciones de azúcares.</li> </ul>	Azúcar, mermeladas, miel, almíbar, salsas, mostaza, mayonesa, productos lácteos, alimentos para bebé, productos de huevo, aceites, etc.	Medición rápida y sencilla manipulación, fácil limpieza, análisis de rutina con alta rendimiento de la muestra.	<b>Rango:</b> 1.300 – 1.700 UIR  <b>Resolución:</b> 0.00001 – 0.001 UIR  <b>Precisión:</b> 0.00002 – 0.001 UIR
Fabricante de aromas, fragancias y aceites esenciales			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de calidad de materias primas y materiales auxiliares.</li> <li>Seguimiento de la producción de productos semiacabados y finales.</li> </ul>	Aceites esenciales (Lavanda, aceite de menta, etc.), ácido glicérico, aromas y perfumes para alimentos, industria cosmética y tabacalera, etc.	Volúmenes de muestra bajos con alta agresividad, alta exactitud.	<b>Rango:</b> 1.320 – 1.700 UIR  <b>Resolución:</b> 0.00001 – 0.001 UIR  <b>Precisión:</b> 0.00002 – 0.001 UIR
Industria de las bebidas			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de rutina con muestra alta rendimiento.</li> <li>Control de calidad y pureza de materias primas y productos finales.</li> <li>Determinación de la concentración de azúcar en jugos y bebidas sin alcohol.</li> <li>Determinación del alcohol contenido en cerveza, vino o licores.</li> <li>Control de calidad de productos lácteos.</li> <li>Control de aguas residuales.</li> </ul>	Jugo de frutas y vegetales, bebidas dietéticas, cerveza, especias, vino, humores, concentración de azúcar, productos lácteos, aromatizantes y colorantes, etc.	Mediciones rápidas y de fácil manejo, fácil de limpiar, disponibilidad de la escala Brix.	<b>Rango:</b> 1.320 – 1.700 UIR  <b>Resolución:</b> 0.00001 – 0.001 UIR  <b>Precisión:</b> 0.00002 – 0.001 UIR

Tabla 2.1.1- Aplicaciones de Refractómetros en diferentes industrias, "reproducido con permiso y modificado de Mineralogical Record Inc, 2009 [4]"

En las siguientes secciones, se detallará sobre los diferentes tipos de refractómetros que existen en la actualidad y se explicara el principio básico que siguen estos refractómetros, así como las ventajas y desventajas que tiene cada uno.

## 2.2 REFRACCIÓN

La refracción la podemos definir como el cambio que sufre un rayo en su rapidez y dirección de propagación al pasar de un medio a otro en el que el segundo medio tiene un índice de refracción diferente al primero (ver figura 2.2.1).



*Fig. 2.2.1.- Refracción de la luz*

Como se puede apreciar en la figura, en este fenómeno participan, el rayo incidente y el rayo refractado. Existe refracción de la luz cuando, por ejemplo, esta pasa a través del aire al agua, en el cual el rayo refractado varía su ángulo y velocidad de propagación.

En el fenómeno de refracción como se mencionó anteriormente participan los siguientes elementos:

- Rayo incidente: rayo de luz que llega a la superficie entre ambos medios;
- Rayo refractado: rayo que se desvía cuando la onda luminosa atraviesa la superficie;
- Línea normal: línea imaginaria perpendicular a la superficie, establecida a partir del punto en que ambos rayos coinciden;
- Ángulo de incidencia: ángulo que se produce entre el rayo incidente y la línea normal. Se expresa con el símbolo  $\theta_1$ ;
- Ángulo de refracción: es el ángulo que se produce entre el rayo refractado y la línea normal. Se expresa con el símbolo  $\theta_2$ .

### 2.3 ÍNDICE DE REFRACCIÓN

El índice de refracción un valor único para cada material, el cual es dependiente de la temperatura, característica que lo hace indispensable a la hora de utilizarlo para caracterizar e identificar materiales. Se sabe que algunos de los factores que influyen en el valor del IR de un material son su composición química, su temperatura, pureza, viscosidad, densidad, la longitud de onda de la fuente empleada, absorbancia, concentración (el caso de una disolución), etc. Es debido a esta cantidad de factores que se deduce la importancia de conocer esta propiedad óptica para aplicaciones médicas, físico- químicas, industriales y biológicas, etc [1].

Los instrumentos que miden el IR se les denomina *refractómetros*. Un refractómetro es un aparato que emplea propiedades ondulatorias de la luz para medir el índice de refracción de medios, en este caso nuestro refractómetro medirá el IR de medios transparentes, tales como lo son, agua, aceites, vidrio, alcoholes.

Estos refractómetros se utilizan en una variedad de aplicaciones: desde la determinación de la pureza y concentración de ingredientes de medicamentos hasta la medición del contenido de azúcar en alimentos y bebidas y el análisis de aceite derivado de petróleo. La dilución del aceite de girasol con aceites baratos también se puede detectar con estos dispositivos. Además, los refractómetros son el método de elección para el control de calidad de los fluidos operativos para máquinas y motores, la solución de urea sintética para el tratamiento de las emisiones de los motores diésel [1].

Los refractómetros más comunes son el de Abbe, Pulfrich y Hilger-Chance, estos sirven para medir índices de refracción para medios sólidos y líquidos, el de Pulfrich es más usado para sólidos y el de Abbe para líquidos. Por otro lado, el de Hilger – Chance no trabaja con el ángulo crítico y se usa de manera exclusiva para sólidos, pero es el más preciso de los tres [1].

## 2.4 REFRACTÓMETROS

### 2.4.1 REFRACTÓMETRO DE ABBE

El refractómetro de Abbe es el más común de los refractómetros, fue diseñado en 1906 con el fin de medir el índice de refracción de líquidos, pero también se puede usar para sólidos. La mayoría de dispositivos refractómetros, cuentan con la ayuda de un termostato que opera en los rangos de 0°C a 50°C para poder determinar el correcto índice de refracción de la sustancia. El índice de refracción y la medida de dispersión son constantes ópticas importantes por lo que este instrumento se ha utilizado indispensablemente en las industrias de químicas, grasas, farmacia, pintura, procesamiento de alimentos, por fábricas, colegios e institutos de investigación científica. El principio básico de operación del refractómetro es la aplicación de la ley de Snell, cuando el fenómeno refractómetro de la luz se produce en la interfaz de dos medios diferentes [1].

Este instrumento consta de dos prismas, como se muestra en la figura 2.4.1.1 El prisma del lado de la fuente tiene como único propósito iluminar la muestra mientras le proporciona soporte mecánico. El otro prisma es la referencia con respecto a la cual se mide el ángulo límite. El líquido que se va a medir se coloca en la hendidura entre los dos prismas. Para medir un sólido se remueve el prisma iluminador y en su lugar se coloca la muestra a medir. Los prismas compensadores son unos prismas dispersores variables sin desviación que se usan para compensar la dispersión cromática del elemento cuyo índice se mide, con lo que se puede usar luz blanca para iluminar el instrumento. El líquido cuyo índice se desea medir debe tener un índice de refracción inferior al de los prismas entre los que se encuentra [1].

El refractómetro de Abbe tiene una precisión de índice de refracción  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ , el rango del índice de refracción es amplio dependiendo del modelo. Dado que la temperatura afecta la medición del IR de una sustancia, los refractómetros de Abbe poseen conexiones para incluir un baño de agua que proporciona el control de temperatura del prisma.

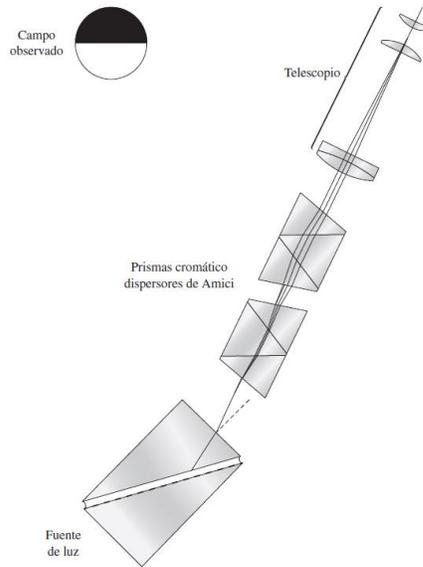


Fig. 2.4.1.1.- Esquema de un refractómetro de Abbe

## 2.4.2 REFRACTOMETRO DE PULFRICH

El refractómetro de Pulfrich se ilustra en la figura 2.4.2.1. Una fuente de luz monocromática convergente ilumina la zona de contacto entre el prisma de índice conocido  $n_0$  y la pieza de índice  $n$ . No es necesario que la cara plana de la muestra sea perfectamente plana, ni siquiera que este bien pulida. Se necesita solamente que la muestra se una al prisma por medio de un aceite con índice de refracción intermedio con el de esta muestra y el prisma. El índice  $n_0$  es mayor que el índice  $n$ , así que la luz se refracta hacia abajo, dirigiéndose a un telescopio observador. Debido al ángulo crítico, la luz tendrá un mínimo para el ángulo de salida  $\theta$ . En el telescopio se observa una frontera bien definida entre la luz y la sombra, la cual permite medir el índice mínimo del ángulo. A partir de esto se puede calcular fácilmente el índice de refracción  $n$  usando la formula:

$$n = (n_0^2 - \text{sen}^2 \theta)^{1/2} \quad (1)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo medido.

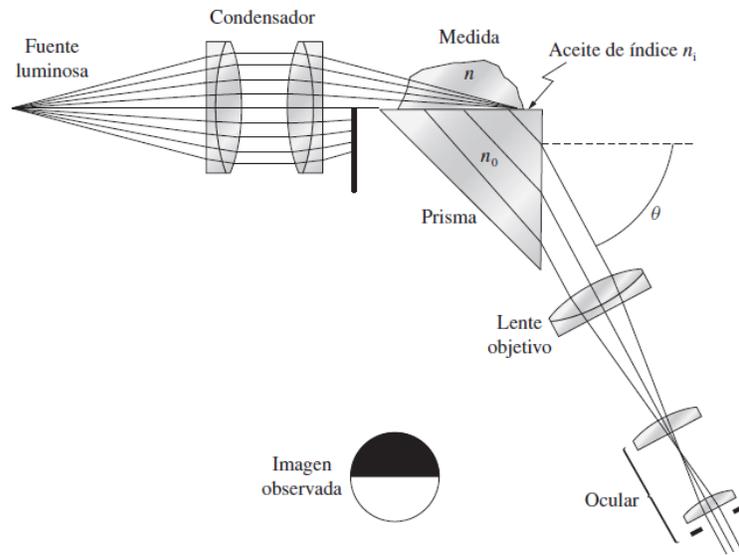


Fig. 2.4.2.1.- Esquema de un refractómetro de Pulfrich

### 2.4.3 REFRACTOMETRO DE HILGER – CHANCE

En el caso de este refractómetro, se mide de forma directa el ángulo de refracción en lugar de medir el ángulo crítico, como en los otros dos que se han descrito. Es sumamente preciso y fue diseñado con el propósito de medir índices de refracción de vidrio óptico. La muestra tiene que tallarse con dos caras aproximadamente planas y semipulidas. La adherencia a los prismas del refractómetro se efectúa con un aceite de índice de refracción cercano al de la muestra. El instrumento se ilumina con un haz de luz colimada y el índice de refracción se calcula después de medir el ángulo  $\theta$  con el que se desvía la luz de salida con respecto al eje óptico, usando la fórmula:

$$n = [n_0^2 - \text{sen}\theta(n_0^2 - \text{sen}^2\theta)^{1/2}]^{1/2} \quad (2)$$

Donde  $n_0$  es el índice de refracción de los prismas del refractómetro.

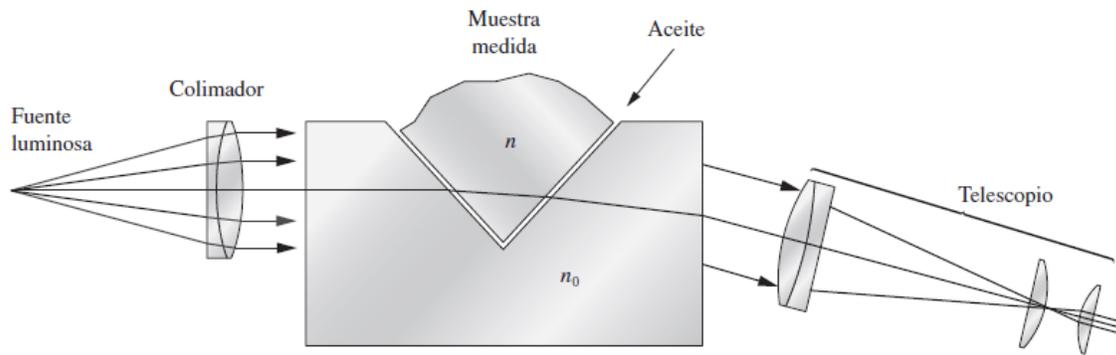


Fig. 2.4.3 .1.- Esquema de un refractómetro de Hilger - Chance

## 2.4.4 TÉCNICAS REFRACTOMÉTRICAS MODERNAS

Recientemente, los nuevos refractómetros están basados en la observación de un patrón de franjas producido por un interferómetro [20, 21], o esparcimiento de luz [22, 23, 24], han atraído considerable atención ya que la sensibilidad es alta, el esquema de interrogación es simple y el costo es bajo. Estos sistemas utilizan un sistema óptico conectado a una cámara digital como elemento de interrogación. La principal diferencia de los refractómetros de Abbe, Pulfrich y Hilger en relación con los interferómetros, radica en que los primeros son técnicas de medición de un solo punto y los segundos son de campo completo, es decir de múltiples puntos.

En lo que respecta a interferometría, se han realizado muchos arreglos en donde el haz de un láser incide en un divisor de haz para posteriormente dirigirse a una superficie de prueba y una de referencia y con un detector, observar la interferencia de los haces. En el plano del detector habrán franjas periódicas con una intensidad modulada, para la medición de índices de refracción con esta técnica primero se coloca una muestra con cierto índice y espesor, para así incidir de luz normal a la superficie y que el espejo que está localizado en el plano se ajuste para la obtención de franjas circulares con un único punto oscuro central, por lo cual habrá una diferencia de camino óptico entre los haces en donde este DCO puede variarse al cambiar el ángulo de incidencia sobre la muestra. Conociendo la longitud de recorrido en la placa, el índice de refracción se puede expresar por el número de franjas que cambian en el patrón de interferencia.

En esta técnica no hay mucha exactitud debido a las limitaciones que tiene por el grosor de la muestra y el flujo de aire en el ambiente, así como ciertas vibraciones que se provoquen al exterior [5].

Cabe destacar que dentro de estas técnicas nos encontramos con la elipsometría, para la medición de índices, una onda electromagnética interacciona con un medio y su estado de polarización se puede ver modificado, estos cambios son los que se detectan y analizan con esta técnica. Esta técnica es muy precisa para caracterización de superficies y permite obtener información sobre el espesor e índice de refracción de la muestra, ya que debido a los cambios de estado de polarización de la luz entre una onda incidente y reflejada [5].

## 2.5 INTERFERENCIA

La superposición de dos o más ondas en el espacio se llama interferencia [6,15]. Supongamos el caso más simple: la superposición de dos ondas monocromáticas con igual frecuencia y longitud de onda. Las ondas deben tener las mismas direcciones de polarización. La amplitud compleja de las ondas se puede representar como:

$$A_1(x,y,z) = a_1 \exp(i\varphi_1) \quad (3)$$

$$A_2(x,y,z) = a_2 \exp(i\varphi_2) \quad (4)$$

La amplitud compleja resultante es entonces calculada por la suma de las amplitudes individuales:

$$A = A_1 + A_2 \quad (5)$$

Para obtener la intensidad de una onda plana tenemos:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c |A|^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c A^* A \quad (6)$$

Donde \* denota el complejo conjugado. En muchos cálculos prácticos, donde el valor absoluto de  $I$  no es de interés el factor  $\frac{1}{2} \epsilon_0 c$  puede omitirse, entonces la intensidad simplemente se calcula por

$$I = |A|^2$$

De acuerdo a la ecuación (3) la intensidad resultante es

$$\begin{aligned}
 I &= |A_1 + A_2|^2 = (A_1 + A_2)(A_1 + A_2)^* \\
 &= a_1 + a_2 + 2a_1a_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (7) \\
 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi
 \end{aligned}$$

Donde  $I_1, I_2$  son las intensidades individuales y

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (8)$$

La intensidad resultante es la suma de las intensidades individuales más el término de interferencia  $2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi$ , que depende de la diferencia de fase entre ondas.

La condición para que la intensidad alcance su máximo es

$$\Delta\varphi = 2m\pi \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Esta es llamada interferencia constructiva. La condición para que la intensidad alcance su mínimo es

$$\Delta\varphi = (2m+1)\pi \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

## 2.6 DIFRACCIÓN

A fin de poder explicar la difracción, Christiaan Huygens propuso en los Países Bajos la regla de que “cada punto de un frente de onda se considere como una nueva fuente de ondas esféricas”. Este es el llamado principio de Huygens.

Consideremos una onda de luz que incide sobre un obstáculo, éste puede ser una pantalla opaca con algunos hoyos transparentes o un medio transparente con estructuras opacas. De óptica geométrica se podría decir que la sombra se hace visible en una pantalla detrás del obstáculo. Pero si examinamos detenidamente encontramos que lo anterior no es del todo correcto.

Si las dimensiones del obstáculo (caso del agujero en una pantalla opaca o una partícula opaca dentro de un volumen transparente) están en el rango de la longitud de onda, la distribución de la luz no está bien definida y forma un patrón de regiones oscuras y brillantes. Éste fenómeno es llamado *difracción*.

La difracción puede explicarse cualitativamente con el principio de Huygens, el cual dice: “Cada punto de un frente de onda puede ser considerado como una fuente puntual para ondas esféricas secundarias. El frente de onda en cualquier otro lugar es la superposición coherente de esas ondas secundarias”.

Con la integral de Fresnel – Kirchhoff se puede describir la difracción cuantitativamente como [1]

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint_{\infty} A(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'} Q dx dy \quad (11)$$

con

$$\rho' = \sqrt{(x-\xi')^2 + (y-\eta')^2 + d^2} \quad (12)$$

y

$$Q = \frac{1}{2} (\cos\theta + \cos\theta') \quad (13)$$

Donde  $A(x, y)$  es la amplitud compleja en el plano de la apertura, (ver figura 2.6.1),  $\Gamma(\xi', \eta')$  es el campo en el plano de observación,  $\rho'$  es la distancia entre un punto en el plano de la apertura y un punto en el plano de observación. La ecuación (11) puede entenderse como la formulación matemática del principio de Huygens, es decir, la fuente de luz  $S$  colocada en el plano de la fuente con coordenadas  $(\xi', \eta')$  irradia ondas esféricas, así  $A(x, y)$  es la amplitud compleja de una onda en el plano de la apertura.

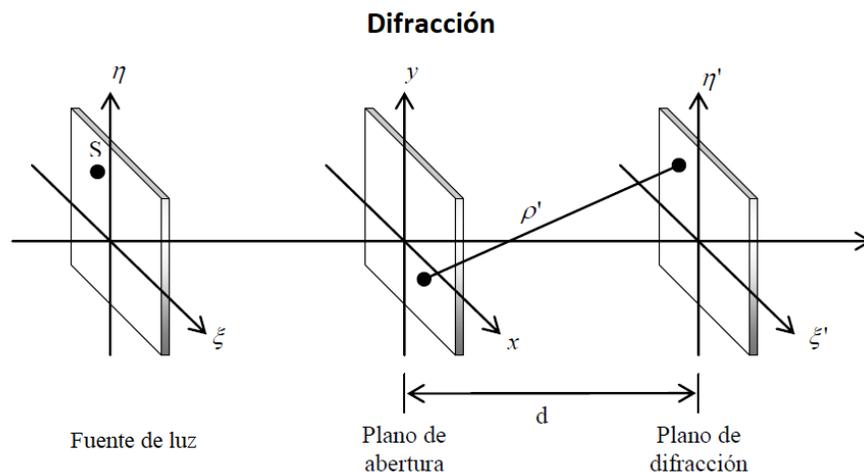


Fig. 2.6.1.- Sistema de coordenadas.

## 2.7 PRINCIPIOS DE LA HOLOGRAFÍA

El inventor de la holografía fue Dennis Gabor, y esta técnica fue inventada antes que el primer laser de helio – neon, lo que Gabor buscaba era un método para mejorar la resolución de un microscopio electrónico. Propuso realizar un método de registro fotográfico al que llamo holografía, que viene del griego *holos*, que significa completo, pues el registro que se obtiene de la imagen es completo, incluyendo la información tridimensional [27-31].

Este registro consistía en dos pasos, el primero en registrar en una placa fotográfica el patrón de difracción o bien la interferencia producida por una onda cuando esta se interponía con un objeto cuya imagen deseaba formar. El segundo paso era incidir la misma onda a través del registro fotográfico, una vez revelado. La luz, al pasar por la placa, se difractaba de tal forma que en una pantalla colocada adelante se formaba una imagen del objeto.

Aunado a esto, Gabor no tuvo el éxito que esperaba con su propuesta, pero si obtuvo un nuevo método para la formación de imágenes. Así formo el primer holograma, aunque no fue del todo bueno comparado con lo que tenemos actualmente, pero hecho esto y desconociendo los trabajos sobre la holografía, el investigador Emmett N. Leith de la Universidad de Michigan, buscaba un método para el registro de ondas de las señales de radar y así mostrarlas gráficamente. En 1960 fue que supo de los trabajos previos de Gabor y su objetivo desde entonces fue perfeccionar el método. La solución que encontró fue eliminar la segunda imagen que se producía, ya que se mezclaba la imagen real y virtual y con la luz incidente producían una imagen muy difusa, todo esto lo logro en colaboración con su colega Juris Upatnieks[16,17].

## 2.8 HOLOGRAFÍA

Los principios físicos de la holografía están basados en la naturaleza ondulatoria de la luz y son la interferencia (en la etapa de registro) y la difracción (en la etapa de reconstrucción).

Desde que se descubrió la holografía [16], esta se ha desarrollado considerablemente lo que ha permitido aplicar este método óptico para distintas ramas científicas y tecnológicas impactando en varios sectores.

Los hologramas generalmente se graban mediante una configuración óptica que consiste en una fuente de luz (laser), espejos y lentes para guiar el haz y un medio de registro, por ejemplo, una placa fotográfica.

Como se mencionó anteriormente la configuración típica puede realizarse fuera de eje como se muestra en la figura 2.8.1 [6, 18,19]. En este arreglo experimental, la luz laser se divide en dos ondas mediante un divisor de haz. La primera onda ilumina al objeto, la luz se dispersa en la superficie y así se refleja en el medio de registro. La segunda onda que es la onda de referencia ilumina al medio de registro y así ambas ondas producirían una interferencia para realizar el holograma. El patrón de interferencia se puede registrar en cualquier placa fotográfica o bien un sensor electrónico.

La onda original del objeto es reconstruida iluminando el holograma con la onda de referencia, como se muestra en la figura 2.8.2. Para este caso un observador vería una imagen virtual, casi indistinguible del objeto original, ya que la imagen reconstruida exhibirá todos los efectos de perspectiva y profundidad de foco.

El proceso holográfico es descrito matemáticamente usando el formalismo de la sección 2.5. La amplitud compleja de la onda del objeto se describe por:

$$E_0(x,y) = a_0(x,y)\exp(i\varphi_0(x,y)) \quad (14)$$

Con  $a_0$  como amplitud real y  $\varphi_0$  como la fase.

La onda de referencia la podemos representar como:

$$E_R(x,y) = a_R(x,y) \exp(i\varphi_R(x,y)) \quad (15)$$

Donde  $a_R$  es la amplitud real y  $\varphi_R$  la fase. Ambas ondas interfieren en la superficie del medio de registro, donde la intensidad se calcula por:

$$I(x,y) = |E_0(x,y) + E_R(x,y)|^2 \quad (16)$$

$$= (E_0(x,y) + E_R(x,y))(E_0(x,y) + E_R(x,y))^*$$

$$= E_R(x,y)E_R^*(x,y) + E_0(x,y)E_0^*(x,y) + E_0(x,y)E_R^*(x,y) + E_R(x,y)E_0^*(x,y)$$

La amplitud de transmisión  $h(x,y)$  para una placa fotográfica revelada (o del medio de grabación que se use) es proporcional a  $I(x,y)$ :

$$h(x,y) = h_0 + \beta I(x,y) \quad (17)$$

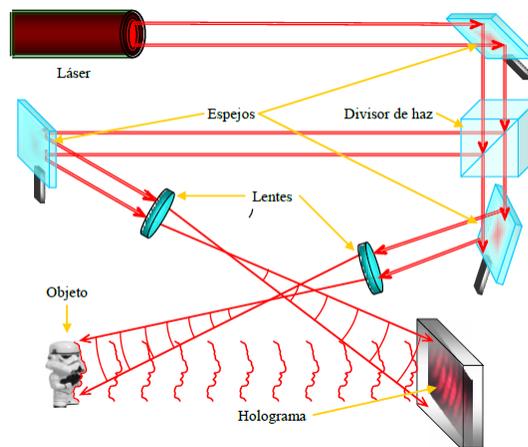


Fig. 2.8.1.- Grabado del Holograma

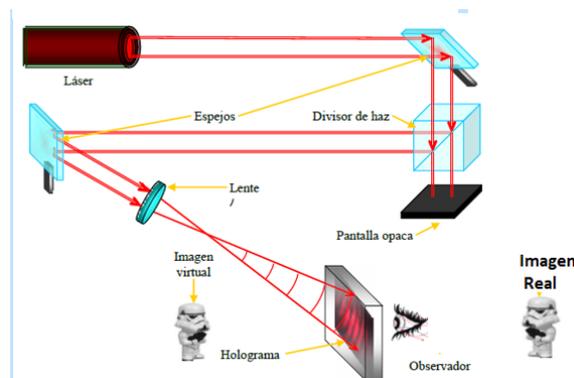


Fig. 2.8.2.- Reconstrucción del Holograma

En este caso particular la constante  $\beta$  es la pendiente de la amplitud de transmitancia contra las características de exposición del material sensible a la luz.

Para emulsiones fotográficas,  $\beta$  es negativa,  $\tau$  es el tiempo de exposición y  $h_0$  es la amplitud de transmisión de la placa sin exponer. La función  $h(x,y)$  es a la que llamaremos se le llama función del holograma. Si se usa un sensor digital como medio de grabación entonces  $h_0$  puede omitirse.

$$E_R(x,y)h(x,y) = [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_0^2)]E_R(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_0(x,y) + \beta\tau E_R^2(x,y)E_0^*(x,y) \quad (18)$$

Donde la onda de referencia multiplicada por un factor es nuestro primer término a la derecha, este término nos representa la onda no difractada que atraviesa el holograma; el cual será orden de difracción cero. La onda del objeto reconstruida y siendo una imagen virtual es nuestro segundo término. El factor real  $\beta\tau a_R^2$  solo influye en el brillo de la imagen. El tercer término genera una imagen real distorsionada del objeto. Para holografía fuera de eje, la imagen virtual, la imagen real y la onda no difractada son espacialmente separadas.

En la imagen real habrá una distorsión y esto se debe al factor complejo  $E_R^2$  espacialmente diferente, el cual nos ayuda a modular la imagen formando el conjugado de la onda del objeto  $E_0^*$ . Una imagen real no distorsionada se puede generar usando el conjugado del haz de referencia  $E_R^*$  en la reconstrucción.

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = (19) [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_0^2)]E_R^*(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_0^*(x,y) + \beta\tau E_R^2(x,y)E_0(x,y)$$

## 2.9 HOLOGRAFIA DIGITAL

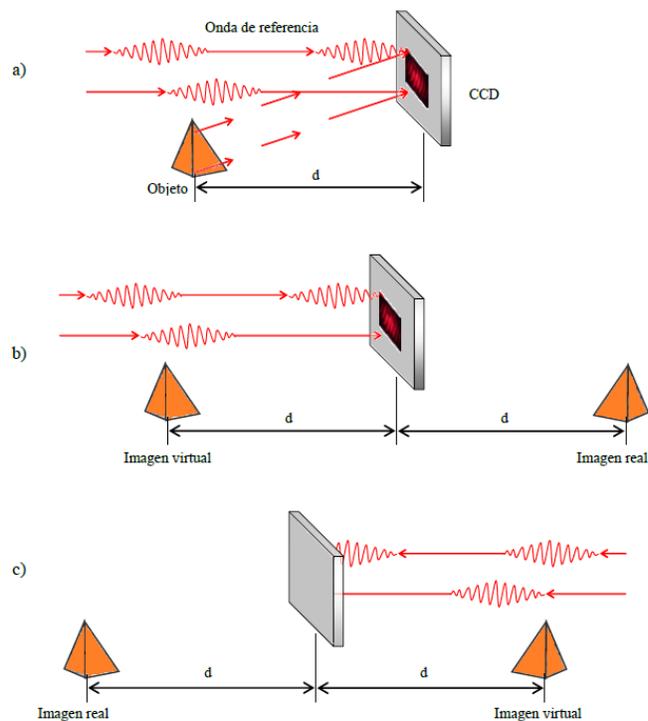
La diferencia entre Holografía y Holografía Digital radica en el sentido de que la Holografía digital es la tecnología de adquisición y procesamiento de recolecciones holográficas, típicamente a través de una cámara digital o dispositivos similares.

Este proceso consiste en la reconstrucción numérica de los datos recolectados, a diferencia de los sistemas de reconstrucción óptica que solo reproducen el aspecto del objeto [33,34].

Dicho esto, el concepto principal de como registrar hologramas digitales se ilustra en la figura 2.9.1(a).

En dicha figura; una onda plana de referencia y la onda reflejada del objeto interfieren en la superficie de la cámara digital, o bien un dispositivo de carga acoplada tal y como lo es un CCD (Charged Coupled Device (CCD)) u a su vez un CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). El holograma resultante es registrado electrónicamente y almacenado. El objeto es generalmente de tres dimensiones con una superficie de reflexión difusa localizada a una distancia  $d$  del CMOS.

En la reconstrucción óptica, la imagen virtual aparece en la posición del objeto original y su imagen real se forma igualmente a una distancia  $d$  pero de forma opuesta al CMOS, tal y que como se aprecia en la figura 2.9.1(b) y su reconstrucción con el conjugado de la onda de referencia en la figura 2.9.1(c).



*Fig.- 2.9.1.- (a) Grabado de Holograma, (b) Reconstrucción con la onda de referencia  $E_R$ ,  
(c) Reconstrucción con el conjugado de la onda de referencia*

La reconstrucción del holograma se puede representar con las ecuaciones de Fresnel – Kirchhoff de la sección 2.6 de la siguiente forma.

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right)}{\rho'} dx dy \quad (20)$$

Donde nuestra función del holograma es  $h(x, y)$  y  $\rho'$  es la distancia entre un punto en el plano del holograma y un punto en el plano de reconstrucción. Como se puede apreciar en la figura 8, el factor de inclinación es 1 debido a que los ángulos  $\theta$  y  $\theta'$  son aproximadamente 0. Para una onda plana de referencia,  $E_R(x, y)$  se da por la amplitud real:

$$E_R = a_R + i_0 = a_R \quad (21)$$

El patrón de difracción es calculado a una distancia  $d$ , la cual está atrás del plano del CMOS, así la amplitud compleja va a reconstruirse en el plano de la imagen real.

La ecuación 11 es la base para la reconstrucción numérica del holograma. Debido a que es este campo de onda reconstruido dada por la función  $\Gamma(\xi', \eta')$ , es una función compleja, tanto que la intensidad como fase pueden ser calculadas [15,25].

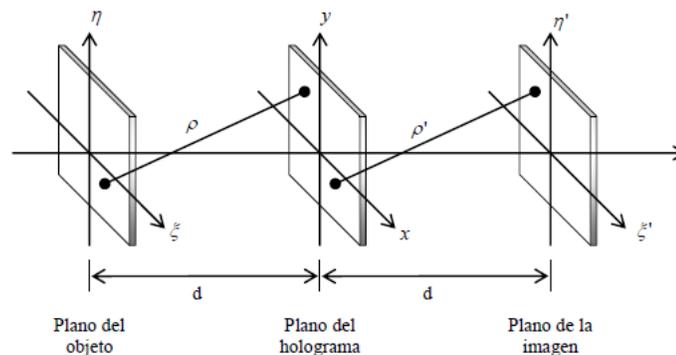


Fig. 2.9.2- Sistema de coordenadas para la reconstrucción numérica del holograma

Como bien se mencionó en la sección de Holografía, la imagen real puede ser deformada o distorsionada. De acuerdo a la ecuación 21, una imagen real no

distorsionada puede producirse usando el haz de referencia conjugado para la reconstrucción. Para reconstruir una imagen real no distorsionada en holografía digital es por tanto necesario insertar la onda de referencia conjugada  $E_R^*$  en lugar de la de referencia normal.

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho)}{\rho} dx dy \quad (22)$$

Este plano de reconstrucción se puede apreciar en la figura 2.9.1(c). La imagen real se forma en la posición donde el objeto fue grabado.

## 2.9.1 RECONSTRUCCION NUMÉRICA

### 2.9.1.1 RECONSTRUCCIÓN POR CONVOLUCIÓN

Debido a que el proceso de reconstrucción utilizando la integral de Fresnel – Kirchhoff consume demasiado tiempo, se establece una formulación distinta y más efectiva, la cual es el teorema de convolución. La fórmula de reconstrucción (Ec. 23).

$$U(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) g(\xi, \eta, x, y) dx dy \quad (23)$$

Donde la respuesta al impulso  $g(\xi, \eta, x, y)$  está dada por:

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+d^2}\right]}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+d^2}} \quad (24)$$

La ecuación (23) denota la operación de convolución y se puede calcular usando el teorema de convolución, esta se escribe de la siguiente forma:

$$U(\xi, \eta) = F^{-1}\{F(h(x, y)E_R^*(x, y)) \cdot F(g(\xi, \eta, x, y))\} \quad (25)$$

En la ecuación (25), los símbolos  $F$  y  $F^{-1}$  significan transformada de Fourier directa e inversa respectivamente. Es importante mencionar, que el sensor de una cámara digital registra la intensidad del holograma reconstruido en la siguiente manera:

$$I(\xi,\eta) = |U(\xi,\eta)|^2 \quad (26)$$

En este trabajo, para resolver la ecuación (4) utilizamos el método propuesto en la referencia [15,26].

## **CONCLUSIÓN**

En este capítulo se ha descrito qué es el Índice de refracción (IR) y como se mide a través del uso de los refractómetros; la importancia que éstos tienen en la industria, así como identificar las aplicaciones y requerimientos para implementar un refractómetro en diferentes industrias. También se expusieron los diferentes tipos de refractómetros.

Por lo cual ante lo ante visto podemos definir las bases fundamentales para el desarrollo del proyecto, pues gracias al estudio de los diferentes refractómetros, así como técnicas ópticas se realizó una selección de las propiedades positivas de estos para que influya como factor en la realización del prototipo.

Cabe destacar que los principios fundamentales sobre el cual dispositivo debe operar se basan en la interferencia de dos ondas, una del objeto y otra de referencia, así como la difracción, todo esto para poder generar hologramas del disco sólido.

### **3. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL**

En este capítulo se describe cada etapa del desarrollo del prototipo, así mismo se muestra la metodología para medir el índice de refracción usando holografía digital en línea. El sistema óptico desarrollado consta principalmente de una cámara digital y un disco sólido usado como medio para medir el índice de refracción.

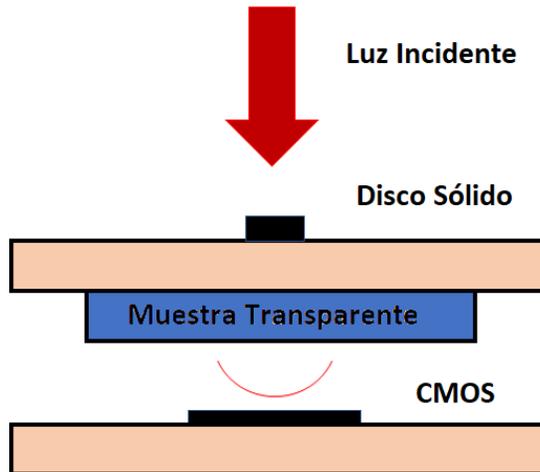
#### **3.1 FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO**

En este proyecto se obtienen mediciones de índice de refracción en medios transparentes usando holografía digital. El principio básico de la holografía, como se mencionó en el capítulo 2, consiste en dos pasos: 1) Registrar en el plano de observación el patrón de interferencia originado por un frente de onda proveniente del objeto y uno de referencia, dicho patrón de interferencia se denomina holograma. 2) Recuperación del frente de onda mediante la difracción de la onda de referencia en el holograma; si el holograma es iluminado con una réplica exacta de la onda de referencia, un observador verá una imagen virtual, la cual es idéntico del objeto original pues posee toda la información de perspectiva y profundidad del objeto [14].

La metodología para medir el índice de refracción es de la siguiente manera: un frente de onda ilumina un disco sólido utilizado como medio para medir índice de refracción, la luz se difracta en el disco sólido y se registra en el plano de observación. El frente de onda que no se difracta a través del disco sólido también se registra en el plano de observación y hace las veces de la onda de referencia. De esta manera tenemos en el plano de observación la formación de un holograma (ver figura 3.2.1). Si colocamos una muestra entre el disco sólido y el plano de observación a la que se le quiere medir el índice de refracción, se provoca una diferencia de camino óptico, el cual induce a que el disco sólido este en una posición vertical diferente.

Por lo que, en la reconstrucción del holograma, esta posición vertical del disco sólido está relacionada con el índice de refracción y grueso de la muestra. En la

holografía digital, el segundo paso es realizado numéricamente en un computador (ver capítulo 2).



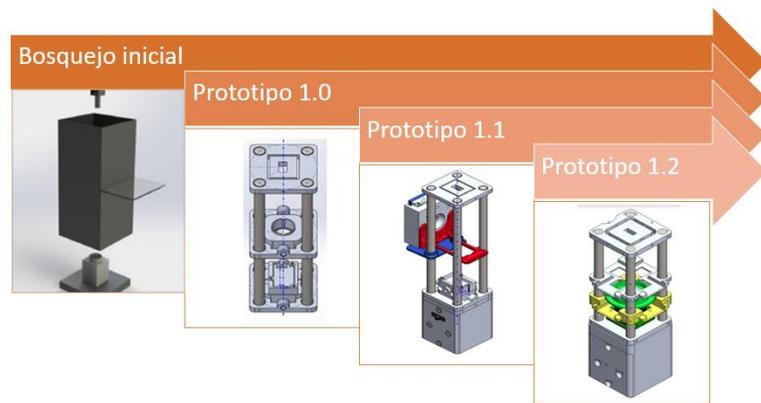
*Fig. 3.1.1.- Arreglo experimental utilizado para medición de índice de refracción en medios transparentes*

En las secciones siguientes se expondrá el desarrollo del prototipo para medir índice de refracción en medios transparentes.

### **3.2 DISEÑO MECANICO DEL INSTRUMENTO**

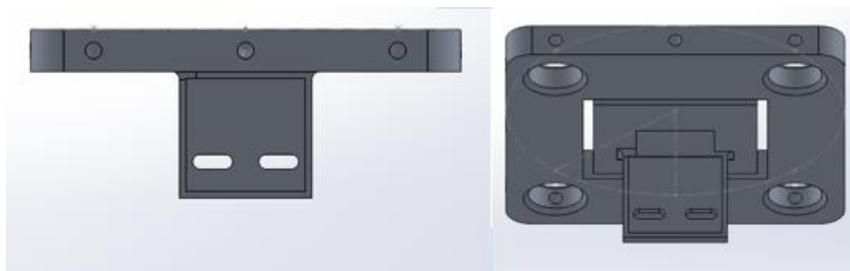
El prototipo preliminar fue diseñado con la ayuda del software SolidWorks. En la figura 3.2.1 se muestra la evolución del prototipo hasta su etapa final.

El desarrollo del prototipo se realizó con una impresora en 3D y el maquinado de algunas de las piezas en aluminio. Las partes principales del dispositivo son: un diodo láser de 5mW de potencia y longitud de onda de emisión de 650 nm, un portaobjeto con un disco sólido impreso de 150  $\mu\text{m}$ , un espacio de confinamiento para las muestras a analizar y un CMOS. Las impresiones en 3D se realizaron con plástico de ácido poliláctico (PLA) en tono mate para evitar reflexiones que afecten las mediciones. El dispositivo cuenta con un soporte estructural constituido de monturas y barras de aluminio de 10mm de diámetro, esto con el fin de formar el cuerpo completo del prototipo donde se articularán los componentes.



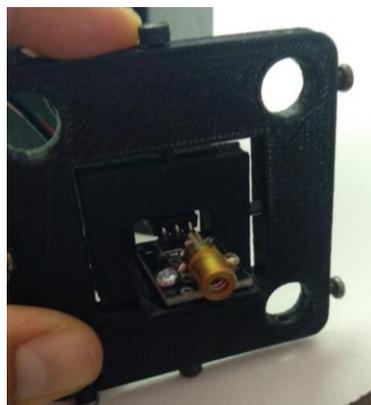
*Fig.3.2.1 Esquemas y versiones del Prototipo*

Como se muestra en la figura 3.2.1, el prototipo cuenta con diversos componentes, entre estos podemos mencionar el diseño de montura para colocar el diodo laser (ver figura 3.2.2).



*Fig. 3.2.2.- Montura para modulo laser*

En la figura 3.2.3 se aprecia el láser instalado en la montura para ser ensamblado en el prototipo, el cual nos ayudará a iluminar nuestro disco de parametrización en las muestras, este disco se difractará y será captado en el CMOS.



*Fig. 3.2.3.- Modulo laser ensamblado en montura*

Para alimentar el diodo laser se desarrolló un arreglo de baterías de Litio de 3.7 V y 400 mA de carga. De esta manera, el prototipo no cuenta con fuentes de energía externas para su funcionamiento; haciendo hincapié a la portabilidad del dispositivo. Las baterías Litio nos ayudaran a obtener más energía que una batería convencional del mismo peso, ya que una de las ventajas principales de estas, a una convencional, es el peso y dimensión, y que las baterías de Litio son capaces de mantener el suministro de energía eléctrica a nuestro sistema durante un periodo de tiempo prolongado. El sistema para cargar las baterías cuenta con dos módulos TP4056, los cuales nos ayudaran a cargar las baterías y un circuito integrado LM2596 que provee la capacidad de regular el voltaje de entrada al sistema. Dicho circuito integrado maneja un rango de operación de 1.23V-30V y el voltaje de salida es ajustable por el usuario con un potenciómetro de precisión.

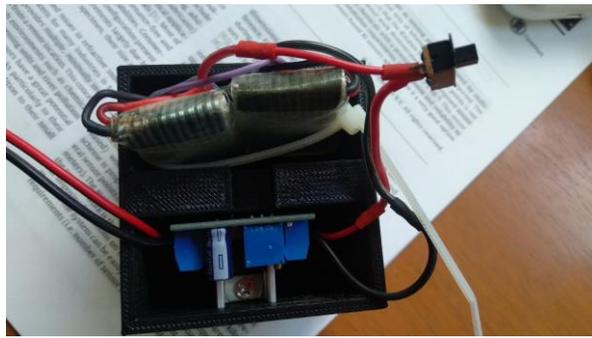
Para ensamblar las baterías en el prototipo, se realizó el diseño de un contenedor tipo housing, tiene la función de sostener piezas en su lugar y de protegerlas del ambiente externo o de movimientos no deseados, que en este caso son los componentes electrónicos y así poder introducir las baterías y su regulador de voltaje (ver figuras 3.2.4 – 3.2.6).



*Fig. 3.2.4.- Diseño de housing para componentes electrónicos*

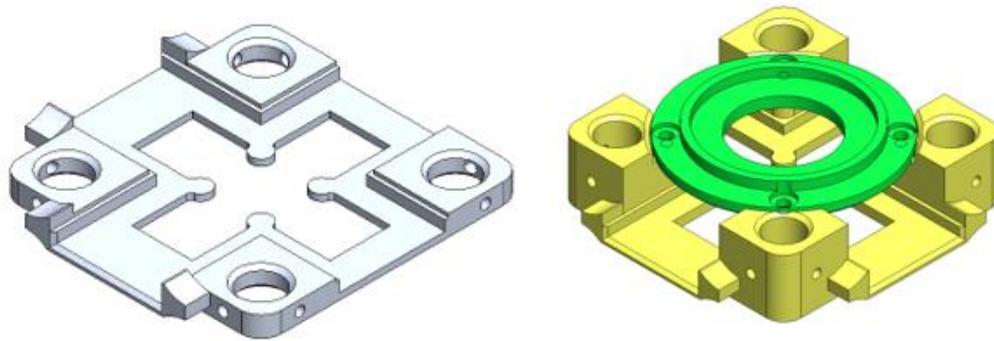


*Fig. 3.2.5.- Baterías Lipo con módulos cargadores*



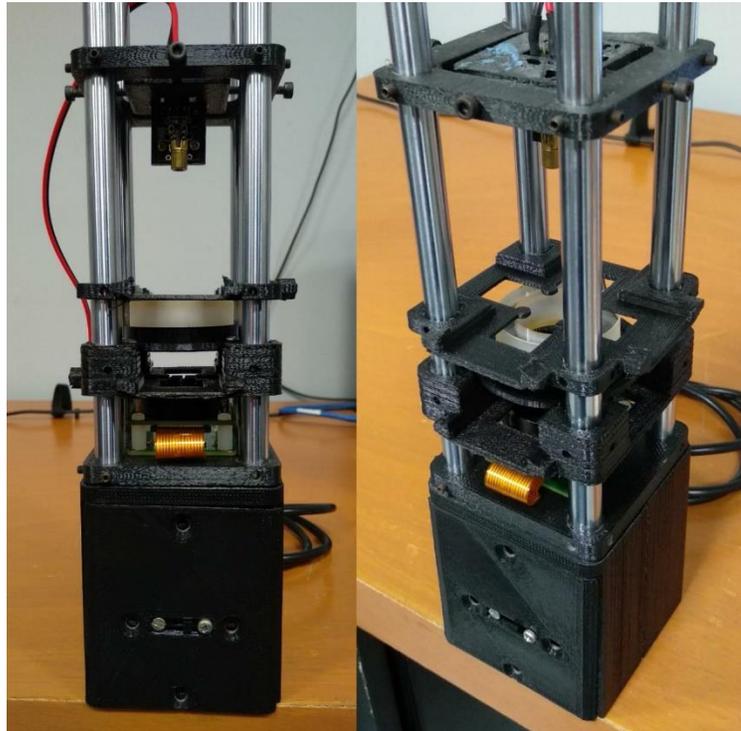
*Fig. 3.2.6.- Inserción de componentes electrónicos en el housing*

Posterior a esto, se realizaron las monturas del disco sólido y de las muestras en estudio, como las mostradas en la figura 3.2.7.



*Fig. 3.2.7.- Monturas para ingreso de disco sólido y muestras transparentes*

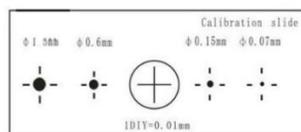
Una vez realizado estos diseños, se procedió a imprimir en una impresora 3D cada una de las piezas. Se eligió esa opción en la obtención de las piezas para darle rapidez a las pruebas, cabe destacar que esto al ser un prototipo, a corto plazo se pretende cambiar las monturas por unas de aluminio, por ahora, el ensamblaje del prototipo es como muestra en la figura 3.2.8.



*Fig. 3.2.8.- Prototipo Ensamblado*

### 3.3 ADQUISICION DE IMÁGENES

Posterior al diseño y ensamblado del prototipo se realizaron las primeras pruebas de registro de hologramas. Para las pruebas se utilizó un disco de parametrización de  $150\mu\text{m}$  de diámetro impreso en un portaobjetos (ver figura 3.3.1)



NO.909 Calibration Slide

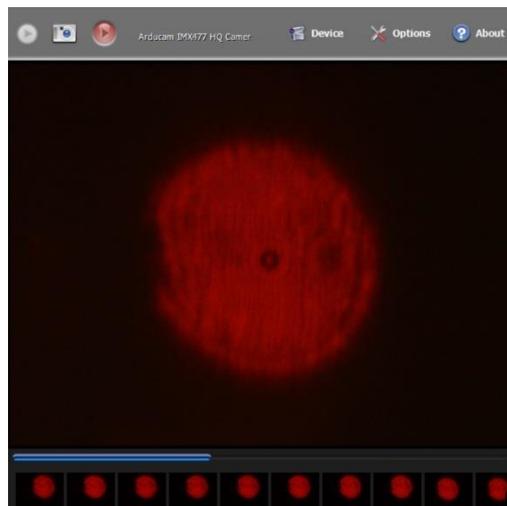
*Fig. 3.3.1.- Disco solido de  $150\mu\text{m}$*

Para el registro de hologramas se utilizó una cámara digital Arducam IMX477 de 12.3 megapíxeles (4056 x 3040), el tamaño del pixel de dicho sensor es de  $1.55\mu\text{m}$ , las dimensiones de este son de 30 mm x 31 mm, y tiene un peso de 53 gr (ver figura 3.3.2).



*Fig. 3.3.2.- Sensor IMX477*

El software que se utiliza para controlar el CMOS y registro de los hologramas es el MyCam (ver figura 3.3.3). El software permite variar parámetros de la cámara para un mejor registro de hologramas. Entre los parámetros de la cámara que nos ayudan a tener mejores hologramas es el tiempo de exposición. En nuestro caso usamos un valor de tiempo de exposición de 12 ms.

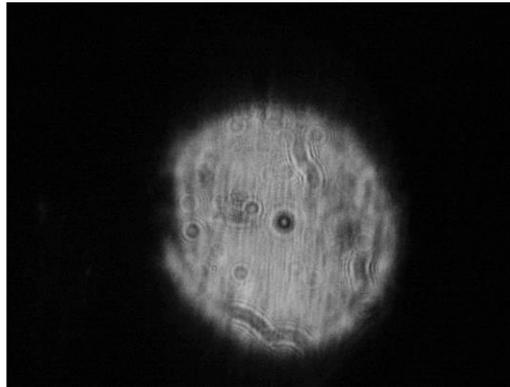


*Fig. 3.3.3.- Interfaz del software MyCam*

### **3.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

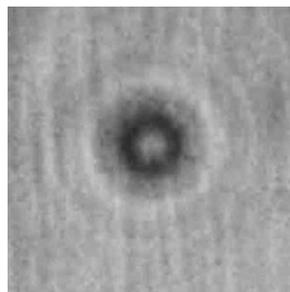
Como se mencionó en el capítulo 2, los hologramas se reconstruyen utilizando un computador. La ecuación 25 se utiliza para dicho propósito, y se utilizó el software MatLab para crear un código de reconstrucción de hologramas.

La función principal del código es leer el holograma, seleccionar la región donde se encuentra el holograma, y reconstrucción del holograma para diferentes posiciones del objeto (disco sólido), para finalmente entregar el resultado esperado (posición correcta de objeto y forma del objeto). En la figura 3.4.1 se muestra la lectura del holograma con el código, podemos ver el patrón de difracción que crea el disco sólido al difractarse la luz incidente a éste.



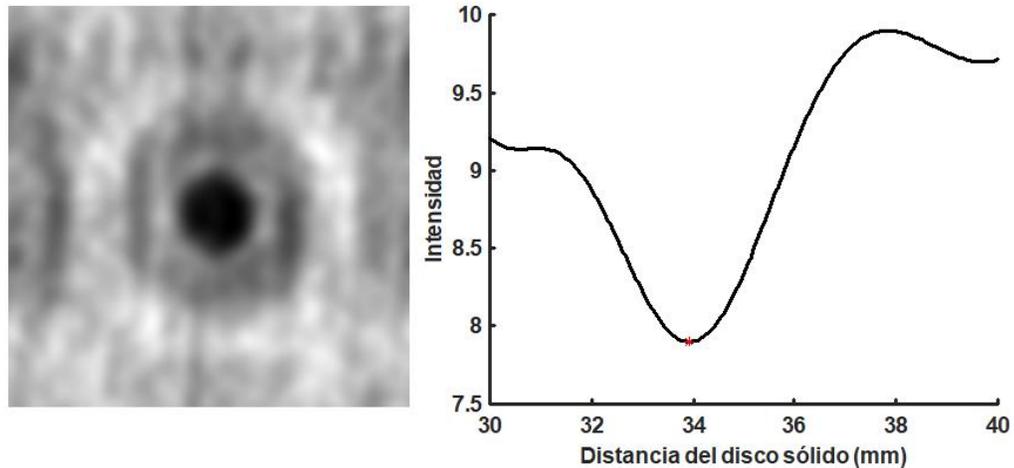
*Fig. 3.4.1.- Discos difractados de 150µm en aire.*

La figura 3.4.2 muestra la imagen recortada; se selecciona únicamente la región donde se encuentra el holograma. Teniendo el holograma se procede a reconstruir el disco como tal. El holograma reconstruido ocurre cuando la distancia del objeto corresponde a aquella en la que se obtuvo el holograma, el cual se representa cuando se obtiene un mínimo en la intensidad durante la reconstrucción del holograma.



*Fig. 3.4.2.- Disco recortado y difractado de 150µm*

Una parte del código realizado consta de un ciclo en el cual se hace un proceso iterativo de la distancia del objeto en la reconstrucción del holograma del disco sólido, esto con la finalidad de obtener el grafico que nos permite identificar el mínimo de intensidad (ver figura 3.4.3).



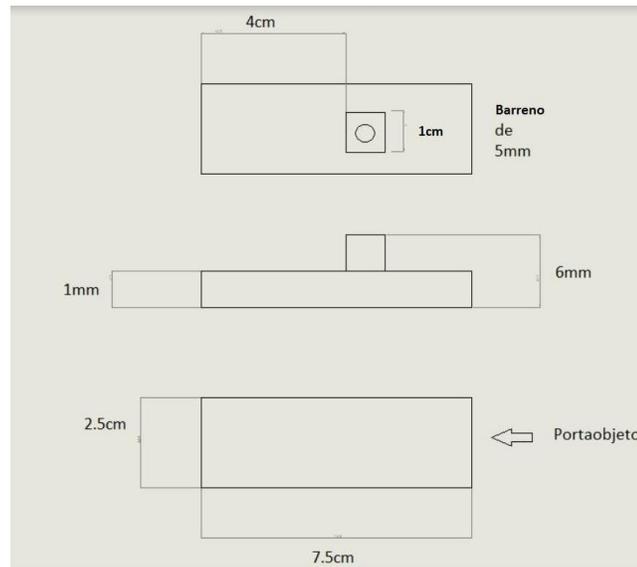
*Fig. 3.4.3.- Disco sólido reconstruido, y gráfica de perfil de intensidad vs. Distancia de reconstrucción.*

La primera prueba realizada fue hecha sin muestra, en aire, el cual será nuestra referencia para posteriormente obtener los índices de refracción de medios transparentes. Posteriormente caracterizamos el prototipo utilizando diferentes muestras. En esta etapa se mostró un prototipo funcional; donde se obtienen hologramas y se reconstruyen adecuadamente.

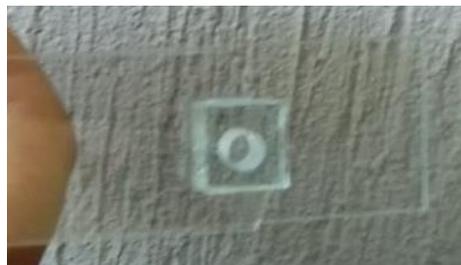
### **3.5 MUESTRAS UTILIZADAS**

El modo de empleo del prototipo consta de una primera etapa de calibración, en donde se busca la alineación del sensor CMOS, la montura del módulo laser y el disco sólido. La segunda etapa consiste en involucrar a los distintos medios a medir, y en la tercera etapa se registran los hologramas del disco solido de  $150\mu\text{m}$  de diámetro, el cual se encuentra colocado encima de la muestra a medir. Se realizaron pruebas para líquidos y vidrios. Los líquidos utilizados en las pruebas son: agua destilada, alcohol isopropílico y aceite de coco. Para el caso de vidrios se utilizaron: vidrio BK7, vidrio de sílica y vidrio SF2. Los índices de refracción de los líquidos utilizados son 1.33, 1.37 y 1.448 para agua, alcohol y aceite respectivamente. Y el índice de refracción de los vidrios son 1.51, 1.54 y 1.64 para BK7, sílica y SF2 respectivamente.

Las muestras de vidrio son de forma cilíndrica (diámetro=25mm, altura=1.811 mm, 1.808 mm y 1.775 mm correspondiente a vidrio BK7, sílica y SF2 respectivamente). Para las pruebas en líquidos se desarrolló un depósito cubico hecho de vidrio, el depósito tiene una capacidad de 5 mm<sup>3</sup> (ver figura 3.4.5 y 3.4.6).



*Fig. 3.5.1.- Diseños para depósito de líquidos.*



*Fig. 3.5.2.- Deposito de líquidos*

Al realizar el análisis de los líquidos, el depósito se llenó hasta el tope y se le colocó otro sustrato encima de éste para evitar que se formaran meniscos con el líquido, e impedir que se evapore algunos líquidos como alcohol tal y como se muestra en la figura 3.4.6.



*Fig. 3.5.3. Arreglo final para análisis de líquidos*

### **3.6 CONCLUSIÓN**

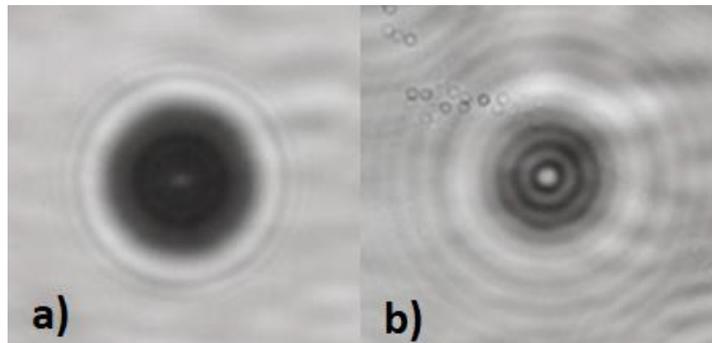
En este capítulo se han descrito el diseño y funcionamiento del prototipo para medir índice de refracción en medios transparentes. Se utilizaron dos muestras; vidrio y líquidos. Se explica cómo se obtienen los hologramas y su reconstrucción.

## 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan las capacidades en la medición del instrumento. También se presentan mediciones de IR para vidrios y líquidos usando el prototipo desarrollado en este trabajo.

### 4.1 REGIMENES DE DIFRACCIÓN

En la figura 4.1.1 se muestra el patrón de difracción del disco sólido para el régimen de Fresnel y de Fraunhofer. Las diferencias son claras, en nuestro caso buscando la portabilidad del prototipo, se realizaron los diseños para que el sistema fuera más compacto, Debido a esto se procedió a trabajar en el régimen de Fresnel, ya que, en el régimen de Fraunhofer, la fuente de iluminación y el plano de observación se encuentran a una distancia  $z$  “muy grande” de la abertura de difracción.



*Fig.4. 1. 1.- Disco solido difractado en a) Régimen de Fresnel b) Régimen de Fraunhofer*

### 4.2 PROFUNDIDAD DE FOCO

La holografía digital esta inherentemente limitada por la resolución de la cámara digital (CD). En las CD actuales, el tamaño del píxel está en el orden de 1 a 10  $\mu m$ . Puesto que el sensor de la CD no puede resolver franjas de interferencia más finas que el tamaño del píxel, el ángulo de interferencia entre el haz objeto y de referencia está limitado a valores pequeños.

Por esta razón la apertura numérica (NA) de un holograma digital de una partícula está limitado a valores del orden de 0.1. Debido al valor acotado de la NA de la CD se produce un efecto conocido como profundidad de foco.

El valor de la profundidad de foco puede ser demasiado grande dependiendo de las dimensiones del disco y la longitud de onda de la iluminación que se utiliza. Cuando el esparcimiento hacia adelante se usa en holografía, una imagen de un disco se forma principalmente por el lóbulo central de difracción que es la mitad de la apertura numérica de  $\Omega = \lambda/d$ , donde  $\Omega$  es la apertura efectiva del holograma,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $d$  es el diámetro de la partícula.

La apertura es usualmente mucho menor que la apertura determinada por el tamaño del holograma, de esa forma la imagen del disco formado por esparcimiento hacia adelante tiene una profundidad de foco muy grande, generalmente en el orden de milímetros. La profundidad de foco se determina por:

$$2\delta = \frac{d^2}{\lambda}$$

En la tabla 4.2.1 se muestra la profundidad de foco para diferentes tamaños de discos solidos iluminados con dos longitudes de onda. Se puede notar que la profundidad de foco para algunas de los discos es del orden de milímetros.

Este efecto limita la medición que se hace en este trabajo. Además, estos resultados nos muestran que la mejor opción en nuestro trabajo es usar discos solidos de 150 $\mu\text{m}$  iluminadas con una fuente de luz roja (0.650 $\mu\text{m}$ ).

d( $\mu\text{m}$ )	2 $\delta$ ( $\mu\text{m}$ )
150 $\mu\text{m}$	230.76
200 $\mu\text{m}$	307.69
400 $\mu\text{m}$	615.38
800 $\mu\text{m}$	1230.76
1600 $\mu\text{m}$	2461.53

Tabla 4.2.1.- Profundidad de foco de los discos solidos utilizados.

### **4.3 REGISTRO Y RECONSTRUCCIÓN DEL HOLOGRAMA**

El prototipo desarrollado consta de cuatro elementos importantes, estos son: fuente de iluminación, elemento usado para medir índice de refracción, muestra que se estudia y sensor en donde se registra la información. En nuestro análisis consideramos que la fuente de iluminación en comparación con el tamaño del disco solido emite ondas de iluminación planas. El sistema usa una computadora conectada al sensor CMOS para el almacenamiento de hologramas y su posterior análisis.

### **4.4 RESOLUCIÓN DEL SISTEMA**

Para la determinación de la resolución del sistema, como se mencionó anteriormente se utilizó un micrómetro cuya resolución es de  $0.01\mu\text{m}$ , éste fue instalado en el prototipo para variar la distancia del disco sólido al CMOS.

Las pruebas para determinar la resolución del sistema se realizaron colocando el disco sólido del plano de observación una distancia aproximada de 24 mm, esta fue nuestra distancia de referencia. Posteriormente se dieron incrementos a la posición disco solido de 0.4mm hasta alcanzar una distancia de 25.6mm. Incrementos menores a 0.4 mm no fueron detectados por el sistema. Algunos de los hologramas registrados para este fin se muestran en la figura 4.4.1. En la misma figura se puede ver la posición calculada (mínimo del valor de intensidad) y forma del disco sólido.

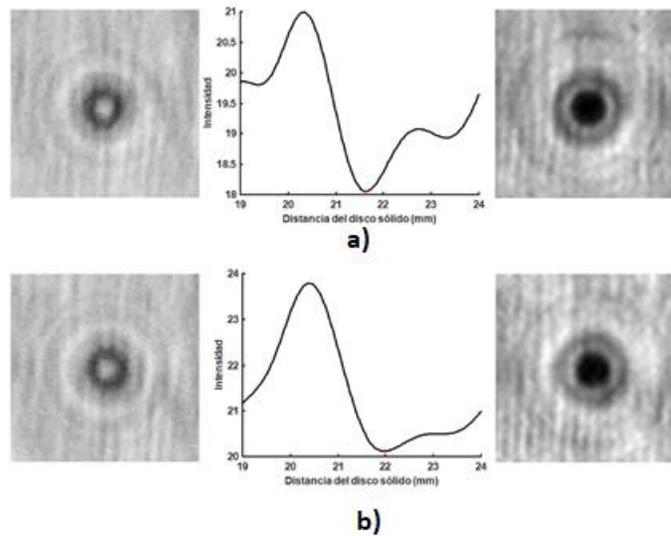


Fig. 4.4.1.- Holograma, Grafica de intensidad y Reconstrucción del disco sólido en diferentes distancias. a) 24mm b) 25.6 mm.

En la tabla 4.4.1 se muestra el error absoluto y relativo para cada uno de los hologramas utilizados para determinar la resolución. Se puede ver que no hay una tendencia específica en el valor del error. Por otro lado, se puede apreciar que se obtiene un error absoluto promedio de 1.85mm, y un error relativo promedio de 7.47%.

En 0.4mm los resultados fueron los siguientes:

Real(mm)	Medido(mm)	Error Absoluto(mm)	Error relativo (%)
24	22.44	1.56	6.5
24.4	22.59	1.81	7.41
24.8	22.61	2.19	8.83
25.2	23.52	1.68	6.66
25.6	23.57	2.03	7.92

Tabla 4.4.1.- Tabla de error para 0.4mm.

La discrepancia en el valor real y medido puede deberse a varios factores, tales como: ruido en el frente de onda que ilumina el disco sólido, desalineaciones en el sistema óptico, tamaño del píxel y errores numérico durante la reconstrucción de hologramas.

Con estos resultados consideramos que el sistema óptico permite resolver

*distancias lineales de aproximadamente 0.4mm.*

#### **4.5 MEDICIÓN DE INDICE DE REFRACCIÓN EN MEDIOS TRANSPARENTES**

El registro de hologramas se hizo con el disco sólido colocado a una distancia aproximada de 25 mm y 35 mm al plano de observación (superficie del CMOS) para los vidrios y líquidos de prueba respectivamente. Las muestras se colocaron en su respectiva montura entre el disco sólido y el plano de observación. Se tuvo cuidado de tener cada una de las superficies alineadas, es decir; el plano de iluminación, el plano donde se encuentra el disco sólido, el plano de la muestra y el plano del CMOS. Las muestras de vidrio son de forma cilíndrica (diámetro = 25mm, altura = 1.811 mm, 1.808 mm y 1.775 mm correspondiente a vidrio BK7, sílica y SF2 respectivamente). El vidrio BK7, Sílica y SF2 tienen un valor de su índice de refracción aproximado de 1.51, 1.54 y 1.64 respectivamente. Los líquidos utilizados en este trabajo son agua destilada ( $n = 1.33$ ), alcohol isopropílico ( $n = 1.375$ ) y aceite de oliva ( $n = 1.448$ ).

En la figura 4.5.1 se muestran los hologramas del disco sólido con vidrio como muestra, y su respectiva reconstrucción. Podemos ver que a simple vista no hay diferencia en los hologramas, sin embargo, al reconstruir numéricamente estos, se obtienen distancias diferentes en la posición del disco sólido. La reconstrucción de los hologramas obtenidos nos permitirá determinar la distancia vertical de cada uno de estos. La distancia vertical está relacionada con el camino óptico del disco sólido, y por consiguiente con el índice de refracción de las muestras. La posición del disco sólido ocurre cuando se da la mínima intensidad en el perfil de intensidad contra distancia de reconstrucción (ver figura 4.5.1). Es importante notar que estos hologramas lucen ligeramente más ruidosos que los obtenidos en aire (sin muestra).

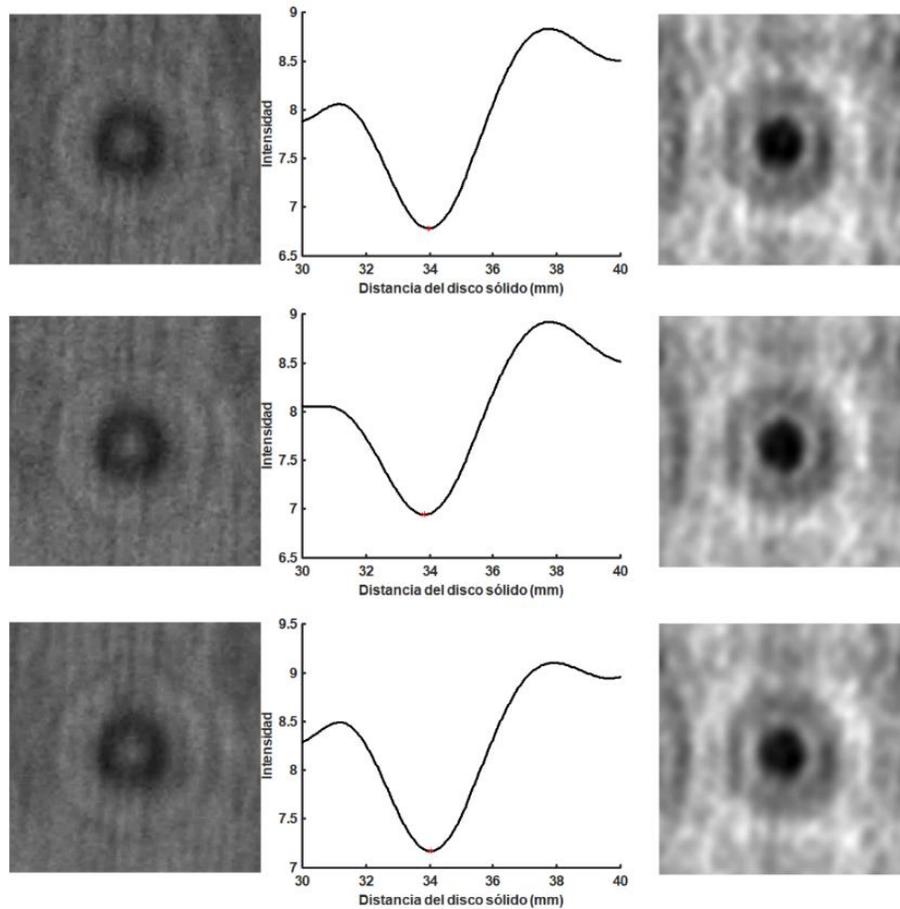


Fig. 4.5.1.- Disco reconstruido de  $150\mu\text{m}$  difractados en régimen de Fresnel en diversos medios.

(a) BK7 (b)Silica(c)SF2

Por otro lado, en la figura 4.5.2 mostramos los hologramas con líquidos como muestra. Para la reconstrucción de los hologramas del disco en líquidos, estos lucen más nítidos que los de los vidrios. Esto repercute en el valor de la distancia del disco sólido durante la reconstrucción de estos.

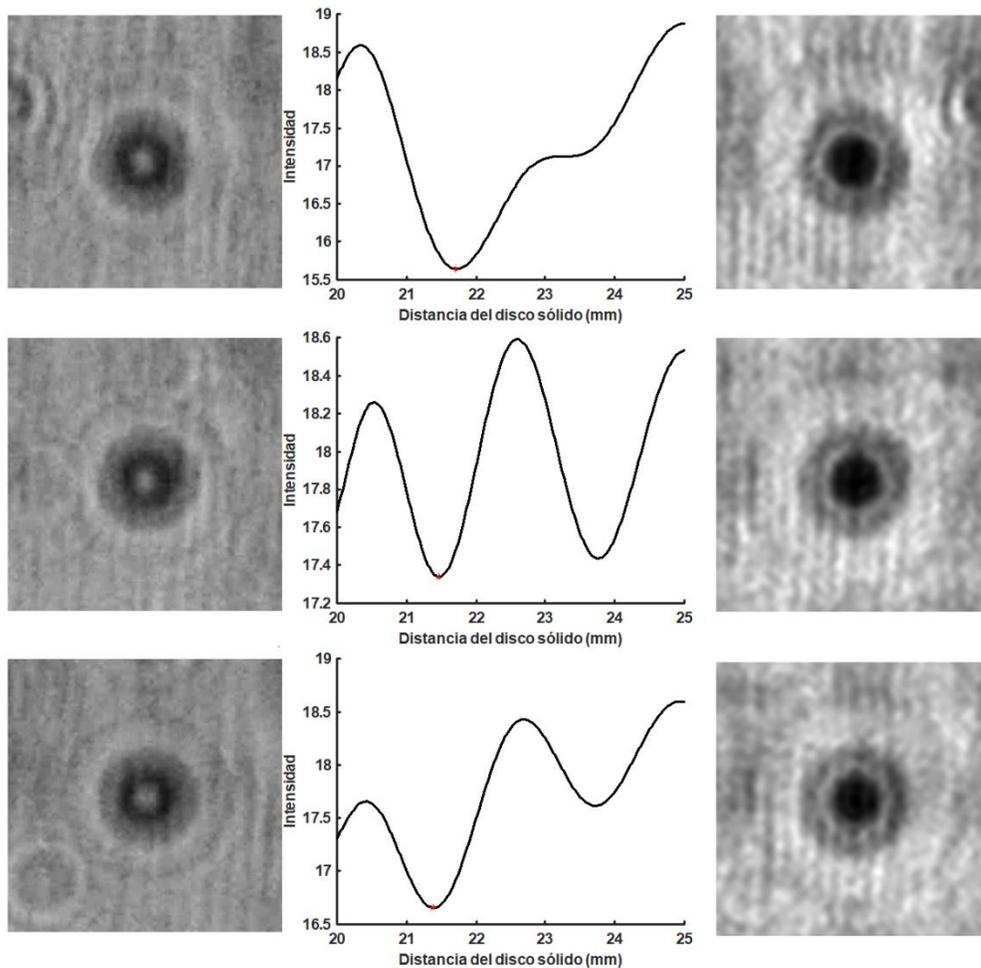


Fig. 4.5.2.- Disco reconstruido de  $150\mu\text{m}$  difractados en régimen de Fresnel en diversos medios.

(a) Agua Destilada (b) Alcohol Isopropílico (c) Aceite

#### 4.6 DETERMINACIÓN DEL INDICE DE REFRACCIÓN

El sistema óptico presentado en este trabajo para medir el índice de refracción de medios transparentes entrega como resultado la distancia del disco sólido al plano de observación. Esta distancia está relacionado al índice de refracción de la muestra debido al camino óptico que viaja el frente de onda desde el disco sólido al plano de observación. Por lo que, para medir el IR, se determina una curva de calibración con muestras de IR conocidos.

Para la determinación de las distancias del disco sólido de los IR conocidos, se realizaron registros de 10 hologramas para cada medio en estudio, teniendo los

hologramas, se calcula el promedio de la distancia para cada caso. En las figuras 4.6.1 y 4.6.2 representamos dos curvas de calibración para líquidos y vidrios respectivamente. Estas curvas nos muestran que el sistema presentado tiene una resolución aproximada de 0.01 unidades de índice de refracción. **Es importante mencionar, que el sistema determina el IR para muestras que tengan la misma configuración, es decir, si son vidrios; los vidrios deben tener el mismo grueso que los vidrios usados para la calibración. Lo mismo es aplicable para los líquidos.**

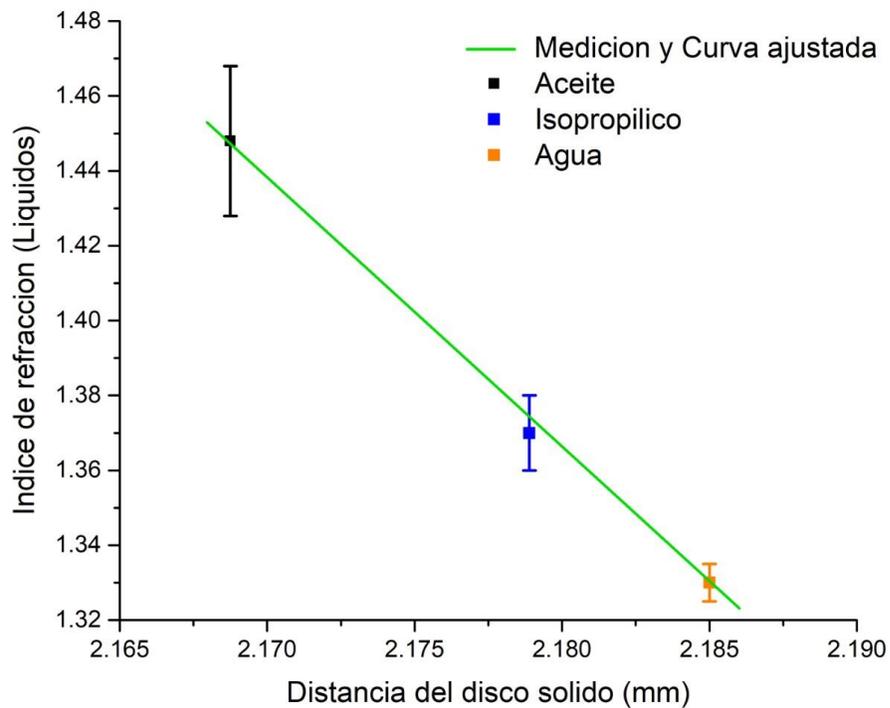


Fig. 4.6.1.- Curva de índices de refracción en líquidos

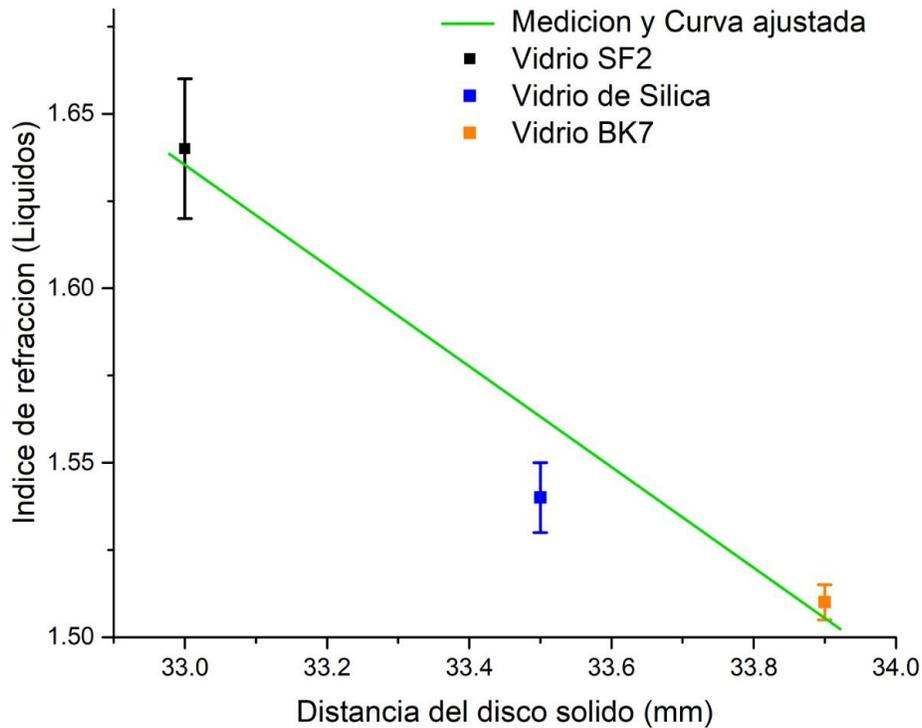


Fig. 4.6.2.- Curva de índices de refracción en Vidrios

#### 4.7 CONCLUSIÓN

En este capítulo se muestra las capacidades que tiene el prototipo para medir IR en medios transparentes. El sistema tiene una resolución lineal de aproximadamente 0.4mm. Sin embargo, esta medida no está relacionada directamente con la resolución en la medición de IR del instrumento. Por otro lado, se utilizaron vidrios y líquidos como medios para probar el sistema. Con estas medidas, calculamos que el prototipo tiene una resolución aproximada de 0.01 unidades de IR.

## 5.CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

El desarrollo de este trabajo ha demostrado que se pueden obtener índices de refracción en medios transparentes usando holografía digital en línea. El objetivo principal de este estudio es el de generar un refractómetro **simple, robusto y funcional**. El sistema desarrollado está compuesto de un módulo laser semiconductor que opera a 650nm, un disco solido colocado sobre el material al que se le medirá el índice de refracción y una cámara digital para la obtención de hologramas. Además de estos elementos, son necesarios códigos computacionales para registro, reconstrucción y análisis de hologramas.

El proceso por el cual se da la medición del índice de refracción en medios transparentes consiste en medir la distancia del disco sólido y relacionando esa distancia con el índice de refracción del medio de interés. Se sabe que la distancia del disco solido va en disminución cuando la diferencia de camino óptico se incrementa, esto es debido al cambio de índice de refracción del medio. Aprovechamos este efecto para relacionar la distancia de la partícula con el índice de refracción del medio.

El prototipo desarrollado tiene una resolución lineal al desplazamiento de aproximadamente 0.4mm. En el proceso para mostrar el desempeño del prototipo se obtuvieron hologramas de un disco solido con un diámetro de 150 $\mu$ m en aire, vidrios (BK7, Silica y SF2) y líquidos (Agua destilada, alcohol isopropílico y aceite de coco). Los resultados de estos experimentos muestran que el refractómetro tiene una resolución del orden de **0.01 RIU**.

Es claro que el instrumento tiene sus limitaciones, mencionaremos las siguientes. La resolución es relativamente baja en comparación con otros instrumentos utilizados para medir índice de refracción.

El instrumento no mide el valor absoluto de índice de refracción del medio, más bien el IR se relaciona a la distancia de la posición del disco sólido. Además, el IR medido para el caso de líquidos es la combinación del depósito y el líquido. De la misma manera, para el caso de vidrios, el IR depende del grueso de la muestra. Si el sistema está mal alineado esto impacta fuertemente en la medición. Para determinar la medición se procesa un holograma digital y la reconstrucción toma del orden 73 segundos, y el tiempo de procesado depende del tamaño del holograma. Finalmente, para determinar el IR se tiene que relacionar a una curva de calibración de índices de refracción conocidos calculada con antelación.

## 5.2 TRABAJO A FUTURO

En esta primera etapa de este proyecto se consiguieron los objetivos principales; i.e., el desarrollo del prototipo y la resolución de 0.01 RIU. Sin embargo, el instrumento requiere de múltiples mejoras, de las cuales se planea realizar en la siguiente etapa de este proyecto, y entre las que podemos mencionar las siguientes:

- La mayoría de las piezas son de plástico, en la siguiente versión del prototipo se harán metal (principalmente aluminio), esto nos ayudara a tener un instrumento robusto y estable.
- La resolución del sistema es del orden de 0.01 RIU, aunque esta resolución es respetable, es importante incrementar su RIU para hacerlo competitivo en comparación con otros instrumentos. Algunas soluciones a este problema es utilizar otras configuraciones para general hologramas.
- Se buscará implementar algoritmos de reconstrucción de hologramas más eficientes, i.e., mayor velocidad en el procesado, y mayor exactitud en la determinación de la posición del disco sólido.

-

- En la siguiente etapa se buscará reducir el ruido presente en los hologramas. Esto se puede lograr teniendo una alineación adecuada de los elementos que componen el prototipo, una fuente de luz con menos ruido, y con algoritmos computacionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Malacara D. Óptica básica. México: Fondo cultural económica; 3ra Ed. 2015
2. Shpaisman, Hagay & Krishnatreya, Bhaskar & Grier, David. (2012). Holographic microrefractometer. Applied Physics Letters. 101. 10.1063/1.4747168.
3. N. Pavillon, J. Kuhn, C. Moratal, P. Jourdain, C. Depeursinge, P. J. Magistretti, and P. Marquet, "Early cell death detection with digital holographic microscopy," PLoS ONE, vol 7, p.e30912, Jan 2012
4. Burchard, Ulrich, and Olaf Medenbach. "The refractometer." The Mineralogical Record, vol. 40, no. 2, 2009, p. 135-159.
5. M. Alonso Murias, Diseño y Construcción de una plataforma para el análisis experimental de la resonancia de plasmon superficial en fibra óptica, CIO, 2019
6. Adrián W. Coronel Arredondo, Sistema para medir velocidad en flujo de fluidos en 3D, CIO, 2011
7. D. Psaltis, S. R. Quake, y C. Yang, «Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics», nature, vol. 442, n.o 7101, p. 381, 2006.
8. N. Múnera, «Interferometría Holográfica Digital en Tiempo Real: Aplicación en la Cuantificación de Deformaciones Mecánicas», PhD Thesis, Tesis de Maestría, 2013.
9. Y. Zou, Z. Shen, X. Chen, Z. Di, y X. Chen, «An integrated tunable interferometer controlled by liquid diffusion in polydimethylsiloxane», Opt. Express, vol. 20, n.o 17, pp. 18931–18936, 2012.
10. M. I. Lapsley, I.-K. Chiang, Y. B. Zheng, X. Ding, X. Mao, y T. J. Huang, «A single-layer, planar, optofluidic Mach–Zehnder interferometer for label-free detection», Lab. Chip, vol. 11, n.o 10, pp. 1795–1800, 2011.
11. L. Chin, A. Liu, Y. Soh, C. Lim, y C. Lin, «A reconfigurable optofluidic Michelson interferometer using tunable droplet grating», Lab. Chip, vol. 10, n.o 8, pp. 1072–1078, 2010.
12. L. Chin, A. Liu, C. Lim, C. Lin, T. Ayi, y P. Yap, «An optofluidic volume refractometer using Fabry–Pérot resonator with tunable liquid microlenses», Biomicrofluidics, vol. 4, n.o 2, p. 024107, 2010.
13. A. N. Chryssis, S. M. Lee, S. B. Lee, S. S. Saini, y M. Dagenais, «High sensitivity

- evanescent field fiber Bragg grating sensor», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, n.o 6, pp. 1253–1255, 2005.
14. J. Liu, M. A. Eddings, A. R. Miles, R. Bukasov, B. K. Gale, y J. S. Shumaker-Parry, «In situ microarray fabrication and analysis using a microfluidic flow cell array integrated with surface plasmon resonance microscopy», *Anal. Chem.*, vol. 81, n.o 11, pp. 4296–4301, 2009.
  15. Schnars U, Jüptner W (2005) Digital holography, Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques
  16. Leith EN, Upatnieks J (1962) Reconstructed wavefronts and communication theory. *Jour Opt Soc Amer* 52:1123-1130.
  17. Leith EN, Upatnieks J (1964) Wavefront reconstruction with diffused illumination and three dimensional objects. *Journ Opt Soc Amer* 54:1295-1301.
  18. Hariharan P (1984) *Optical Holography*. Cambridge University Press, Cambridge.
  19. Kreis T (1996) *Holographic Interferometry*. Akademie, Berlin.
  20. A. Schimpf, D. Bucci, M. Nannini, A. Magnaldo, L. Couston, y J.-E. Broquin, «Photothermal microfluidic sensor based on an integrated Young interferometer made by ion exchange in glass», *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 163, n.o 1, pp. 29–37, 2012.
  21. S. Sumriddetchkajorn, K. Chaitavon, y J. Nukeaw, «A free-space interferometric refractometer structure with simple microfluidic chips», *IEEE Sens. J.*, vol. 12, n.o 2, pp. 404–409, 2011.
  22. E. Bae, N. Bai, A. Aroonual, A. K. Bhunia, y E. D. Hirleman, «Label-free identification of bacterial microcolonies via elastic scattering», *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 108, n.o 3, pp. 637–644, 2011.
  23. E. Bae et al., «Portable bacterial identification system based on elastic light scatter patterns», *J. Biol. Eng.*, vol. 6, n.o 1, p. 12, 2012.
  24. A. E. Bruno, B. Krattiger, F. Maystre, y H. M. Widmer, «On-column laser-based refractive index detector for capillary electrophoresis», *Anal. Chem.*, vol. 63, n.o 23, pp. 2689–2697, 1991
  25. Demetrakopoulos TH, Mittra R (1974) Digital and optical reconstruction of images from suboptical diffraction patterns. *Appl Opt* 13(3):665-670.
  26. Kreis T, Jüptner W (1997) Principles of digital holography. In: Jüptner W, Osten W

- (eds) Proc 3rd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. Akademie, Berlin, pp 353-363.
27. Gabor D (1948) A new microscopic principle. *Nature* 161:777-778
  28. Gabor D (1949) Microscopy by reconstructed wavefronts. *Proc Roy Soc* 197:454-487
  29. Gabor D (1951) Microscopy by reconstructed wavefronts: 2. *Proc Phys Soc* 64:449-469
  30. Leith EN, Upatnieks J (1962) Reconstructed wavefronts and communication theory. *Jour Opt Soc Amer* 52:1123-1130
  31. Leith EN, Upatnieks J (1964) Wavefront reconstruction with diffused illumination and three dimensional objects. *Journ Opt Soc Amer* 54:1295-1301
  32. Klein MV, Fumrtak TE (1986) *Optics*. 2nd ed Wiley, New York
  33. Schnars U, Jüptner W (1994) Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction. *Applied Optics* 33(2):179-181
  34. Schnars U (1994) Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms. *Journ Opt Soc Am A* 11(7):2011-2015, reprinted (1997) In: Hinsch K, Sirohi R(eds). *SPIE Milestone Series MS 144*, pp 661 - 665
  35. H.Meng, G.Pan, Y. Pu and S.H. Woodward, "Holographic particle image velocimetry from film to digital recording", *Measurements Science and Technology*, 15,pp. 673-685(2004).

# ANEXOS

## ANEXO A. PLANOS DE LOS DISEÑOS REALIZADOS EN SOLIDWORKS PARA LAS PIEZAS DEL PROTOTIPO

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

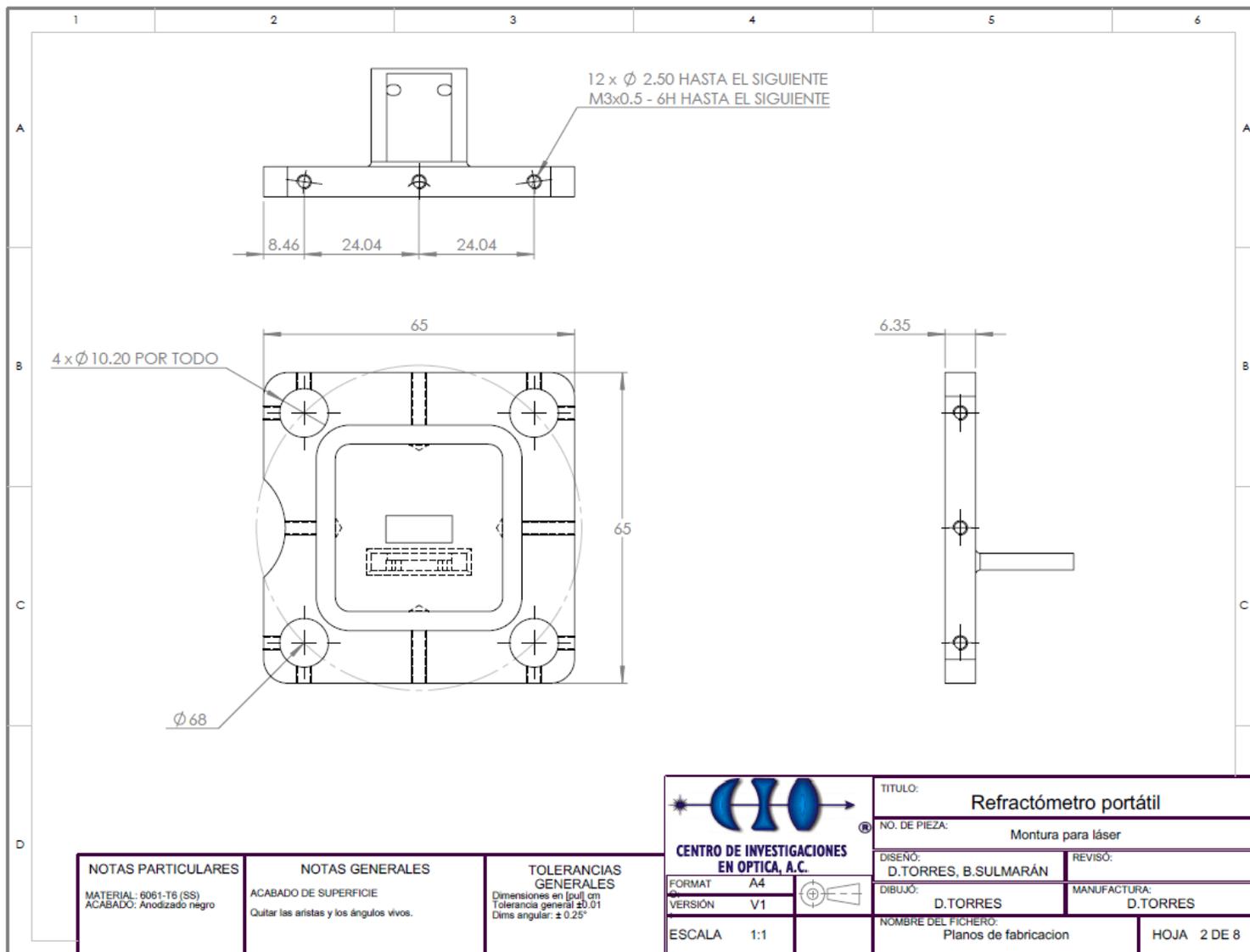
N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
1	Montura para láser
2	Barras guía 10mm
3	Diodo láser
4	Montura patrón de difracción
5	Montura para espaciador
6	Montura muestras
7	Cámara CCD
8	Montura de cámara
9	Housing control y batería

<b>NOTAS PARTICULARES</b> MATERIAL: 6061-T6 (SS) ACABADO: Anodizado negro	<b>NOTAS GENERALES</b> ACABADO DE SUPERFICIE Quitar las aristas y los ángulos vivos.	<b>TOLERANCIAS GENERALES</b> Dimensiones en [pul] cm Tolerancia general ±0.01 Dims angular: ±0.25°
---	--	---

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.**

FORMAT: A4	VERSION: V1	ESCALA: 2:3
------------	-------------	-------------

<b>TÍTULO:</b> Refractómetro portátil	
<b>NO. DE PIEZA:</b> Ensamble general	
<b>DISEÑO:</b> D.TORRES, B.SULMARÁN	<b>REVISÓ:</b>
<b>DIBUJÓ:</b> D.TORRES	<b>MANUFACTURA:</b> D.TORRES
<b>NOMBRE DEL FICHERO:</b> Planos de fabricacion	
<b>HOJA 1 DE 8</b>	

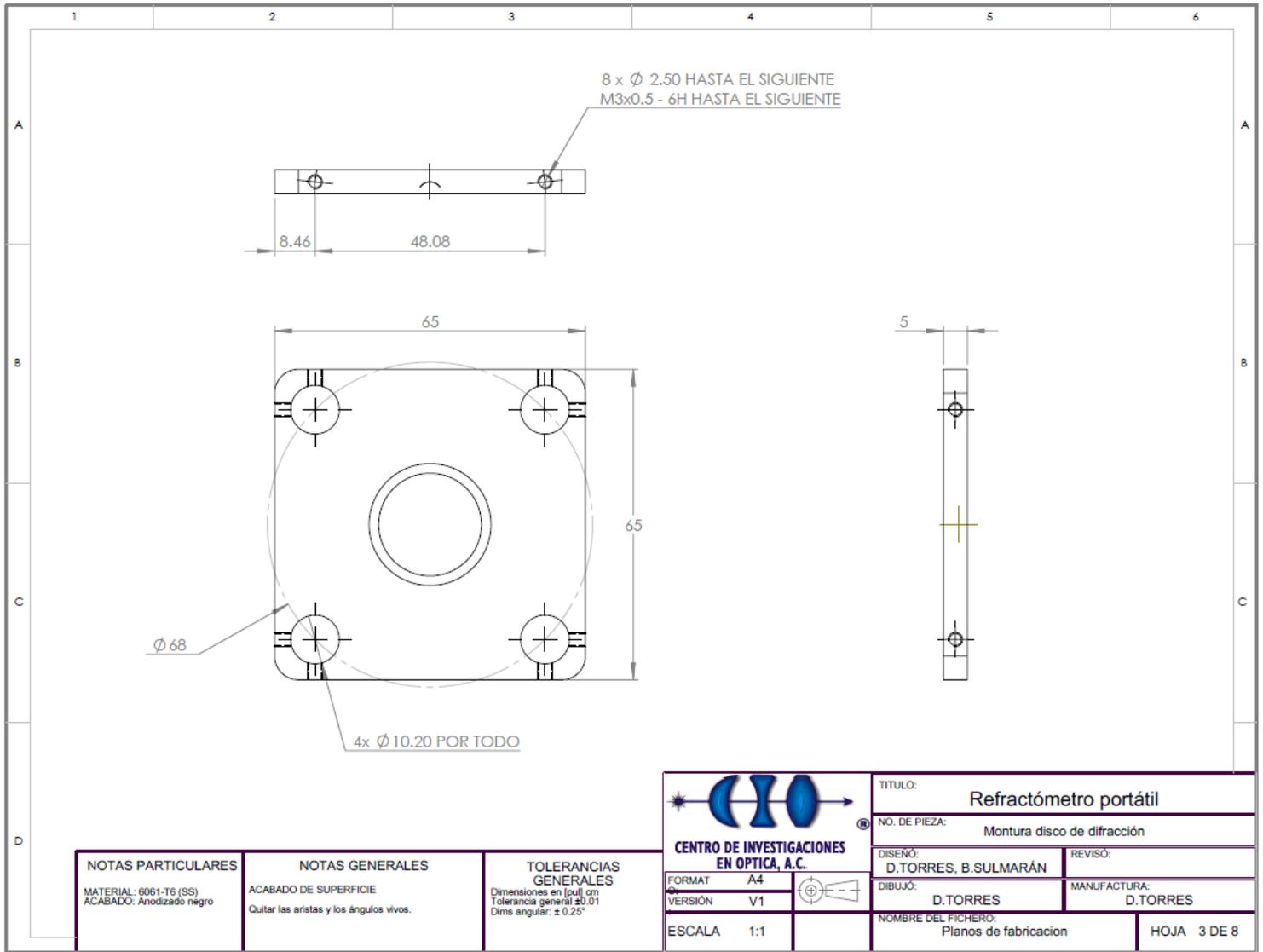


**NOTAS PARTICULARES**  
 MATERIAL: 6061-T6 (SS)  
 ACABADO: Anodizado negro

**NOTAS GENERALES**  
**ACABADO DE SUPERFICIE**  
 Quitar las aristas y los ángulos vivos.

**TOLERANCIAS GENERALES**  
 Dimensiones en [mm]  
 Tolerancia general: ±0.01  
 Dims angular: ± 0.25°

 <b>CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.</b>		TÍTULO: <b>Refractómetro portátil</b>	
		NO. DE PIEZA: Montura para láser	
FORMAT A4		DISEÑO: D.TORRES, B.SULMARÁN	REVISÓ:
VERSIÓN V1		DIBUJÓ: D.TORRES	MANUFACTURA: D.TORRES
ESCALA 1:1	NOMBRE DEL FICHERO: Planos de fabricacion		HOJA 2 DE 8



**NOTAS PARTICULARES**  
MATERIAL: 6061-T6 (SS)  
ACABADO: Anodizado negro

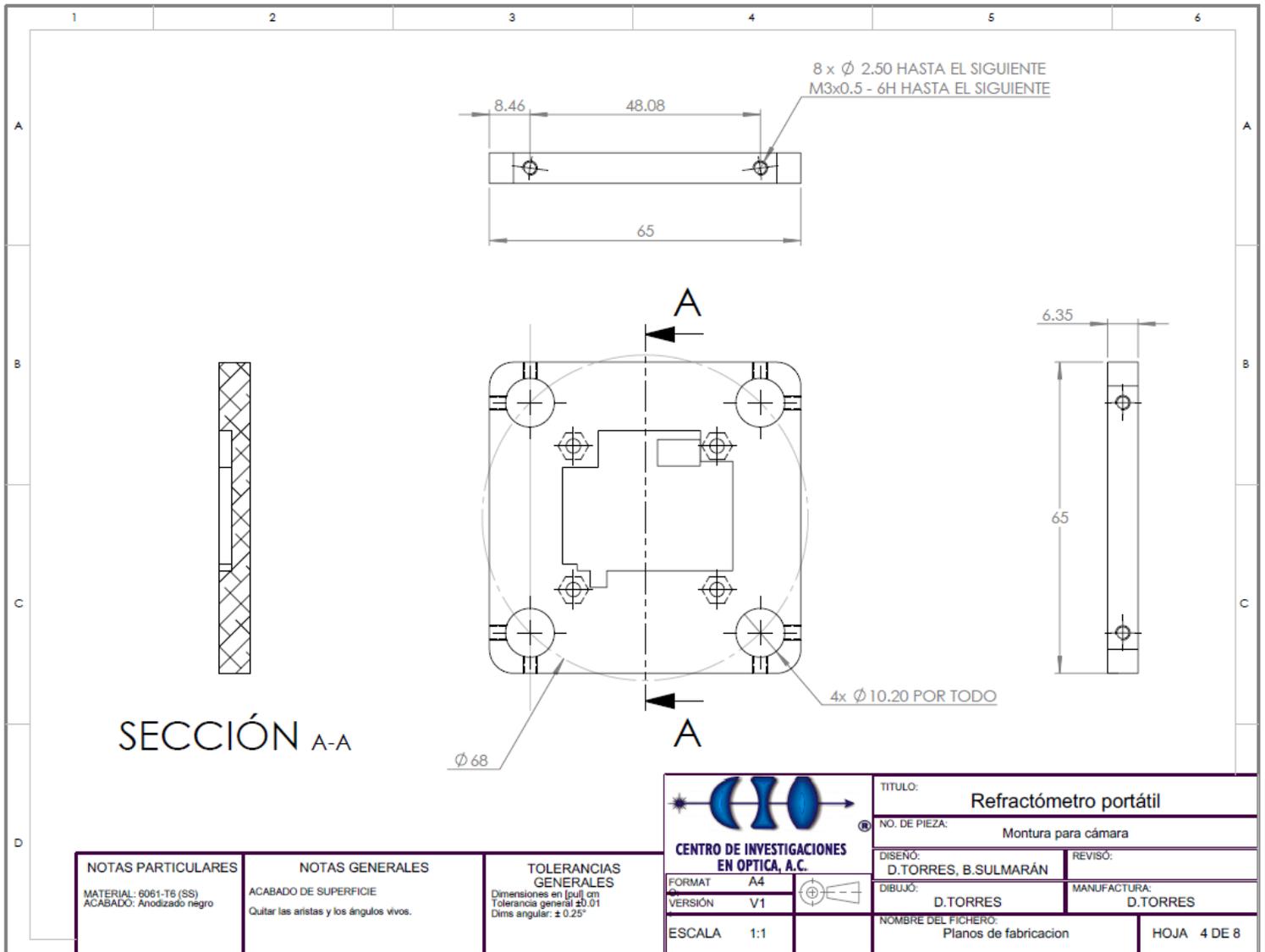
**NOTAS GENERALES**  
ACABADO DE SUPERFICIE  
Quitar las aristas y los ángulos vivos.

**TOLERANCIAS GENERALES**  
Dimensiones en [mil] cm  
Tolerancia general  $\pm 0.01$   
Dims angular:  $\pm 0.25^\circ$

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.**

FORMAT	A4
VERSIÓN	V1

<b>TÍTULO:</b> Refractómetro portátil	
<b>NO. DE PIEZA:</b> Montura disco de difracción	
<b>DISEÑO:</b> D.TORRES, B.SULMARÁN	<b>REVISÓ:</b>
<b>DIBUJO:</b> D.TORRES	<b>MANUFACTURA:</b> D.TORRES
<b>NOMBRE DEL FICHERO:</b> Planos de fabricacion	
<b>HOJA</b> 3 DE 8	



NOTAS PARTICULARES
MATERIAL: 6061-T6 (SS) ACABADO: Anodizado negro

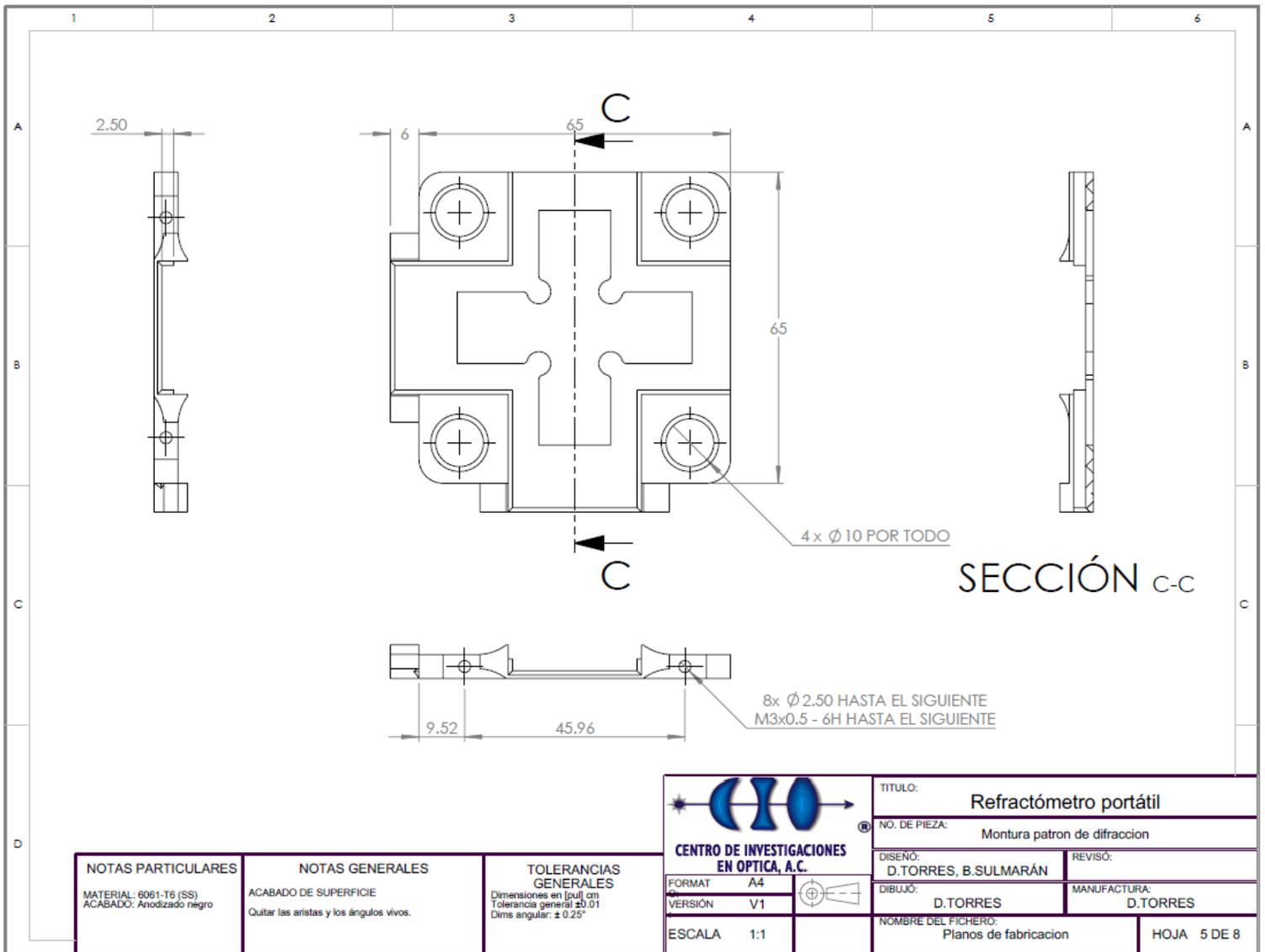
NOTAS GENERALES
ACABADO DE SUPERFICIE Quitar las aristas y los ángulos vivos.

TOLERANCIAS GENERALES
Dimensiones en [mil] cm Tolerancia general $\pm 0.01$ Dims angular: $\pm 0.25^\circ$

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.**

FORMAT A4  
VERSION V1  
ESCALA 1:1

TITULO: Refractómetro portátil	
NO. DE PIEZA: Montura para cámara	
DISEÑO: D.TORRES, B.SULMARÁN	REVISÓ:
DIBUJÓ: D.TORRES	MANUFACTURA: D.TORRES
NOMBRE DEL FICHERO: Planos de fabricacion	
HOJA 4 DE 8	



SECCIÓN C-C

NOTAS PARTICULARES
MATERIAL: 6061-T6 (SS) ACABADO: Anodizado negro

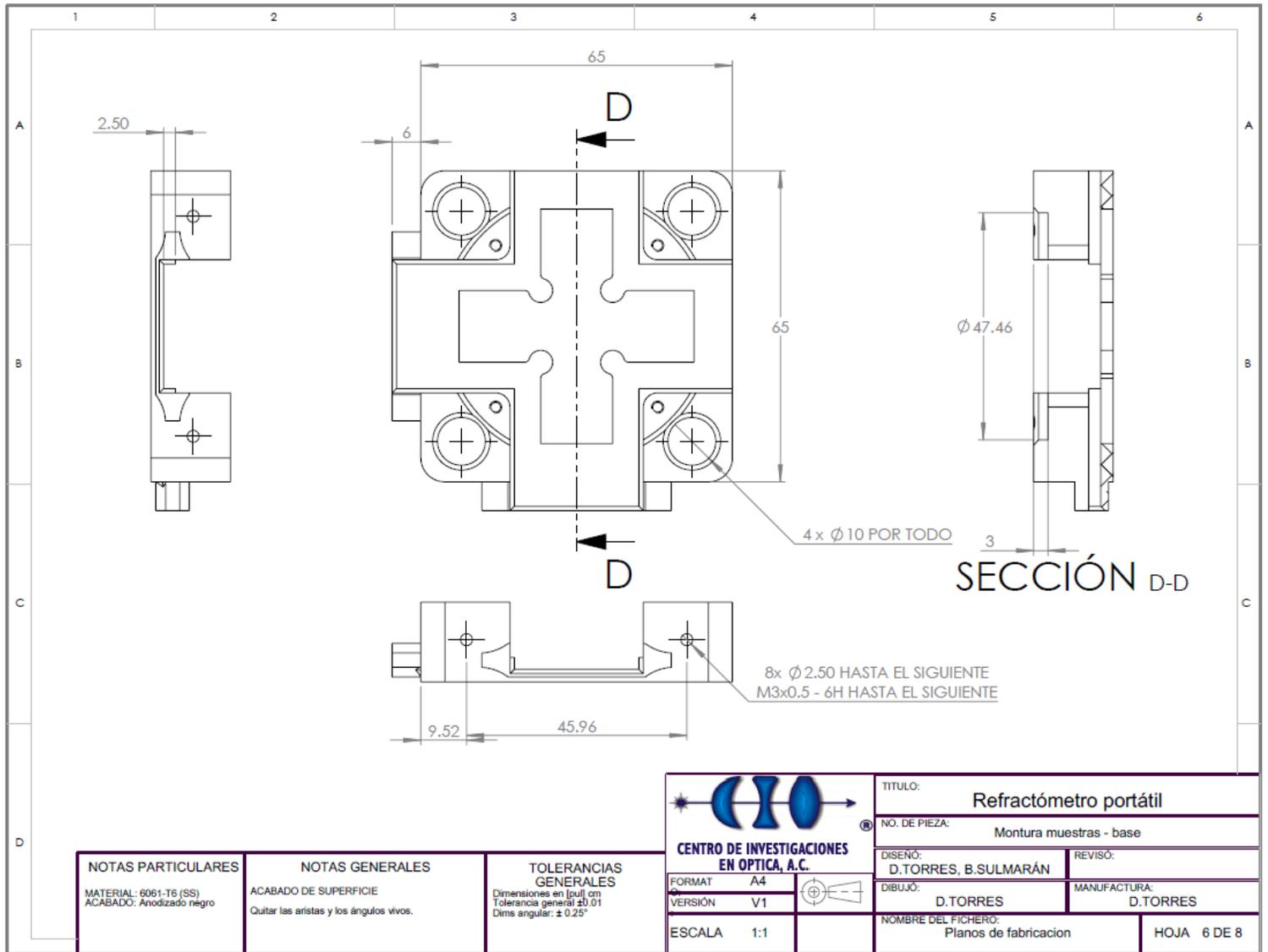
NOTAS GENERALES
ACABADO DE SUPERFICIE Quitar las aristas y los ángulos vivos.

TOLERANCIAS GENERALES
Dimensiones en [mil] cm Tolerancia general $\pm 0.01$ Dims angular: $\pm 0.25^\circ$


  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.**

FORMAT	A4
VERSIÓN	V1
ESCALA	1:1

TÍTULO: <b>Refractómetro portátil</b>	
NO. DE PIEZA: Montura patron de difraccion	
DISEÑO: D.TORRES, B.SULMARÁN	REVISÓ:
DIBUJÓ: D.TORRES	MANUFACTURA: D.TORRES
NOMBRE DEL FICHERO: Planos de fabricacion	
HOJA 5 DE 8	



NOTAS PARTICULARES
MATERIAL: 6061-T6 (SS) ACABADO: Anodizado negro

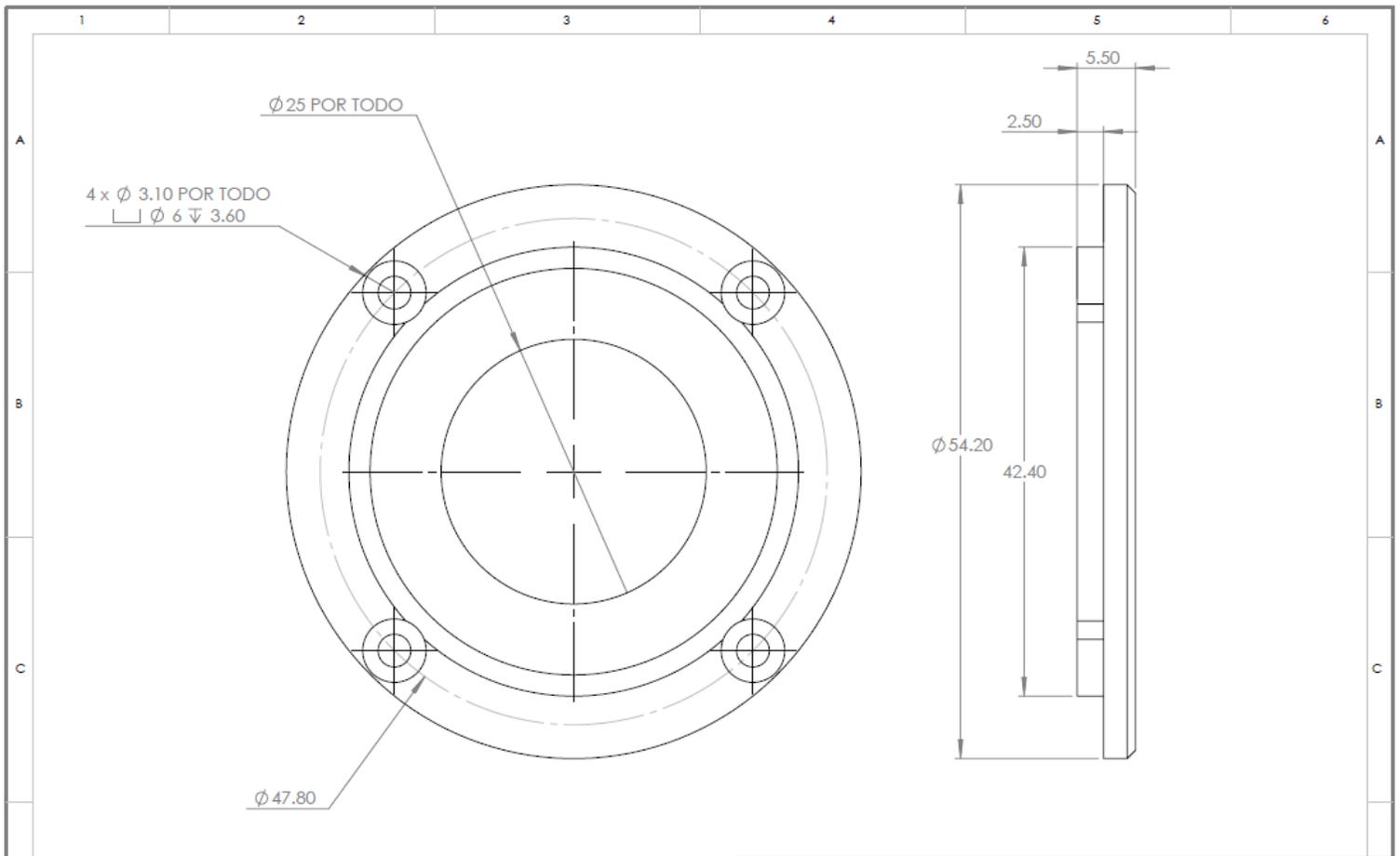
NOTAS GENERALES
ACABADO DE SUPERFICIE Quitar las aristas y los ángulos vivos.

TOLERANCIAS GENERALES
Dimensiones en [µm] cm Tolerancia general: ±0.01 Dims angular: ±0.25°

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.**

FORMAT	A4
VERSIÓN	V1
ESCALA	1:1

TÍTULO: Refractómetro portátil	
NO. DE PIEZA: Montura muestras - base	
DISEÑO: D.TORRES, B.SULMARÁN	REVISÓ:
DIBUJO: D.TORRES	MANUFACTURA: D.TORRES
NOMBRE DEL ARCHIVO: Planos de fabricacion	
HOJA 6 DE 8	

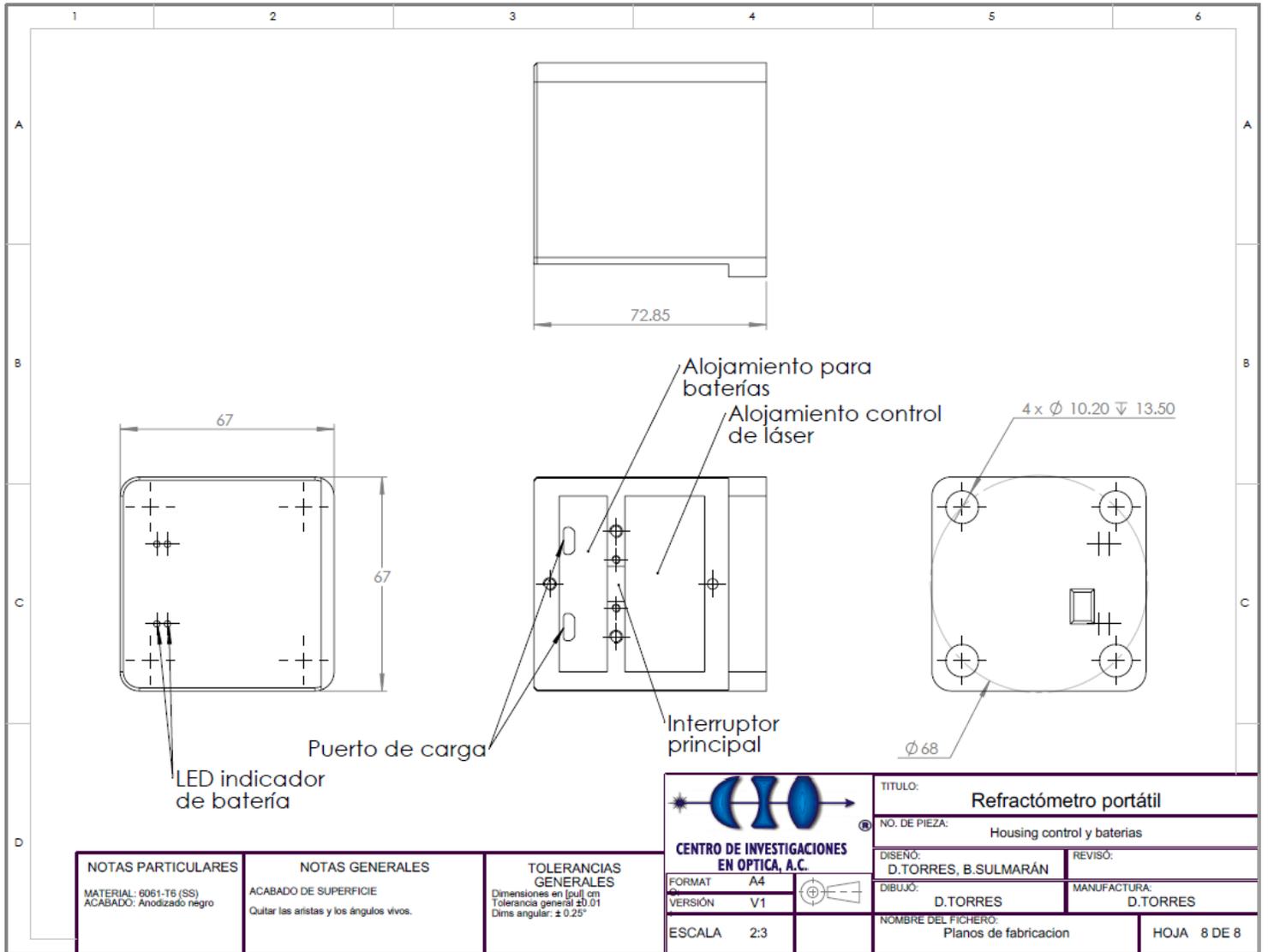


**NOTAS PARTICULARES**  
 MATERIAL: 6061-T6 (SS)  
 ACABADO: Anodizado negro

**NOTAS GENERALES**  
 ACABADO DE SUPERFICIE  
 Quitar las aristas y los ángulos vivos.

**TOLERANCIAS GENERALES**  
 Dimensiones en [mil] cm  
 Tolerancia general  $\pm 0.01$   
 Dims angular:  $\pm 0.25^\circ$

 <p><b>CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.</b></p>		TITULO: Refractómetro portátil	
		NO. DE PIEZA: Montura muestras - cilindro	
FORMAT: A4		DISEÑO: D.TORRES, B.SULMARÁN	REVISÓ:
VERSIÓN: V1		DIBUJÓ: D.TORRES	MANUFACTURA: D.TORRES
ESCALA: 2:1		NOMBRE DEL FICHERO: Planos de fabricacion	HOJA: 7 DE 8



NOTAS PARTICULARES
MATERIAL: 6061-T6 (SS) ACABADO: Anodizado negro

NOTAS GENERALES
ACABADO DE SUPERFICIE Quitar las aristas y los ángulos vivos.

TOLERANCIAS GENERALES
Dimensiones en [mil] cm Tolerancia general: $\pm 0.01$ Dims angular: $\pm 0.25^\circ$

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.**

FORMAT	A4
VERSION	V1
ESCALA	2:3

TITULO: <b>Refractómetro portátil</b>	
NO. DE PIEZA: Housing control y baterías	
DISENO: D.TORRES, B.SULMARÁN	REVISO:
DIBUJO: D.TORRES	MANUFACTURA: D.TORRES
NOMBRE DEL FICHERO: Planos de fabricacion	
HOJA 8 DE 8	

## **ANEXO B. ARTÍCULO CIENTÍFICO GENERADO A PARTIR DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Con los resultados obtenidos de este trabajo se generaron un artículo para su publicación en congresos nacional. Estos artículos son:

### **Artículo 1. DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO BASADO EN HOLOGRAFIA DIGITAL PARA MEDICIÓN DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN MEDIOS TRANSPARENTES**

Proximo a ser publicado en el XX Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES). El manuscrito fue recibido el 15 de agosto del 2021, aceptado el 15 de octubre del 2021 y está en proceso de ser publicado.

A continuación, se encuentra el artículo completo.

# I. Desarrollo de un dispositivo basado en holografía digital para medición de índice de refracción en medios transparentes

Brandon R. Sulvarán-Salmoreno<sup>1\*</sup>, David Moreno-Hernandez<sup>1+</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Colonia Lomas del Campestre, León, Guanajuato, México. Código Postal 37150

\* brandonss@cio.mx +dmh@cio.mx

**Resumen**— Se desarrolla un refractómetro basado en holografía digital en línea. El interés principal es medir el índice de refracción en medios transparentes como pueden ser vidrios o líquidos. La holografía se puede describir en términos concretos como un sistema de fotografía tridimensional para formar una imagen sin el uso de lentes. Esta consiste en el registro y reconstrucción de un holograma. El holograma que se reconstruye contiene las características físicas del objeto en estudio. En este trabajo, el objeto en estudio es un disco sólido de 150  $\mu\text{m}$  de diámetro, del cual se obtienen hologramas. La posición del disco sólido en la dirección vertical se relaciona con un cambio en el camino óptico dado por el índice de refracción y el grosor de la muestra.

**Palabras Clave** —Difracción, holografía digital, índice de refracción, refractómetro.

## I. INTRODUCCIÓN

En aplicaciones bioquímicas, la medición del índice de Refracción (IR) es significativa ya que este parámetro puede usarse para clasificar muestras, controlar un proceso químico, monitorear reacciones biológicas o detectar adulterantes en alimentos y bebidas. Dado que cada aplicación tiene claramente sus propios requisitos en cuanto a sensibilidad, resolución, rango dinámico y precisión en el índice de refracción. La investigación sobre este tema ha sido una constante durante casi los últimos años, que, a su vez, ha impulsado la creación de una cantidad de esquemas de refractómetros. Entre ellos, los refractómetros basados en fibra óptica [1-8] los cuales pueden alcanzar sensibilidades muy altas. Sin embargo, el proceso de fabricación y los esquemas de interrogación son complejos y en la mayoría de los casos son costosos. Recientemente, los nuevos refractómetros están basados en la observación de un patrón de franjas producido por un interferómetro [9, 10], o esparcimiento de luz elástica [11, 12, 13], estos han atraído considerable atención ya que la sensibilidad es alta, el esquema

de interrogación es simple y el costo es bajo. Estos sistemas utilizan un sistema óptico conectado a una cámara digital como elemento de interrogación.

En base a esto, en este proyecto presentamos un método simple para determinar el índice de refracción de un medio transparente donde solo se usa uno disco sólido y una cámara digital, el primero como medio interrogador y la segunda como elemento de registro.

La medición del índice de refracción del instrumento se basa en el cambio en la posición vertical del disco sólido causado por un objeto de fase (líquido o sólido) colocado entre el disco sólido y el medio donde se registran los hologramas. Con esta aproximación se registra el índice de refracción sin objeto de prueba (aire), y diferentes tipos de vidrios. Con estos valores se establece una curva de calibración que puede ser usada para determinar el índice de refracción de otros objetos transparentes.

## II. METODOLOGIA/DESARROLLO

En este proyecto se propone medir el índice de refracción en medios transparentes usando holografía digital. El principio básico de la holografía, como se mencionó anteriormente consiste en dos pasos: 1) Grabar la información del frente de onda proveniente del objeto a través del registro de su patrón de interferencia con una onda de referencia, dicho patrón se denomina holograma. 2) Recuperación del frente de onda mediante la difracción de la onda de referencia en el holograma; si el holograma

es iluminado con una réplica exacta de la onda de referencia, un observador verá una imagen virtual, la cual es idéntico del objeto original pues posee toda la información de perspectiva y profundidad del objeto [14].

La metodología para medir el índice de refracción es de la siguiente manera: un frente de onda ilumina un disco sólido, la luz se difracta en el disco sólido y se registra in el plano de observación. El frente de onda que no se difracta a través del disco solido también se registra en el plano de observación y hace las veces de la onda de referencia. De esta manera tenemos en el plano de observación la formación de un holograma (ver figura 1). Si colocamos una muestra entre el disco sólido y el plano de observación a la que se le quiere medir el índice de refracción, se provoca una diferencia de camino óptico, el cual induce a que el disco solido este en una posición vertical diferente. Por lo que, en la reconstrucción del holograma, esta posición vertical del disco solido está relacionada con el índice de refracción y grueso de la muestra.

En la holografía digital, el segundo paso es realizado numéricamente en un computador. Por lo cual, es necesario el siguiente desarrollo matemáticos para tal propósito. La difracción de la luz que pasa a través de un holograma localizado perpendicularmente a un frente de onda incidente se representa por la integral de Fresnel-Kirchhoff [14]:

$$U(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{1}{\rho} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho) dx dy \quad (1)$$

Donde  $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d}$ ,  $h$  representa el holograma registrado,  $E_R$  es el complejo conjugado del frente de onda de referencia,  $d$  es la distancia de reconstrucción, y  $(x, y)$  y  $(\xi, \eta)$  son coordenadas laterales del holograma y del plano reconstrucción respectivamente. La ecuación (1) se puede representar de la siguiente manera:

$$U(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) g(\xi, \eta, x, y) dx dy \quad (2)$$

Donde  $g(\xi, \eta, x, y)$  está dada por:

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d}\right)}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d}} \quad (3)$$

La ecuación (2) denota la operación de convolución y se puede calcular usando el teorema de convolución, esta se escribe de la siguiente forma:

$$U(\xi, \eta) = \mathfrak{T}^{-1} \left\{ \mathfrak{T}(h(x, y) E_R^*(x, y)) \cdot \mathfrak{T}(g(\xi, \eta, x, y)) \right\} \quad (4)$$

En la ecuación (4), los símbolos  $\mathfrak{T}$  y  $\mathfrak{T}^{-1}$  significan transformada de Fourier directa e inversa respectivamente. Es importante mencionar, que el sensor de una cámara digital registra la intensidad del holograma reconstruido en la siguiente manera:

$$I(\xi, \eta) = |U(\xi, \eta)|^2 \quad (5)$$

En este trabajo, para resolver la ecuación (4) utilizamos el método propuesto en la referencia [14].

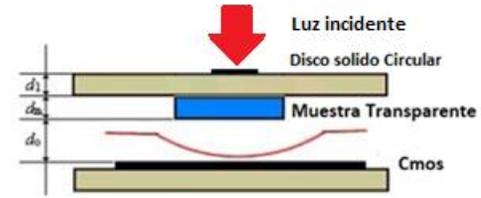


Fig. 1.- Esquema de la propuesta para medición de índice de refracción por medio de holografía digital

A partir de la representación esquemática de la figura 1 se construye el prototipo para la medición de índice de refracción.

La mayor parte de las piezas del prototipo se diseñan en el software SolidWorks para posteriormente realizarlas físicamente utilizando un impresora 3D, las partes principales del dispositivo constan de un diodo láser cuya longitud de onda de emisión es de 650nm y potencia de 5mW, un portaobjetos el cual sirve de apoyo para colocar un disco de análisis o disco para parametrización, seguido de un espacio de confinamiento para las muestras a analizar, y por último tenemos un sensor CMOS en el cual veremos la difracción del disco, o holograma (ver figure 2).

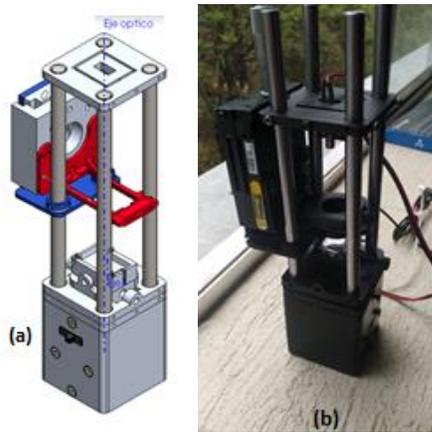


Fig. 2.- (a) Diseños desarrollados en SolidWorks del prototipo y (b) Prototipo Ensamblado.

Las partes del prototipo se constituyen de monturas y barras de aluminio de 10mm de diámetro. Las barras de aluminio se utilizan para desplazar verticalmente con un micrómetro la montura donde se encuentra el disco sólido, esto permite obtener diferentes regímenes de difracción y es usado para calibrar la distancia de obtención de hologramas. El material principal de las monturas es ácido poliláctico (PLA).

### III. Resultados y Discusión

Teniendo el prototipo ensamblado se procedió a la medición de índice refracción de vidrios y líquidos. El CMOS utilizado tiene un tamaño de píxel de  $1.55 \mu\text{m}$ . El diodo laser se alimentó con un voltaje de 3V. El registro de hologramas se hizo con el disco solido colocado a una distancia de aproximadamente 20 mm y 30 mm para análisis de muestras de vidrios y líquidos respectivamente. Las muestras se colocaron en su respectiva montura entre el disco sólido y el plano de observación. Para las muestras de líquido se utilizó un depósito cilíndrico de 1mm y 5mm de diámetro y altura respectivamente. Los líquidos utilizados en este trabajo son agua destilada ( $n=1.33$ ), alcohol isopropílico ( $n=1.375$ ) y aceite de oliva ( $n=1.448$ ). Las muestras de vidrio son de forma cilíndrica (diámetro=25mm, altura=1.8 mm). Los vidrios utilizados son BK7, SF2 y Silica, cuyos índices de refracción son de 1.516, 1.648 y

1.54 respectivamente. En la figura 3 se muestran algunos hologramas del disco sólido con muestra de Líquido y muestra. Podemos ver a simple vista, que los hologramas pertenecientes a los líquidos son más nítidos que los de los vidrios. Esto repercute en la reconstrucción de los hologramas.

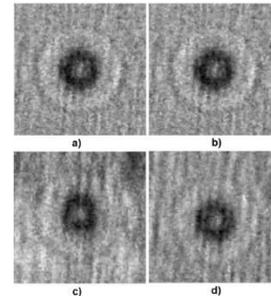


Fig. 3.- Disco de  $150 \mu\text{m}$  difractados en régimen de Fresnel en diversos medios.(a) Agua destilada, (b) Aceite de coco, (c) vidrio Bk7 y (d) vidrio SF2.

La reconstrucción de los hologramas obtenidos nos permitirá determinar la distancia vertical de cada uno de estos. La distancia vertical está relacionada con el camino óptico del disco sólido, y por consiguiente con el índice de refracción de las muestras. En la figura 4 se puede ver la reconstrucción de cada holograma (forma de disco solido) y su respectiva distancia vertical para agua destilada y vidrio SF2. La posición del disco sólido ocurre cuando se da la mínima intensidad en el perfil de intensidad contra distancia de reconstrucción (ver figura 4). En la figura 5 y 6 representamos dos curvas de calibración para líquidos y vidrios respectivamente.

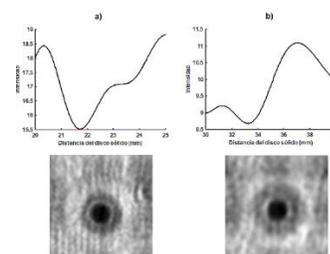


Fig. 4.- Disco de  $150 \mu\text{m}$  reconstruidos con muestra de agua y vidrio, (a) agua destilada y (b) vidrio SF2.

Las curvas de calibración de índice de refracción de líquidos y vidrios nos muestra que el sistema presentado tiene una

resolución aproximada de 0.01 unidades de índice de refracción.

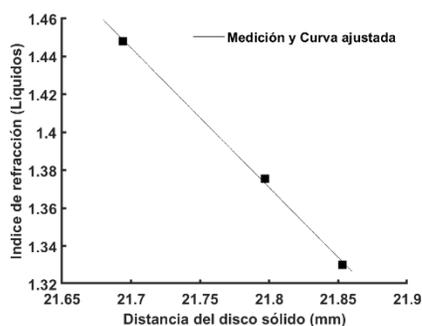


Fig. 5.- Curva de índice de refracción para líquidos.

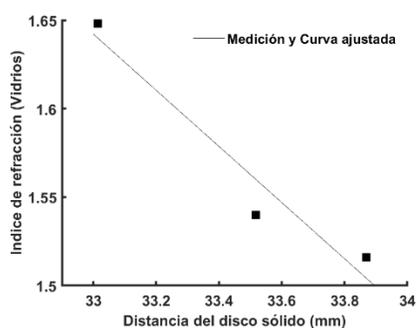


Fig. 6.- Curva de índice de refracción para vidrios.

#### IV. Conclusiones

Se realizó un refractómetro basado en holografía digital en línea. Se usa un disco sólido como medio interrogador del índice de refracción. La medición del índice de refracción de medios transparentes se basa en medir la distancia del disco y relacionar esa distancia con el índice de refracción del medio que se está midiendo. El refractómetro aun **requiere mejoras** con el fin de aumentar la resolución en la medición.

#### Agradecimientos

Se agradece la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para la realización de la maestría.

#### Referencias

[1] D. Psaltis, S. R. Quake, y C. Yang, «Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics», *nature*, vol. 442, n.o 7101, p. 381, 2006.

[2] N. Múnera, «Interferometría Holográfica Digital en Tiempo Real: Aplicación en la Cuantificación de Deformaciones Mecánicas», PhD Thesis, Tesis de Maestría, 2013.

[3] Y. Zou, Z. Shen, X. Chen, Z. Di, y X. Chen, «An integrated tunable interferometer controlled by liquid diffusion in polydimethylsiloxane», *Opt. Express*, vol. 20, n.o 17, pp. 18931–18936, 2012.

[4] M. I. Lapsley, I.-K. Chiang, Y. B. Zheng, X. Ding, X. Mao, y T. J. Huang, «A single-layer, planar, optofluidic Mach-Zehnder interferometer for label-free detection», *Lab. Chip*, vol. 11, n.o 10, pp. 1795–1800, 2011.

[5] L. Chin, A. Liu, Y. Soh, C. Lim, y C. Lin, «A reconfigurable optofluidic Michelson interferometer using tunable droplet grating», *Lab. Chip*, vol. 10, n.o 8, pp. 1072–1078, 2010.

[6] L. Chin, A. Liu, C. Lim, C. Lin, T. Ayi, y P. Yap, «An optofluidic volume refractometer using Fabry-Pérot resonator with tunable liquid microlenses», *Biomicrofluidics*, vol. 4, n.o 2, p. 024107, 2010.

[7] A. N. Chryssis, S. M. Lee, S. B. Lee, S. S. Saini, y M. Dagenais, «High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, n.o 6, pp. 1253–1255, 2005.

[8] J. Liu, M. A. Eddings, A. R. Miles, R. Bukasov, B. K. Gale, y J. S. Shumaker-Parry, «In situ microarray fabrication and analysis using a microfluidic flow cell array integrated with surface plasmon resonance microscopy», *Anal. Chem.*, vol. 81, n.o 11, pp. 4296–4301, 2009.

[9] A. Schimpf, D. Bucci, M. Nannini, A. Magnaldo, L. Coustou, y J.-E. Broquin, «Photothermal microfluidic sensor based on an integrated Young interferometer made by ion exchange in glass», *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 163, n.o 1, pp. 29–37, 2012.

[10] S. Sumridetchkajorn, K. Chaitavon, y J. Nukeaw, «A free-space interferometric refractometer structure with simple microfluidic chips», *IEEE Sens. J.*, vol. 12, n.o 2, pp. 404–409, 2011.

[11] E. Bae, N. Bai, A. Aroonual, A. K. Bhunia, y E. D. Hirtleman, «Label-free identification of bacterial microcolonies via elastic scattering», *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 108, n.o 3, pp. 637–644, 2011.

[12] E. Bae et al., «Portable bacterial identification system based on elastic light scatter patterns», *J. Biol. Eng.*, vol. 6, n.o 1, p. 12, 2012.

[13] A. E. Bruno, B. Krattiger, F. Maystre, y H. M. Widmer, «On-column laser-based refractive index detector for capillary electrophoresis», *Anal. Chem.*, vol. 63, n.o 23, pp. 2689–2697, 1991.

[14] U. Schnars y W. Jueptner, «Digital holography: Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques, *Digit*», *Hologr Digit Hologram Rec Numer Reconstr Relat Tech*, 2005.

[15] Malacara D. Óptica básica. México: Fondo cultural económica; 3ra Ed. 2015.

[16] Hariharan P (1984) *Optical Holography*. Cambridge University Press, Cambridge.

[17] Kreis T (1996) *Holographic Interferometry*. Akademie, Berlin.

[18] Demetropoulos TH, Mitra R (1974) Digital and optical reconstruction of images from suboptical diffraction patterns. *Appl Opt* 13(3):665-670.

[19] Kreis T, Jüptner W (1997) Principles of digital holography. In: Jüptner W, Osten W (eds) *Proc 3rd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*. Akademie, Berlin, pp 353-363.

[20] Burchard, Ulrich, and Olaf Medenbach. "The refractometer." *The Mineralogical Record*, vol. 40, no. 2, 2009, p. 135-159.