

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DEBIDAS A ESFUERZOS, VIBRACIONES O
VARIACIONES DE TEMPERATURA EN UN OBJETO MEDIANTE METROLOGÍA
ÓPTICA BASADA EN TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA

JORGE EDISON MORA ARROYO
OSCAR JOSÉ BARCO GALVIZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2010

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DEBIDAS A ESFUERZOS, VIBRACIONES O
VARIACIONES DE TEMPERATURA EN UN OBJETO MEDIANTE METROLOGÍA
ÓPTICA BASADA EN TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA

JORGE EDISON MORA ARROYO
OSCAR JOSÉ BARCO GALVIZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director
Ing. M.Sc. DARÍO FERNANDO FAJARDO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2010

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado, son de responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1 del acuerdo no. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable consejo directivo de la universidad de nariño

Nota de aceptación:

Presidente

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Noviembre de 2010

DEDICATORIA

“A mis padres, por haberme dado la vida y enseñado a vivirla, y por hacerme comprender que el éxito no es una meta, sino una forma de vida”.

Jorge Edison Mora A.

“A mis padres Mary y Martin, quienes han estado conmigo en todo momento. Gracias por darme una carrera, sobrellevarme y creer en mí”.

Oscar José Barco Galviz.

Al Ing. M.Sc. Darío Fernando Fajardo, director del Grupo de Instrumentación y Sistemas Inteligentes de la Universidad de Nariño, por su orientación antes, durante y en la finalización de este trabajo, quien fue parte fundamental para que la investigación realizada llegara a feliz término.

Al Físico Ph.D. Freddy Alberto Monroy Ramírez, Director del grupo de Óptica Aplicada (GOA) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, quien muy amablemente nos asesoró durante la pasantía investigativa realizada en sus laboratorios, orientación fundamental en el desarrollo experimental de esta investigación.

Al Ing. Físico Jorge Herrera por su orientación en el tratamiento de imágenes digitales en holografía y por la facilitación de documentación especializada para revisión del estado del arte.

A la Física Ph.D. Amalia Martínez del Centro de Investigaciones en Óptica de México (CIO), quien solventó muchas de nuestras dudas en cuanto al modelamiento matemático del fenómeno físico tratado en este trabajo de investigación.

Y a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron de alguna manera para que esta investigación pudiera ser una realidad.

Los Autores

RESUMEN

En este trabajo de investigación se da a conocer el diseño y la implementación de un montaje experimental para el análisis de deformaciones en objetos, empleando interferometría holográfica digital de reflexión, haciendo uso de un sistema de identificación de variaciones mediante un software de procesamiento digital de imágenes, conformado por los módulos de adquisición de imágenes, pre-procesamiento, procesamiento y extracción de información de interferogramas.

Igualmente, se enmarcan los conceptos de holografía y holografía digital, interferometría, procesamiento de imágenes y su uso extendido al análisis de deformaciones sobre objetos, pruebas realizadas, conclusiones y recomendaciones futuras.

ABSTRACT

This research work reveals the design and implementation of an experimental assembly for deformation analysis of objects using digital holographic interferometry for reflection, by means of a system of identification of variations through a software for digital images processing, made up of the images modules, pre-processing, processing and information extraction from interferograms.

Likewise, the concepts are part of holography and digital holography, interferometry, image processing and its use extended to the analysis of deformations on objects, tests, conclusions and future recommendations.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. MARCO CONCEPTUAL	28
1.1 GENERALIDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	28
1.1.1 Espectro electromagnético.....	28
1.1.2 Coherencia.....	29
1.2 INTERFERENCIA	29
1.2.1 Definición.	29
1.2.2 Principio de superposición de ondas.....	30
1.2.3 Interferencia constructiva.	30
1.2.4 Interferencia destructiva	30
1.2.5 Tipos de franjas de interferencia	31
1.3 INTERFEROMETRÍA.....	31
1.3.1 Tipos de interferómetros.	32
1.3.1.1 Interferómetro de Young	32
1.3.1.2 Interferómetro de Michelson.....	33
1.3.1.3 Interferómetro de Fizeau	33
1.4 HOLOGRAFÍA.....	35
1.4.1 Definición e historia.....	35
1.4.2 Holograma.....	36
1.4.3 Registro y reconstrucción de un frente de onda.....	36
1.4.4 Métodos matemáticos para la reconstrucción de un frente de onda	40

1.5	INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA.....	48
1.5.1	Técnicas de interferometría holográfica.....	48
1.6	METROLOGÍA.....	51
1.6.1	Ventajas de la medición no invasiva.....	51
1.7	FILTRADO DE IMÁGENES EN HOLOGRAFÍA DIGITAL.....	53
1.7.1	Eliminación de la componente DC.....	53
1.7.2	Ruido Speckle en una imagen.....	58
1.7.3	Filtro pasa bajos.....	60
1.7.4	Filtro de mediana y de promedio.....	60
1.7.5	Filtro de ventana de Fourier.....	61
1.8	DESENVOLVIMIENTO DE FASE.....	66
1.8.1	Desenvolvimiento de fase en una dimensión.....	67
1.8.2	Desenvolvimiento de fase en dos dimensiones.....	69
1.8.3	Método de Goldstein.....	74
1.8.4	Método guiado.....	78
1.9	ANÁLISIS DE DEFORMACIONES Y PROCEDIMIENTOS.....	79
1.9.1	Módulo de Young.....	81
2.	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	84
2.1	RECOLECTAR Y DEFINIR TÉCNICAS DE ANÁLISIS POR INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA.....	84
2.2	IMPLEMENTAR UN SISTEMA EXPERIMENTAL EL CUAL PERMITA INCLUIR UN MÓDULO DE ANÁLISIS POR INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL.....	87
2.2.1	Pruebas preliminares.....	87
2.2.2	Implementación del montaje experimental.....	91

2.3	DESARROLLAR UN MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES GRÁFICAS A PARTIR DE LAS TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA IMPLEMENTADAS.	100
2.3.1	Elaboración de un algoritmo primario para adquisición de imágenes	100
2.3.2.1	Sistema electrónico de control	105
2.3.2.2	Captura de registros.....	108
2.4	REALIZAR UNA IMPLEMENTACIÓN EN SOFTWARE QUE PERMITA VISUALIZAR LOS RESULTADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y OBTENCIÓN DE PATRONES DE ANÁLISIS UTILIZANDO UNA INTERFAZ GRÁFICA EN MATLAB.	108
2.4.1	Ventana principal (HID).	109
2.4.2	Captura de registros.....	116
2.4.3	Calcular.	116
2.4.4	Filtros.	117
2.4.5	Reconstrucción numérica.....	120
2.4.6	Desenvolvimiento de fase.	123
2.4.7	Perfil de imagen.	127
2.4.8	Holografía digital.	129
2.4.9	Interferometría digital.	132
2.5	VERIFICAR LOS DATOS OBTENIDOS.....	134
3.	CONCLUSIONES	167
4.	RECOMENDACIONES	169
	BIBLIOGRAFÍA	170
	ANEXOS	173

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema representativo del interferómetro de Michelson, el cual es uno de los instrumentos más sencillos en cuanto al desarrollo de procesos interferométricos se refiere.	24
Figura 2. Representación gráfica de una onda.....	28
Figura 3. Espectro electromagnético.....	29
Figura 4. Interferencia constructiva y destructiva.	31
Figura 5. Esquema representativo del interferómetro de Young.	32
Figura 6. Esquema representativo del interferómetro de Michelson.	33
Figura 7. Diagrama real del interferómetro de Fizeau.	34
Figura 8. Esquema representativo del interferómetro de Fizeau.....	34
Figura 9. Esquema del registro de un holograma.....	36
Figura 10. Esquema simplificado de la reconstrucción de un holograma.....	37
Figura 11. Esquema simplificado del registro de un holograma.	38
Figura 12. Esquema simplificado de la reconstrucción de un holograma.....	39
Figura 13. Esquema simplificado de la reconstrucción de un holograma después de girarlo 180°.	40
Figura 14. Imagen correspondiente al holograma digital de un objeto.	42
Figura 15. Sistema Coordenado para la reconstrucción numérica de un holograma digital.....	43
Figura 16. Patrón de moteado (Speckle).....	51
Figura 17. Holograma digital: Izquierda, Intensidad registrada por el instrumento de captura; Derecha, reconstrucción numérica sin la eliminación del orden cero de difracción.....	53

Figura 18. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Centro, Holograma digital con supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con supresión de orden cero y filtro pasa-alto.	54
Figura 19. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con enmascaramiento de orden cero.	55
Figura 20. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con filtraje espacial.	56
Figura 21. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con eliminación de orden cero de difracción por medio de la sustracción del valor promedio de intensidad del holograma registrado.	57
Figura 22. Hologramas digitales con supresión de orden cero mediante la sustracción del promedio de una vecindad de a) 3×3 y b) 5×5	58
Figura 23. Ilustración del procedimiento para la reducción del tamaño de la imagen reconstruida.	59
Figura 24. Reducción del ruido Speckle mediante el cambio del tamaño de la imagen.	60
Figura 25. Izquierda: Imagen original; Centro.	60
Figura 26. Aplicación de un filtrado espacial de suavizado; Izquierda: Imagen original; Derecha: Imagen suavizada.	61
Figura 27. Izquierda: Ventana de tiempo rectangular; Derecha: transformada de Fourier de la función ventana.	63
Figura 28. Izquierda: Ventana de tiempo sinusoidal; Derecha: transformada de Fourier de la función ventana.	63
Figura 29. Cada fila contiene el espectro solo de frecuencias positivas para dos señales sinusoidales diferentes y para su suma, la diferencia de las frecuencias entre las sinusoides se aprecia en la forma de las crestas y de los valles de las ondas.	64
Figura 30. Las ventanas de tiempo pueden ser derivadas de la ventana rectangular convolucionando la función rectangular con ella misma. Izquierda: (a. sin convolución, b. con una convolución, c. con dos	

convoluciones, d. con tres convoluciones); Derecha: Ventanas espectrales correspondientes a las ventanas de tiempo ya mencionadas.....	65
Figura 31. Izquierda: Dos ventanas de tiempo superpuestas: 1) Una ventana Gaussiana y 2) Una ventana rectangular después de tres convoluciones sucesivas. Derecha: Dos ventanas espectrales superpuestas. 1) Transformada de Fourier de La ventana Gaussiana y 2) Transformada de Fourier correspondiente a la ventana rectangular después de tres convoluciones sucesivas.	65
Figura 32. En las distintas figuras: Izquierda: Mapa de fases envuelto; Derecha: Mapa de fases desenvuelto; a) imagen de resonancia magnética de una cabeza humana, b) parte de la tierra en una imagen de radar de apertura sintética, c) imagen de un pecho humano en tratamiento de radioterapia y d)imagen de una estatua artística de una hada.....	66
Figura 33. Representación gráfica de la fase continua y de la fase envuelta de una función lineal.	68
Figura 34. Mapa de fase envuelto (izquierda), residuos (centro) y trayectoria de corte de los residuos generada por el algoritmo de Goldstein.	74
Figura 35. Ubicación de los cortes en la rama; Izquierda: Cuatro residuos; Derecha: Cortes de la rama basados en la técnica del emparejamiento de residuos.....	75
Figura 36. Diagrama esquemático del método de emparejamiento de residuos..	76
Figura 37. Izquierda: parejas de residuos; Derecha: Los cuadros más pequeños centrados con un residuo y cubriendo otro respectivamente.	77
Figura 38. Esquema de evaluación para la determinación de propiedades en materiales mediante interferometría holográfica digital.	81
Figura 39. Principio de funcionamiento del mecanismo de carga para muestras pequeñas.	82
Figura 40. Cuatro mapas de fase 2π registrados desde cuatro direcciones diferentes de iluminación.....	83
Figura 41. Deformación calculada en coordenadas cartesianas (escala de la gráfica en μm)......	83

Figura 42. Perfil de deformación en la dirección x .	83
Figura 43. Holograma por transmisión (izquierda) y por reflexión (derecha).	85
Figura. 44. Esquema óptico para holografía de tipo digital	86
Figura 45. Diagrama de flujo del proceso de interferometría holográfica digital...	87
Figura 46. Interferómetro de Michelson.....	88
Figura 47. Láser de helio-neón Uniphase de 0.1 mW y longitud de onda 632.8 nm (rojo).....	88
Figura 48. Jinetillo o elevador.....	88
Figura 49. Pantalla.	89
Figura 50. Filtro espacial o expansor de haz.....	89
Figura 51. Banco óptico y soportes.	89
Figura 52. Montaje experimental efectuado.	90
Figura 53. Observación del patrón de Speckle en diferentes instantes.....	90
Figura 54. Franjas de interferencia producto del interferómetro de Michelson.....	90
Figura 55. Franjas de interferencia mediante el interferómetro de Young.....	91
Figura 56. Franjas de interferencia o anillos de Newton.	91
Figura 57. Cámara Lumenera de alta resolución sensor tipo CMOS y divisor de haz cúbico.	92
Figura 58. Láser JDSU de 10 mW de potencia y longitud de onda de 632.8 nm (rojo) y su respectiva fuente de poder.	92
Figura 59. Divisor de haz plano variable.	92
Figura 60. Shutter (obturador) y filtro espacial.	93
Figura 61. Espejos de cara paralela.....	93
Figura 62. Sistema de filtro espacial y colimador.	93
Figura 63. Base magnética con soporte.....	94

Figura 64. Tornillo micrométrico.	94
Figura 65. Disco difusor.	94
Figura 66. Mesa antivibración con doble placa de acero.	95
Figura 67. Montaje físico implementado en los laboratorios de óptica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá para holografía digital de doble exposición.....	95
Figura 68. Montaje físico implementado en los laboratorios de óptica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá para interferometría holográfica de doble exposición.	96
Figura 69. Disco difusor ubicado entre el haz dirigido al objeto y el objeto.	97
Figura 70. Holograma digital y reconstrucción numérica del dado mostrado en la figura 69.	98
Figura 71. Modificación de una lámina mediante presión de tornillo micro.	98
Figura 72. Diferencia de amplitud y fase para una deformación mecánica sobre una placa.....	99
Figure 73. Análisis de una resistencia mediante interferometría holográfica.	99
Figura 74. Diferencia de amplitud y fase para una deformación térmica.....	100
Figura 75. Cámara Veo Stingray	101
Figura 76. Ventana de control para adquisición de registros.	102
Figura 77. Adquisición de registros holográficos desde cámara Lumenera.	103
Figura 78. Diagrama de flujo del proceso de captura.....	103
Figura 79. Ventana de captura y control para adquisición de registros.....	104
Figura 80. Diagrama de bloques del sistema electrónico.....	105
Figura 81. Diagrama del circuito electrónico.	107
Figura 82. Ventana de selección de puerto serial.	107
Figura 83. Ventana principal.....	109

Figura 84. Relación de la ventana principal y ventanas de procesamiento.....	110
Figura 85. Distribución de celdas en archivos formato *.mat	111
Figura 86. Barra de menús y de herramientas	111
Figura 87. Menú archivo desplegado	112
Figura 88. Menú comunicación desplegado	112
Figura 89. Menú operaciones desplegado.	112
Figura 90. Ejemplo aplicación de Shift a un holograma reconstruido.....	113
Figura 91. Uso de la herramienta Seleccionar Y Cortar.	114
Figura 92. Sección de información.	114
Figura 93. Módulo y Log (intensidad) de una imagen.	116
Figura 94. Ventana calcular.....	116
Figura 95. Ventana filtros.	117
Figura 96. Esquema del filtro WFF (Window Fourier Filter – Filtro De Ventana De Fourier).....	119
Figura 97. Enmascaramiento de una imagen (izquierda), interno (centro) y externo (derecha).....	119
Figura 98. Reconstrucción numérica.....	120
Figura 99. Proceso de filtraje espacial	121
Figura 100. Filtraje espacial de un holograma, sin aplicación (izquierda) y filtrado (derecha).	122
Figura 101. Holograma reconstruido antes (izquierda) y después de una inclinación horizontal (derecha).	123
Figura 102. Desenvolvimiento de fase.....	123
Figura 103. Imagen observada para un mapa de fases envuelto (arriba) y desenvuelto (abajo), sin color falso (izquierda) y con color falso (derecha).	125

Figura 104. Ventana perspectiva.....	126
Figura 105. Función Peaks, sin iluminación (izquierda) y con iluminación (derecha).	127
Figura 106. Perfil de imagen.....	127
Figura 107. Menú emergente en la ventana perfil de imagen.....	128
Figura 108. Interfaz para holografía digital.	129
Figura 109. Barra de estado.	129
Figura 110. Procesamiento de hologramas decorrelacionados.....	130
Figura 111. Ventana de enmascaramiento.....	131
Figura 112. Ventana de inclinación dinámica.	132
Figura 113. Interfaz para holografía digital.	132
Figura 114. Relación <i>referencia_estado</i> en la interfaz de interferometría digital. 133	
Figura 115. a) Holograma digital y su reconstrucción numérica b) Módulo, c) Log (Intensidad).....	135
Figura 116. Reconstrucción numérica con substracción de componente DC.....	135
Figura 117. Reconstrucción numérica con filtro pasa altos a) 3×3 , b) 5×5 , c) 7×7 , d) 9×9	136
Figura 118. Reconstrucción numérica con filtro espacial.....	136
Figura 119. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 2 registros, c) 30 registros y d) 30 registros, substracción de componente DC y filtro pasa altos de 7×7	137
Figura 120. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 2 registros, c) 10 registros, d) 30 registros y e) 30 registros con substracción de componente DC y filtro pasa altos de 5×5	138
Figura 121. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 5 registros y c) 5 registros con substracción de componente DC, filtro pasa altos de 5×5 e inclinación.....	139

Figura 122. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 2 registros Y c) 30 registros.....	140
Figura 123. Holograma reconstruido con a) 30 registros Y b) 30 registros, filtro pasa altos 7×7 , substracción de componente DC e inclinación.	140
Figura 124. Holograma reconstruido con a) 2 registros y b) 30 registros.	141
Figura 125. Holograma reconstruido con a) 5 registros y b) 10 registros, substracción de componente DC, filtro pasa altos 5×5 e inclinación.	141
Figura 126. Holograma reconstruido con a) 5 registros y b) 10 registros.	142
Figura 127. Holograma reconstruido con a) 5 registros, b) 20 registros Y c) 20 registros, substracción de componente DC-filtro pasa altos de 5×5	143
Figura 128. Holograma reconstruido con a) 5 registros, b) 10 registros Y c) 30 registros.....	143
Figura 129. Ampliación de objeto en los hologramas de las figuras 119 a 128. .	144
Figura 130. Holograma de la lámina presentada en la figura 71.	145
Figura 131. Interferograma y diferencia de fase para un estado de deformación de la lámina.	146
Figura 132. Interferogramas (izquierda) y diferencias de fase (derecha) de la placa.	147
Figura 133. Mapas de fase filtrados (izquierda) y desenvueltos (derecha) para la lámina.	149
Figura 134. Perfiles de intensidad normalizados para la lámina.....	151
Figura 135. Perspectiva de un desenvolvimiento de fase para la lámina.	151
Figura 136. Holograma de una resistencia de carbón de 100Ω a $1/2W$	153
Figura 137. Interferograma y diferencia de fase para un estado de deformación eléctrica.	153
Figura 138. Interferogramas (izquierda) y diferencias de fase (derecha) de la resistencia sometida a una diferencia de potencial.	155

Figura 139. Mapas de fase filtrados (izquierda) y desenvueltos (derecha) de la resistencia.	157
Figura 140. Perfiles de intensidad normalizados.	159
Figura 141. Voltaje vs. Desplazamiento.	160
Figura 142. Holograma de una resistencia de 100Ω a $1/2 W$	161
Figura 143. Interferograma y diferencia de fase para en estado de deformación térmica de una resistencia de 100Ω a $1/2 W$	161
Figura 144. Interferogramas (izquierda) y diferencias de fase (derecha) de la resistencia sometida a una diferencia de potencial.	162
Figura 145. Mapas de fase filtrados (izquierda) y desenvueltos (derecha) de la resistencia.	163
Figura 146. Perfiles de intensidad normalizados para la resistencia.	165
Figura 147. Temperatura vs. Desplazamiento.	166

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Comparación entre los valores esperados y obtenidos.....	152
Tabla 2. Variación en desplazamiento de una resistencia de $100\ \Omega$ a $1/2W$, frente a un incremento de voltaje.	159
Tabla 3. Variación en desplazamiento de una resistencia de $100\ \Omega$ a $1/2W$, frente a un descenso de temperatura.....	165

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DEL MICROCONTROLADOR	174
ANEXO B. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA INTERFEROMETRIA	177
ANEXO C. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA HOLOGRAFIA	190
ANEXO D. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA SEPARACION	200
ANEXO E. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA INCLINACION	201
ANEXO F. CONSTANCIA VISITA A LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ	202
ANEXO G. CONSTANCIA PONENCIA EN EL II CONGRESO DE INGENIERÍA FÍSICA.....	203

GLOSARIO

CORRELACIONAR: Es el conjunto de técnicas estadísticas empleado para medir la intensidad de la asociación entre dos variables. El principal objetivo del análisis de correlación consiste en determinar que tan intensa es la relación entre dos variables.

DESENVOLVIMIENTO DE FASE: Esta técnica se fundamenta en la detección de un salto de fase de valor 2π , agregando o substrayendo un desplazamiento del mismo valor a pixeles sucesivos que tienen dicho corrimiento de fase, basados en el mecanismo del umbral, lo que permite recuperar la forma continua de un mapa de fase.

DRIVER: Un driver, o controlador, es un programa o elemento que controla un dispositivo. Cada dispositivo, ya sea una impresora, un teclado, etc., debe tener un programa controlador.

HOLOGRAFÍA: La holografía es una técnica avanzada de fotografía, que consiste en crear imágenes tridimensionales. Para esto se utiliza un rayo láser, que graba microscópicamente una película fotosensible. Ésta, al recibir la luz desde la perspectiva adecuada, proyecta una imagen en tres dimensiones.

HOLOGRAMA: Un holograma es el registro de un frente de onda luminoso en donde se conserva la información de carácter complejo de dicho frente, la cual está asociada a la fase del campo óptico de interferencia.

IMAGEN ORTOSCÓPICA: Se dice que una imagen es ortoscópica cuando es semejante al objeto, es decir, no presenta alteración alguna en su perspectiva.

IMAGEN SEUDOSCÓPICA: Se dice que una imagen es seudoscópica cuando presenta una perspectiva invertida a la del objeto.

INTERFERENCIA: Fenómeno físico que ocurre cuando dos ondas separadas llegan al mismo sitio en el espacio en donde se superponen, y simplemente, se sumarán o se sustraerán, sin anularse ni desaparecer.

INTERFEROGRAMA: Registro del patrón de interferencia generado por la superposición de dos o más frentes de onda.

INTERFEROMETRÍA: Es la técnica de usar el patrón de interferencia creado por superposición de dos o más ondas, permitiendo así, diagnosticar las características de dichos frentes de onda.

INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA: Se puede expresar como el mecanismo físico-matemático que permite aprovechar las características y bondades de la holografía, haciendo relación a que un holograma registra un frente de onda conservando la información de carácter complejo asociada a la fase del campo óptico de interferencia, sumada a la interferometría que utiliza la correlación entre frentes de onda para realizar mediciones de elevada resolución.

KBPS: Siglas de Kilobites por segundo (en inglés *Kilobits per second*). Unidades de velocidad generalmente empleadas para cuantificar la rata de transferencia de información entre dispositivos.

MICROCONTROLADOR: Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada, como el control de una lavadora, un teclado de ordenador, una impresora, un sistema de alarma, entre otros.

RECONSTRUCCIÓN DEL CAMPO ÓPTICO: Método físico-matemático empleado para la extracción de información compleja de un patrón de interferencia formado por la superposición de o más frentes de onda.

RS232: Es una interfaz que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios entre un DTE (Equipo terminal de datos) y un DCE (Data Communication Equipment, Equipo de Comunicación de datos), aunque existen otras situaciones en las que también se utiliza la interfaz RS-232.

USB: (Universal Serial Bus), puerto que sirve para conectar periféricos en caliente a una computadora.

INTRODUCCIÓN

El proceso de reconstrucción de una imagen es una técnica que permite una mejor abstracción de la realidad (como se la observa) y de los conocimientos ocultos en el grado en que un entorno pueda revelarlos, generando de esta manera una sensación sobrevaluada de la variación o calidad de presentación y/u obtención de datos.

Dentro de un sistema de generación o presentación de datos como el mencionado, una de las técnicas más conocidas y que se ha venido estructurando aun más en los últimos años es la holografía, aunque existen diferentes métodos desarrollados según la necesidad, recursos o capacidad de creación.

Un proceso de interferometría simple, está basado en la información que se obtiene mediante la separación de reflectores, los cuales reflejan parte de la emisión producida desde un módulo (Figura 1). Este haz lumínico es separado mediante una superficie de reflexión parcial, permitiendo emisiones hacia uno de los reflectores ubicado en la parte posterior del mismo y otro en dirección del haz reflejado, los cuales a su vez llevan esta emisión a un módulo receptor. Si la ubicación de los reflectores en relación al reflector parcial es la misma, las ondas que llegan al receptor estarán en fase y la señal será máxima, caso contrario, al estar uno de los reflectores desplazado, la fase de la onda reflejada cambiará. Esta información puede ser utilizada para medir distancias, conociendo la longitud de onda del haz emitido, medir una longitud de onda desconocida o índices de refracción en un medio, sin embargo, técnicas similares solo establecen parámetros para la medida de estos patrones.

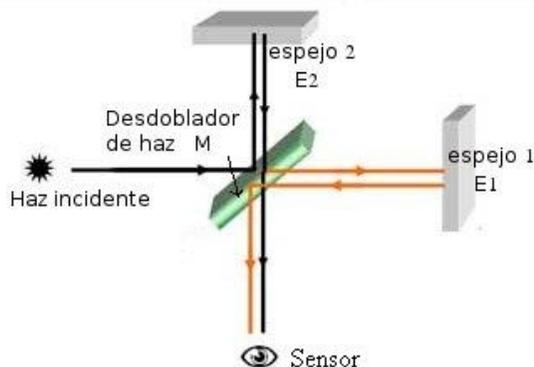


Figura 1, Esquema representativo del interferómetro de Michelson, el cual es uno de los instrumentos más sencillos en cuanto al desarrollo de procesos interferométricos se refiere.

La interferometría holográfica es un método de análisis fotográfico que permite estudiar las características físicas naturales de un determinado objeto, siendo aplicado otro tipo de variaciones físicas de entorno cuya resultante es registrada de forma gráfica y su resultado es estructurado según las variaciones más importantes del sometimiento. Se basa en el uso de elementos de tipo óptico, electrónico y de procesamiento óptico-informático, donde los actuales sistemas holográficos se desarrollan con base a computadores, siendo enmarcados como holografía digital. Un ejemplo de estos es la aplicación en la litografía holográfica y sistemas de seguridad solo relacionando el espectro electromagnético visible asociado a la magnitud y variación de los frentes de onda (comportamiento de la luz frente al objeto de análisis).

Los desarrollos en equipos computacionales han permitido la exploración del análisis mediante interferometría en otros campos con resultados satisfactorios, entre los que se encuentran: la odontología en el estudio de nuevos procesos de endodoncia, en los cuales cierta cantidad de material del diente es eliminado, característica que puede afectar la flexibilidad del mismo; en química es usado para estudiar los procesos de difusión de ciertas soluciones en ambientes controlados y su relación a distintas concentraciones en condiciones libres y también en el análisis de partículas para la determinación del tamaño, posición, desplazamiento y velocidad de las mismas; por otra parte, en medicina es empleado en la formación de implantes con polímeros que pueden sufrir degradación a causa de fluidos corporales y desarrollo de prótesis constituyentes sometidas a presiones o cargas por el cuerpo de un paciente, además de usarse para la generación de imágenes diagnósticas en la prevención y tratamiento de distintas patologías; en la industria se usan técnicas de reconocimiento de patrones físicos para el control de calidad de piezas mecánicas fabricadas o reconstruidas por deposición de materiales; su uso también está dirigido a la construcción y optimización de elementos ópticos como lentes, espejos, redes de difracción y dispositivos más complejos como concentradores solares, colimadores de fibras ópticas, scanners, etc.; otro de los campos de estudio se basa en visualizar los modos de vibración de altavoces, instrumentos musicales o complejas estructuras resolviendo las características propias de operación. Dentro de las ciencias y la ingeniería es generalmente empleada para la detección de fisuras y fracturas en estructuras, tanto metálicas como de concreto. Usada para el cálculo de índices de fatiga y módulo de Young en vigas de hormigón, cálculos de micro-desplazamientos en la caracterización de materiales emergentes, determinación del espesor de nano-películas semiconductoras, análisis de micro-deformaciones en objetos, entre los más destacados.

Por su extenso campo de aplicación como método de diagnóstico no invasivo la interferometría holográfica digital se convierte en una herramienta supremamente útil en metrología, gracias a su versatilidad y precisión en las medidas (micrométricas o nanométricas dependiendo del interferómetro), permitiendo obtener resultados satisfactorios en análisis de deformaciones o caracterizaciones

físicas mediante la variación controlada de ambientes como vibración o cambios en la temperatura en relación al objeto de estudio.

PROBLEMA

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La aparición de técnicas emergentes en metrología, dan pie para que los métodos de diagnóstico no invasivos se encuentren en auge y sean objeto de estudio de múltiples investigaciones en laboratorios alrededor del mundo, la mayoría de ellos aún en etapas primarias de ejecución y no comercialmente disponibles, pues requieren de un arduo análisis, antes de ponerse a disposición pública.

Dentro de las técnicas más empleadas para analizar deformaciones o mediciones de longitud en objetos, se encuentran, la interferometría holográfica de reflexión y la de transmisión, siendo la primera la empleada en esta investigación por su versatilidad y mejor calidad de captura de perfiles interferométricos. Por esta razón en este trabajo se implementa un montaje experimental con el cual se realiza la obtención de los patrones de interferencia deseados, que posteriormente serán analizados con el software desarrollado para tal fin.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo implementar un sistema de análisis, basado en interferometría holográfica para la determinación de variaciones en longitud, en un objeto de estudio?

ALCANCE Y DELIMITACIONES

El alcance de este trabajo es la implementación de un montaje experimental basado en la apropiación de imágenes a partir de interferometría holográfica digital de reflexión como método de análisis y un posterior tratamiento de la información desarrollando un entorno gráfico, mediante el uso de algoritmos y diseño de interfaces en MATLAB.

El montaje experimental está diseñado para objetos sólidos con características dimensionales restringidas, como las que se mencionan a continuación:

- Para una distancia de 40 a 50 cm desde el objeto hasta la cámara lo ideal es trabajar con muestras no mayores de 6 mm x 6 mm.
- Lo anterior puede cambiar si se aumenta la distancia de separación entre el objeto y la cámara aunque se pierda un poco de resolución en la imagen capturada, de esta manera si se tiene 1 m de distancia desde la cámara al objeto se puede trabajar con muestras de hasta 15 mm x 15 mm aproximadamente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un montaje experimental de análisis, con técnicas de interferometría holográfica e identificación de variaciones usando un sistema de tratamiento de imágenes en software.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Recolectar y definir técnicas de análisis por interferometría holográfica que sea posible aplicar en nuestro medio.
- ✓ Implementar un sistema experimental el cual permita incluir un módulo de análisis por interferometría holográfica digital.
- ✓ Desarrollar un módulo de adquisición de señales gráficas a partir de las técnicas de interferometría holográfica implementadas.
- ✓ Realizar una implementación en software que permita visualizar los resultados para el procesamiento de imágenes y obtención de patrones de análisis utilizando una interfaz gráfica en Matlab.
- ✓ Verificar los datos obtenidos.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 GENERALIDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Como fundamento teórico para la explicación de algunos fenómenos ópticos existen dos modelos muy útiles, que son: el modelo ondulatorio y el modelo cuántico. En el caso particular que se está estudiando es de interés conocer el fenómeno ondulatorio; este modelo proporciona muchas ventajas cuando se realizan análisis de fenómenos basados en interferencia. Por esta razón, y partiendo de los principios del fenómeno ondulatorio, se puede considerar a la luz como una onda transversal, donde la vibración es perpendicular a la dirección de la onda. Dentro de las características principales de la onda que se utiliza para representar la radiación electromagnética visible (en este caso luz) se encuentran:

- Longitud de Onda (λ): se define como la distancia entre dos crestas o valles consecutivos.
- Frecuencia (ν): Es el número de crestas que pasan por un lugar en un segundo.
- Velocidad (c): Velocidad de propagación de la luz.

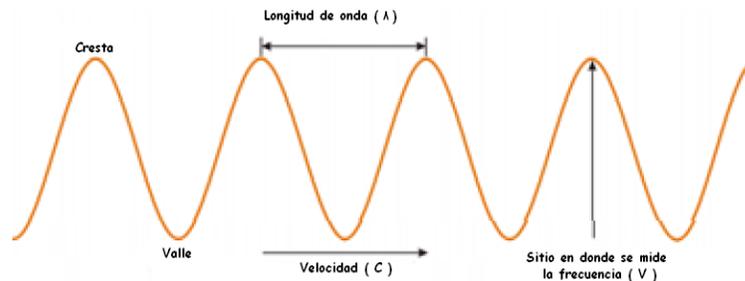


Figura 2. Representación gráfica de una onda.

Teniendo en cuenta, que cuando dos frentes de onda interfieren, es importante conocer la intensidad de luz que se genera producto de este fenómeno, por lo tanto se puede definir la intensidad de luz, como la cantidad de energía que atraviesa perpendicularmente la unidad de superficie colocada en un determinado punto y en la unidad de tiempo, proveniente de una fuente de energía.

1.1.1 Espectro electromagnético. El espectro se puede definir como la descomposición de la luz en los diferentes colores que emite una fuente luminosa, cada uno de estos, asociados a una longitud de onda diferente. En esta

investigación se trabaja solo en una fracción del espectro visible, constituido por la luz de color azul, verde, amarilla y roja, que se encuentran entre los 400 nm y 700 nm de longitud de onda.

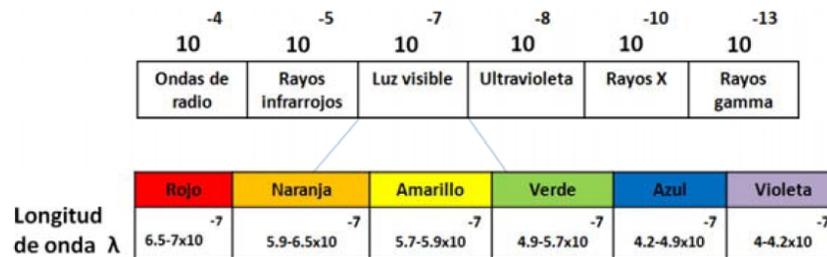


Figura 3. Espectro electromagnético.

1.1.2 Coherencia¹. Una de las condiciones para generar interferencia es que el haz de luz con el que se va a trabajar provenga de una fuente monocromática coherente, de esta manera, se considera que dos puntos de una onda son coherentes cuando guardan una relación de fase constante, es decir cuando conocido el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos, es posible predecir el de otro.

Existen dos tipos de coherencia, la coherencia temporal y la coherencia espacial; la primera surge cuando la luz tiene una longitud de onda única (o una frecuencia única), siendo esta la propiedad de la monocromaticidad. La coherencia temporal es una medida de la capacidad de la radiación para producir interferencia, como resultado de diferencias entre las longitudes de onda de dos haces. La coherencia espacial hace referencia a una relación de fase definida entre puntos distintos de una sección transversal de un haz luminoso. Cuando se producen franjas de interferencia puede ser por la coherencia espacial o la temporal.

1.2 INTERFERENCIA

1.2.1 Definición. Cuando dos ondas de igual naturaleza se propagan simultáneamente por un mismo medio, cada punto del medio sufrirá la perturbación resultante de la composición de ambas ondas. Este fenómeno de superposición de ondas recibe el nombre de interferencia y constituye uno de los más representativos del comportamiento ondulatorio. Por ejemplo, la interferencia en las ondas de luz es la causa de que se vean algunas veces las irisaciones en las burbujas de jabón debido a que la luz blanca se compone de distintas longitudes de onda, por lo tanto las ondas de luz reflejadas al interior de la burbuja interfieren con las ondas de esa misma longitud reflejadas en la superficie exterior.

Se denomina interferencia a la superposición coherente, tanto espacial como temporalmente, de dos o más ondas en un punto determinado.

¹ FINN, Edward. ALONSO, Marcelo. "Campos Y Ondas". Volumen II

Para este caso de análisis se tienen dos ondas, una proveniente de la luz propagada por el objeto a estudiar, de amplitud $O(x,y)$ y fase $\varphi_o(x,y)$; y otra que se denomina de referencia, de amplitud $R(x,y)$ y de fase $\varphi_r(x,y)$; sumándolas coherentemente se obtiene otra onda de intensidad:

$$I(x,y) = |O(x,y) + R(x,y)|^2 \quad (1)$$

Que se puede expresar de la siguiente manera:

$$I(x,y) = I_o(x,y) + I_r(x,y) + 2\sqrt{I_o(x,y) \cdot I_r(x,y)} \cdot \cos[\varphi_o(x,y) - \varphi_r(x,y)] \quad (2)$$

Que se puede escribir como suma de dos términos así:

$$I(x,y) = [I_o(x,y) + I_r(x,y)] + [(2\sqrt{I_o(x,y) \cdot I_r(x,y)})][\cos(\varphi_o(x,y) - \varphi_r(x,y))] \quad (3)$$

El primer término es la suma punto a punto de las intensidades de las ondas objeto y referencia, el segundo término es conocido como término de interferencia ya que es el que contiene la información de las diferencias de fase de las ondas que interfieren. Es este término es el que contiene la información de las características del patrón de interferencia. A partir del registro de la intensidad de la suma de las ondas y del análisis de sus variaciones se puede obtener la información de diferencia de fase entre ellas.

1.2.2 Principio de superposición de ondas. Este principio establece que la magnitud de un desplazamiento ondulatorio en cualquier punto del medio, es igual a la suma de los desplazamientos en ese mismo punto, de todas las ondas presentes. Esto se debe a que la ecuación de onda es lineal, y por tanto al existir dos o más soluciones, cualquier combinación lineal de ellas, también será una solución.

1.2.3 Interferencia constructiva. Se presenta cuando dos ondas sumadas, actúan en concordancia una con la otra de tal forma que aumenta el nivel de la onda. Es decir, cuando el valle o la cresta de una coinciden con el valle o la cresta de otra onda, los efectos individuales se suman, resultando así, una onda de mayor amplitud, en donde se dice que las ondas están en fase.

1.2.4 Interferencia destructiva. Es aquella que se da cuando dos ondas sumadas, actúan en contraposición una con la otra, de tal forma que disminuye el nivel de la onda resultante. Es decir, cuando el valle de una onda se superpone a la cresta de otra, los efectos individuales se reducen. Simplemente, la parte alta de una onda llena la parte baja de la otra, en este caso se dice que las ondas están fuera de fase.

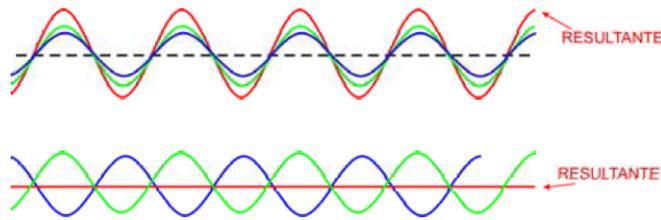


Figura 4. Interferencia constructiva y destructiva.

Ahora, si se imagina lo dicho anteriormente como sucediendo en un solo punto en el espacio, es decir, las ondas que se superponen son las contenidas en un solo rayo de luz. De esta manera, en el caso de interferencia totalmente destructiva, la mancha de luz que se vería no existiría y la luz se habría esfumado aparentemente. Por otro lado, en el caso de interferencia completamente constructiva la mancha de luz sería muy intensa, con una intensidad aparente del doble de una sola de las ondas interfiriendo.

1.2.5 Tipos de franjas de interferencia. Se denomina franjas de interferencia a las zonas claras y oscuras que se verían en una pantalla colocada en la región de interferencia. Por lo tanto, es necesario saber en qué región están localizadas las franjas, pues allí se ubicara el instrumento de captura (ojo, cámara, telescopio). De acuerdo a lo anterior las franjas pueden clasificarse en:

- Reales. Son aquellas que se pueden observar en una pantalla sin necesidad de un sistema adicional de enfoque, ya que los rayos conformadores de estas franjas convergen, por si solos, al punto de observación.
- Virtuales. Estas franjas no pueden proyectarse en una pantalla sin un sistema de enfoque, puesto que aquí los rayos conformadores, no convergen.

1.3 INTERFEROMETRÍA

La interferometría, es la técnica de usar el patrón de interferencia creado por superposición de dos o más ondas, permitiendo así, diagnosticar las características de dichos frentes de onda. Esta técnica se aplica en una amplia variedad de campos, incluyendo la astronomía, la metrología óptica, la oceanografía, la sismología, la mecánica cuántica y la física del plasma.

“La interferometría se basa en el fenómeno de la interferencia, que se puede producir cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se superponen sobre una pantalla. Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo. Esto es prácticamente posible sólo si la luz de ambas ondas que se interfieren proviene de la misma fuente luminosa. Pero si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben

generarse de alguna manera del mismo haz. Existen dos procedimientos para lograr esto: se denomina al primero división de amplitud y al segundo división de frente de onda².

De esta manera, surgen los interferómetros, que son instrumentos que emplean la interferencia de ondas de luz para la medida ultraprecisa de longitudes de onda de la misma luz, de distancias pequeñas y de determinados fenómenos ópticos.

Existen varios tipos de interferómetros, pero en todos ellos hay dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas determinadas por un sistema de espejos y placas que finalmente, se unen para formar franjas de interferencia, con los cuales se logra tanto la división por amplitud como la división por frente de onda que son el interferómetro de Michelson para el primer caso y el interferómetro de Young para el segundo.

1.3.1 Tipos de interferómetros. Existen varios tipos de interferómetros, pero básicamente son dos los que enmarcan los conceptos primarios para la generación de patrones de interferencia provenientes de un solo haz puntual de una fuente de luz monocromática, que son el de Michelson y el de Young y algunas variaciones de estos como lo es el de Fizeau que es el montaje experimental elegido para el desarrollo de esta investigación.

1.3.1.1 Interferómetro de Young. Básicamente fue uno de los primeros experimentos realizados por Thomas Young sobre interferencia de la luz, quien probó concluyentemente que la luz era un fenómeno ondulatorio. El experimento fue realizado en 1803, y consistió en hacer pasar la luz solar a través de un agujero inicial, convirtiéndose así, este haz, en fuente luminosa primaria, con el objetivo de producir un haz espacialmente coherente que podía iluminar de manera idéntica dos agujeros realizados en una tarjeta puesta en frente de la primera perforación. De esta manera logro producir un sistema de franjas alternas, brillantes y oscuras (franjas de interferencia), además comprobó la formación de un patrón de interferencia en la luz procedente de una fuente lejana, al difractarse en el paso por dos rejillas, resultado que contribuyó a la teoría de la naturaleza ondulatoria de la luz.

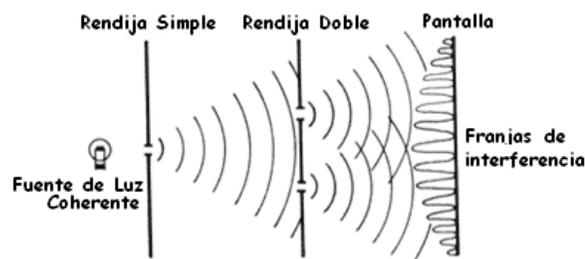


Figura 5. Esquema representativo del interferómetro de Young.

² ZAMBRANO, Pedro. Metrología y normalización en Interferometría. Pág. 1.

1.3.1.2 Interferómetro de Michelson. El interferómetro de Michelson es un instrumento que permite medir distancias con muy alta precisión. Su funcionamiento se basa en la división de una onda de luz monocromática y coherente, en dos que recorren caminos ópticos diferentes y que posteriormente convergen en un punto. Si los dos brazos del interferómetro tienen la misma longitud y los dos espejos forman un ángulo recto, las imágenes debidas a los dos rayos son iguales. De esta manera el resultado para el observador será un patrón de franjas circulares virtuales. Dichas franjas, son como ya se mencionó anteriormente, resultado de la superposición de las dos ondas de luz coherente que recorrieron caminos ópticos diferentes.

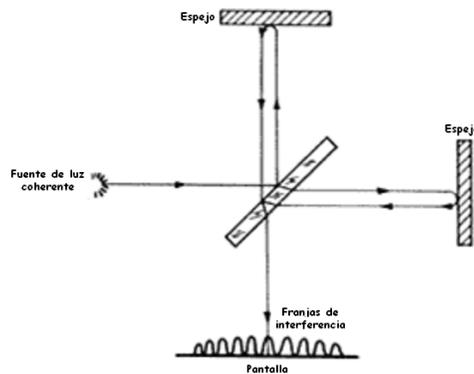


Figura 6. Esquema representativo del interferómetro de Michelson.

Si se desplaza en estas condiciones uno de los espejos una distancia d , las franjas de interferencia también presentarían un desplazamiento. Principalmente las franjas circulares parecerían disminuir su diámetro atenuándose gradualmente hasta perderse en el centro, cuando el desplazamiento es en una dirección, y parecerían aumentar su diámetro y salir del campo de visión cuando el desplazamiento sea en dirección opuesta. Ahora, si se cuenta el número de franjas que pasa por un punto fijo, se puede determinar la magnitud del desplazamiento con precisiones del orden de la longitud de onda del haz luminoso empleado como fuente.

1.3.1.3 Interferómetro de Fizeau. Un interferómetro de Fizeau es un sistema auto colimador (fuente de luz localizada en el punto focal de la lente sobre el eje), compuesto de: lente colimadora, superficie de referencia, diafragma de abertura y la superficie bajo prueba (superficie cónica convexa). Este sistema forma un patrón de interferencia debido a la disposición de los haces reflejados, en el plano de referencia y en la superficie bajo prueba. Para observar el patrón de interferencia se introduce un divisor de haz, el cual desvía los rayos del arreglo, como se puede apreciar en la siguiente figura.

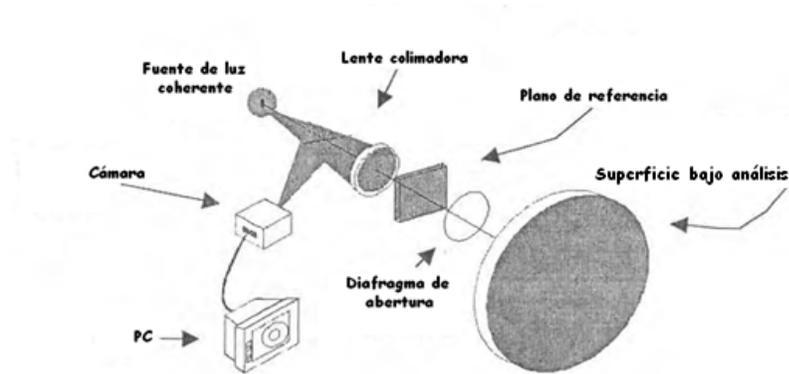


Figura 7. Diagrama real del interferómetro de Fizeau.

La superficie de referencia en un interferómetro de Fizeau generalmente es un plano óptico o una superficie curva, el plano óptico se utiliza para probar superficies planas y la superficie esférica se utiliza para probar superficies esféricas o asféricas, donde el radio de curvatura de la superficie de referencia es muy parecido al de la superficie bajo prueba.

En el interferómetro de Fizeau (figura 8) las franjas poseen el mismo tipo de grosor con las reflexiones en ambas caras de la placa (P). La lente tiene doble propósito, uno para colimar la luz de la fuente coherente y otro para concentrar la luz que regresa al ojo, con el fin de permitir la visualización de todo el patrón de interferencia.

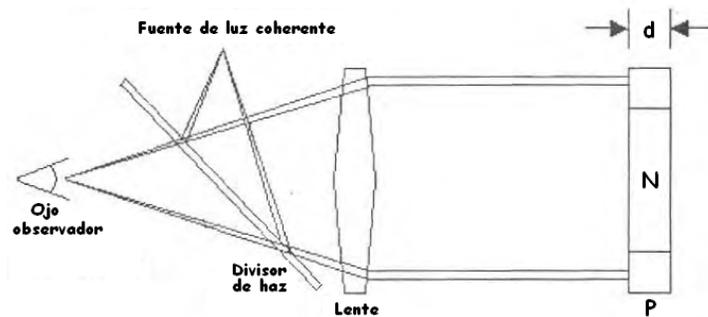


Figura 8. Esquema representativo del interferómetro de Fizeau.

Así, la diferencia de camino óptico estará dada por $DCO = 2nd$, donde d es el grosor de la placa y n su índice de refracción. El campo del interferómetro está libre de franjas si el producto nd es constante, pero si se supone que el índice de refracción es homogéneo, entonces, cualquier franja se puede atribuir únicamente a variaciones en el grosor.

1.4 HOLOGRAFÍA

1.4.1 Definición e historia. Stephen Benton, uno de los pioneros de la holografía, señaló en más de una ocasión que “es la intersección de la ciencia, arte y tecnología lo que hace a la holografía tan interesante”³. Es cierto que la holografía es una de las ramas más importantes de la óptica moderna y ha dado lugar a un gran número de aplicaciones científicas y tecnológicas y ha propiciado técnicas que pueden utilizarse casi en cualquier área de investigación pura o aplicada, pero no es menos cierto que la holografía es uno de los pocos campos científicos que ha proporcionado un medio para el arte.

Como señala Saxby en su libro “Practical Holography”, “para un físico un holograma es el registro de la interacción de dos ondas coherentes, provenientes de fuentes puntuales y monocromáticas, en la forma de un patrón microscópico de franjas interferenciales; para un lego en física, pero quizás bien informado, es una película fotográfica o placa que ha sido expuesta a la luz del láser y procesada de modo que al ser iluminada adecuadamente produce una imagen tridimensional; para alguien menos informado, la holografía es solo algún tipo de fotografía tridimensional”⁴. Es cierto que tanto la fotografía convencional como la holografía hacen uso de una película fotográfica u otro material fotosensible, pero quizás sea solo esto lo que ambas tienen en común. La fotografía y la holografía producen la imagen de forma completamente diferente, y no resulta posible describir en los mismos términos el modo en que se forman los dos tipos de imágenes, la fotográfica y la holográfica, ya que para explicar la formación de la imagen holográfica es necesario recurrir a los conceptos de interferencia y difracción, ambos característicos de las ondas.

Siendo evidente entonces los fundamentos físicos en los que se sustenta la técnica holográfica hay que buscarlos en la naturaleza ondulatoria de la luz, demostrada de forma convincente hacia 1801 por el médico inglés Thomas Young con su experimento de interferencia de doble rendija, evento que sería toda una hazaña en ese tiempo por estar en contraposición a la teoría de la naturaleza corpuscular promovida por un científico de tanto peso y renombre como lo era Isaac Newton en ese entonces. Sin embargo, entre los años 1801 y 1803 Young presentó unos artículos ante la Royal Society exaltando la teoría ondulatoria de la luz y añadiendo a ella un nuevo concepto fundamental, el principio de interferencia. Cuando se superponen las ondas provenientes de dos fuentes luminosas puntuales, sobre una pantalla colocada paralela a la línea de unión de los dos orificios, se producen franjas claras y oscuras regularmente espaciadas.

³ BELENDEZ, Augusto. Holografía: Ciencia, arte y tecnología. Universidad de Alicante. 2009.

⁴ G. Saxby, Practical Holography. Institute of Physics Publishing, Bristol, 2004.

Este es, sin duda, el primer experimento en el que se pone de manifiesto que la superposición de luz puede producir oscuridad.

Al igual que Young fue el responsable del resurgimiento de la teoría ondulatoria de la luz en Inglaterra, Agustín Fresnel lo fue en Francia. Ajeno en un principio a los trabajos realizados por Young varios años antes, Fresnel sintetizó los conceptos de la teoría ondulatoria de Huygens y el principio de interferencia y analizó el fenómeno de la difracción, también característico del movimiento ondulatorio, que se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo. El principio de Huygens-Fresnel permite calcular los diagramas de difracción producidos tanto por obstáculos como por aberturas, siendo posible decir que este principio lleva a la siguiente conclusión: "la luz se difracta y la interferencia está en el corazón del proceso"⁵.

1.4.2 Holograma. Un holograma es el registro de un frente de onda luminoso en donde se conserva la información de carácter complejo de dicho frente, la cual está asociada a la fase del campo óptico de interferencia. De esta manera si se ilumina una placa fotográfica con la luz proveniente de una fuente luminosa, se tendrá registro de la iluminación producida por dicha fuente, pero se perderá la información de carácter complejo (aportada por la fase) que de ningún otro modo quedara registrada. Es entonces en donde aparece la genialidad de la holografía, ya que esta consiste en como modular y codificar sobre el frente de onda (proveniente del objeto), para que al registrarse en un medio sensible a la iluminación (no a la amplitud de la onda) se conserve la información de la fase.

1.4.3 Registro y reconstrucción de un frente de onda. Para analizar estos procesos se estudia el registro holográfico de un frente de onda proveniente de una fuente puntual. Entonces, sean F_o y F_R dos fuentes de luz puntuales y absolutamente coherentes que iluminan simultáneamente al medio de registro M, como se indica en la siguiente figura:

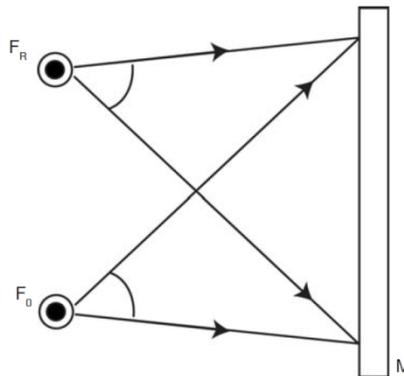


Figura 9. Esquema del registro de un holograma.

⁵ E. Hecht, Óptica. Addison Wesley. Madrid. 1999.

Por lo tanto, hay que tener en cuenta que a diferencia de la fotografía convencional, en esta técnica se emplea una fuente de referencia cuya radiación es coherente con la del objeto fuente y cuyos frentes de onda se desean registrar. Las amplitudes A_o y A_R de las ondas generadas en el plano M por las fuentes F_o y F_R se sumaran coherentemente, por lo que la amplitud total en este plano será:

$$A_T = A_R + A_o \quad (4)$$

Entonces la intensidad I en este plano estará dada por:

$$I = |A_T|^2 = |A_R|^2 + |A_o|^2 + A_R A_o^* + A_o A_R^* \quad (5)$$

De esta manera y si se supone que el medio de registro M después de su procesamiento adquiere un transmitancia de amplitudes T_A que depende de la exposición $E = I \cdot t$ donde t es el tiempo de exposición e I la intensidad. Además se supone también que la transmitancia de amplitudes T_A se puede descomponer en una serie de Taylor de la exposición de $I \cdot t$, entonces:

$$T_A = \alpha_1 + \alpha_2 I t + \dots \approx$$

$$T_A = \alpha_1 + \alpha_2 (|A_R|^2 + |A_o|^2 + A_R A_o^* + A_o A_R^*) t \quad (6)$$

Así, desde el punto de vista físico, la expresión (6) es la descripción matemática de la transmitancia de amplitudes en el material M, conteniendo información sobre las iluminaciones producidas por cada una de las fuentes por separado, tanto del objeto ($|A_o|^2$) como de la referencia ($|A_R|^2$) de las amplitudes de cada una de las ondas, sin que se haya perdido la información de fase ($A_R A_o^*$, $A_o A_R^*$).

Entonces, lo importante ahora es saber cómo descifrar la información codificada en el material de registro M; para ello se iluminara con la fuente de referencia colocada en la misma posición que tuvo durante el registro, como se indica en la siguiente figura:

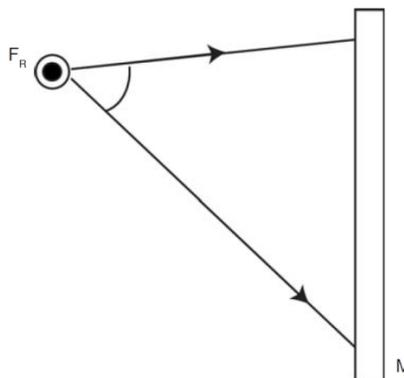


Figura 10. Esquema simplificado de la reconstrucción de un holograma.

Esto quiere decir que el frente de onda inmediatamente después del medio de registro A_M tendrá la forma:

$$A_M = T_A \cdot A_R = (\alpha_1 + \alpha_2 t(|A_R|^2 + |A_0|^2))A_R + \alpha_2 t A_R A_R A_0^* + \alpha_2 t A_0 A_R A_R^* \quad (7)$$

Si se analiza los términos de la anterior expresión, se tiene:

- $(\alpha_1 + \alpha_2 t(|A_R|^2 + |A_0|^2))A_R$ no contiene información útil sobre el frente de onda A_0 y, además, es muy uniforme y representa una atenuación del frente de onda A_R , incidente al material de registro.
- $\alpha_2 t A_0 A_R A_R^*$ representa una copia *fiel* del frente de onda A_0 , es su reproducción.
- $\alpha_2 t A_R A_R A_0^*$ es una copia con la perspectiva *invertida* del frente de onda de A_0 , es su reproducción, aunque con cambios en sus propiedades.

Es así como se puede identificar tres ondas propias de un holograma, que son: el haz directamente transmitido, la reproducción del frente de onda proveniente de la fuente objeto y el frente de onda conjugado a este y que de ningún modo se hallaba presente inicialmente.

Dentro del proceso de reconstrucción de un holograma es muy importante conocer el tipo de imágenes que se forman producto de dicho proceso, por eso se menciona a continuación una breve descripción acerca de la naturaleza de dichas imágenes.

Para efecto de lo anterior se supone que la fuente objeto F_0 forma parte de una fuente de forma más compleja, como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

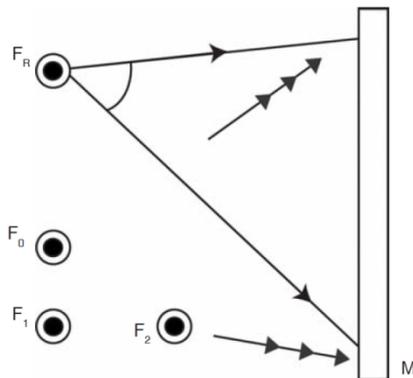


Figura 11. Esquema simplificado del registro de un holograma.

Donde F_R es una fuente puntual de luz de referencia F_0, F_1, F_2 son fuentes puntuales de luz de tres objetos.

De este modo, realizando la reconstrucción según el análisis anterior se obtuvieron tres ondas que se muestran a continuación:

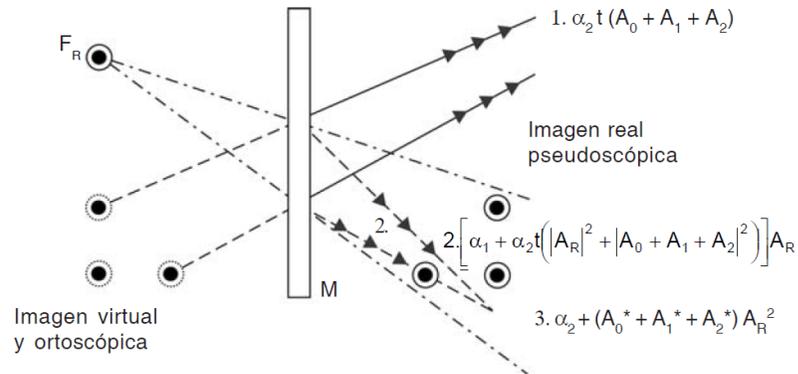


Figura 12. Esquema simplificado de la reconstrucción de un holograma.

De la anterior gráfica se puede interpretar que un observador colocado en el camino del haz 1 vera una imagen virtual y ortoscópica (con la perspectiva correcta). Si se coloca en el camino del haz 2 vera una imagen real del objeto original, pero seudoscópica (es decir, con la perspectiva invertida) y si se coloca en el camino del haz 3 se iluminara con la luz proveniente de la fuente F_R , pero atenuada.

Al realizar de manera práctica la reconstrucción de la forma mencionada la imagen seudoscópica tiene muy mala calidad o está ausente, para explicar lo anterior hay que darse cuenta que en la expresión para la transmitancia de amplitudes (6) se supuso tácitamente que el medio de registro era plano con espesor nulo, como en condiciones reales eso no se cumple, a los haces difractados se les imponen condiciones físicas complementarias, dadas por las propias características de la estructura difractante.

Para el caso de la difracción de un haz plano en una red (rejilla) volumétrica periódica, condición conocida como Ley de Bragg, se tiene que el haz correspondiente a la imagen virtual ortoscópica sí se forma, mientras que el correspondiente a la real seudoscópica muchas veces no se forma. Esto último depende del espesor del material de registro y de las distancias típicas entre los máximos y mínimos perfiles de interferencia registrados en él.

Una situación diferente se presenta cuando se supone una iluminación del holograma, no con el frente de onda A_R sino con el frente de onda A_R^* , consiguiéndolo al girar el holograma 180° (Figura 13).

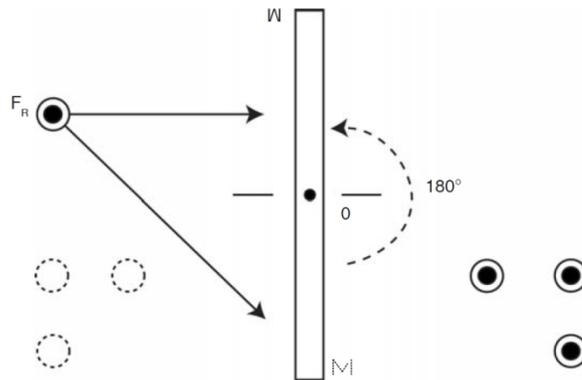


Figura 13. Esquema simplificado de la reconstrucción de un holograma después de girarlo 180°.

En este caso, la imagen virtual ortoscópica no cumple con las condiciones para la difracción volumétrica mientras que la imagen real ortoscópica sí, por lo que se podrá obtener con buena calidad.

1.4.4 Métodos matemáticos para la reconstrucción de un frente de onda. Teniendo en cuenta que en holografía es muy importante la información compleja de la imagen capturada y que es aportada por la fase, entonces se hace necesario conocer algunas de las herramientas matemáticas más empleadas para trabajar en el dominio de la frecuencia, pues es de interés enfocar este tipo de técnicas al estudio imágenes digitales, las cuales pueden ser representadas tanto en dominio del espacio como en el de la frecuencia, que será revisado con más detalle.

Por lo tanto “las representaciones en el dominio de la frecuencia, detallan con cuánta frecuencia se repiten ciertos patrones en una imagen, y con ello consiguen representar la información de tal imagen. Esta representación puede ser especialmente útil, ya que teniendo la frecuencia de repetición de tales patrones se pueden detectar y alterar directamente elementos presentes en las imágenes como el ruido, los contornos o las texturas”⁶.

1.4.4.1 Transformada de Fourier. Las series de Fourier son unas herramientas matemáticas especialmente útiles para describir fenómenos periódicos y para aproximar funciones no lineales.

Las series de Fourier se basan en las series trigonométricas. Se llama serie trigonométrica de coeficientes $\{a_n\}$ y $\{b_n\}$ a una serie funcional de la forma:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(mx) \quad (8)$$

Se llama serie de Fourier de la función periódica $f(x)$ definida en el intervalo $[-\pi, \pi]$ a la serie trigonométrica que tiene de coeficientes:

⁶ VÉLEZ, José Francisco. Visión por computador. Pág. 90.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad \forall n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$b_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(mx) dx \quad \forall m = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

En adelante se entenderá por coeficiente cada uno de los pares (a_i, b_i) . Así el coeficiente enésimo define la amplitud de las series de cosenos y senos de frecuencia enésima.

Se puede demostrar que una serie trigonométrica definida con base a estos coeficientes converge a la función $f(x)$ que le da origen, salvo a lo sumo en un número finito de puntos. Así, una serie de Fourier puede verse como la suma de un conjunto de funciones sinusoidales de diferentes frecuencias, promediada por unos coeficientes, con el objetivo de aproximarse a una función $f(x)$. Estos coeficientes evalúan qué peso tiene cada una de las funciones sinusoidales a la hora de construir la función $f(x)$. Por eso, el conjunto de señales sinusoidales, debe verse como una base en el dominio de la frecuencia. Al conjunto de coeficientes correspondientes a la serie de Fourier de una función se le denomina transformada de Fourier de la función. El resultado de la transformada de Fourier de una función suele representarse mediante dos diagramas. Uno indica el módulo de cada coeficiente de Fourier (a_n, b_m) , el otro indica su dirección o fase. Para funciones unidimensionales estos diagramas son dos histogramas, que representan respectivamente el valor del módulo y el de la fase para cada frecuencia.

Como en este trabajo se realiza un procesamiento digital de imágenes es necesario entonces conocer como poder aplicar la Transformada de Fourier en dicho proceso, pues para ello, es necesario ampliar la definición dada anteriormente para aplicaciones con funciones bidimensionales.

De esta manera para el tratamiento de imágenes digitales en escala de grises $I(x, y)$ se tiene la siguiente definición de coeficientes $I_c(n, m)$ que se calculan según:

$$I_c(n, m) = \mathcal{F}(I, n, m) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x, y) \cdot e^{-j\frac{2\pi xn}{N}} \cdot e^{-j\frac{2\pi my}{N}} ; \quad \forall n, m = 0, 1 \dots N - 1 \quad (11)$$

Es importante resaltar que la anterior definición solo es aplicable para imágenes cuadradas.

La matriz de módulos contiene la información relativa a los valores de intensidad de la imagen (las amplitudes de las sinusoides). La matriz de fase contiene la información relativa a la posición de los píxeles (la posición de los flancos de subida y bajada de las sinusoides). Es por eso que si se realiza la transformada inversa teniendo en cuenta sólo la matriz de fase se obtiene una imagen parecida al trazado de los contornos o bordes de los objetos presentes en la imagen. Por otro lado, la realización de la transformada inversa teniendo en cuenta sólo la matriz de módulos proporciona una imagen de manchas con tonos parecidos a los de la imagen original.

Ahora, la inversa de de la transformada de Fourier de una imagen digital está dada por:

$$I(x,y) = \mathfrak{F}^{-1}(I_c, x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} I_c(n,m) \cdot e^{j\frac{2\pi xn}{N}} \cdot e^{j\frac{2\pi my}{N}} ; \forall x,y = 0,1 \dots N-1 \quad (12)$$

Estas transformaciones se pueden realizar sobre imágenes en color (RGB) sin más que repetir el tratamiento que se describe para cada una de las componentes de color.

1.4.4.2 Aproximación por Fresnel.⁷ En holografía digital la reconstrucción del campo complejo de una imagen se realiza numéricamente, para obtener así la imagen digital real del objeto bajo estudio. Para la evaluación de la teoría de la difracción se puede emplear métodos matemáticos que fácilmente se pueden implementar en algoritmos computacionales y que han tenido una amplia difusión, permitiendo así muchos avances en metrología.

En la siguiente figura, se puede apreciar un holograma digital en donde el objeto no es visible directamente, puesto que existe una codificación en frecuencia debido al campo complejo registrado por el instrumento de captura.

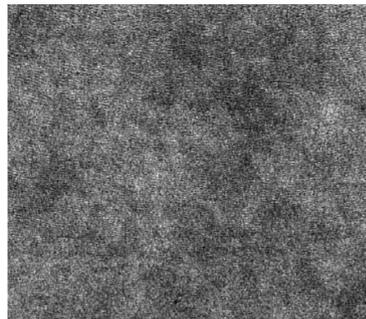


Figura 14. Imagen correspondiente al holograma digital de un objeto.

⁷ Hirsh, Sven. Digital and Analog Hologram Tomography for Medical Applications. 2006, Pág. 15.

Para una reconstrucción del campo óptico original, el holograma debe ser iluminado por el conjugado de la onda de referencia (en un holograma análogo este proceso es completamente óptico) lo que permite reconstruir numéricamente la imagen original del objeto.

La siguiente gráfica ilustra la ubicación de los diferentes planos presentes en la reconstrucción numérica del campo óptico para un holograma digital.

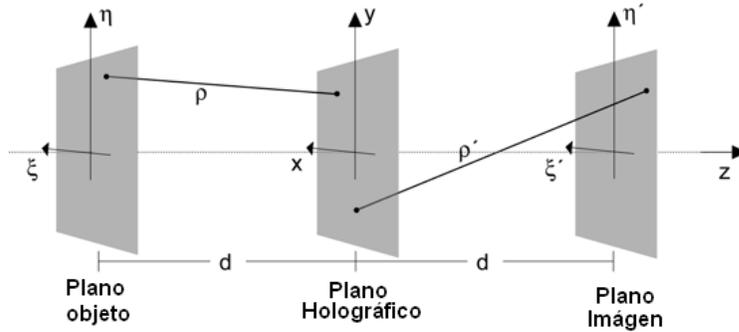


Figura 15. Sistema Coordinado para la reconstrucción numérica de un holograma digital.

El punto de partida para la descripción matemática de la reconstrucción del campo óptico del holograma es la integral de Fresnel-Kirchhoff, la cual hace referencia a la difracción de un frente de onda en una abertura. Cuando se ilumina un holograma $h(x, y)$ con una onda de referencia E_R , el campo óptico resultante es:

$$r(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h(x, y) E_R(x, y) e^{-i2\pi\rho'}}{\rho'} dx dy \quad (13)$$

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (14)$$

Donde ρ' es la distancia entre un punto en el plano holograma y un punto en el plano reconstrucción. La imagen real en la reconstrucción de un holograma se obtiene cuando la onda de referencia E_R se reemplaza por su complejo conjugado E_R^* , como se mencionó anteriormente, entonces reemplazando en la ecuación (13) se tiene:

$$r(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) \frac{E_R^*(x, y) e^{-i2\pi\rho}}{\rho} dx dy \quad (15)$$

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2} \quad (16)$$

La imagen real surge donde estuvo el objeto durante la captura del holograma. Las coordenadas ρ' tienen que ser cambiadas por ρ puesto que la onda de referencia incide en el lugar opuesto del campo óptico descrito en la ecuación (13).

Las fórmulas (13) y (15) generalmente no son iguales, solo para la onda del plano referencia donde $E_R = E_R^*$ para el cual se tendrá un valor de distancia d negativo.

“El cálculo directo de la integral de Fresnel-Kirchhoff es muy dispendioso, por lo que se hace necesario usar aproximaciones. Dos métodos comunes son la aproximación por Fresnel y la aproximación por Convolución, ambos computacionalmente más fáciles de implementar y con menor tiempo de computo para el procesamiento. La aproximación por Fresnel es el método de reconstrucción numérica del campo óptico empleado como frente de propagación en esta tesis. La aproximación por Convolución, es en teoría, precisa, pero requiere la introducción de parámetros de la óptica empleada en el montaje experimental, lo que introduce a su vez más aproximaciones en los cálculos, sin embargo, se describirá brevemente en el siguiente apartado”.

De esta manera en la aproximación por Fresnel, si el ángulo entre los puntos del plano objeto ξ y η y los puntos en el plano holograma x y y son pequeños con respecto a la distancia d entre los planos, la raíz cuadrada en la fórmula (16) se puede expandir en una serie de Taylor:

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} - \frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2}{8d^3} + \dots \quad (17)$$

Ahora, si el cuarto término es mucho menor que la longitud de onda este puede ser despreciado, entonces:

$$\frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2}{8d^3} \ll \lambda$$

Así, la distancia ρ puede ser reducida a una expresión lineal de términos cuadráticos:

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} \quad (18)$$

Si se aproxima el denominador de la ecuación (15), con $\rho = d$ se puede mantener valores pequeños para los ángulos en estos planos, lo que permite obtener el siguiente resultado:

$$r(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(x, y) E_R^*(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]} dx dy \quad (19)$$

Realizando la multiplicación en la integral, los factores pueden sacarse, lo que permite obtener la aproximación de Fresnel continua:

$$r(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(x, y) E_R^*(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} e^{i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)} dx dy \quad (20)$$

La anterior ecuación permite la reconstrucción del campo óptico original del holograma $\mathbf{h}(x, y)$. Teniendo en cuenta la similitud con la transformada de Fourier, es posible realizar la siguiente sustitución de factores:

$$v = \frac{\eta}{\lambda d} \quad y \quad \mu = \frac{\xi}{\lambda d} \quad (21)$$

La ecuación (20) se simplifica en:

$$r(v, \mu) = \frac{i}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} e^{-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(x, y) E_R^*(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} e^{i2\pi(xv + y\mu)} dx dy \quad (22)$$

Aquí la similitud con la transformada de Fourier continua se hace evidente, además del factor antes de la integral, se puede detectar una transformada inversa de Fourier \mathfrak{F}^{-1} de una función determinada por la onda de referencia, un factor de corrección de fase y el holograma, entonces:

$$r(v, \mu) = \frac{i}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} e^{-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)} \mathfrak{F}^{-1} \left[\mathbf{h}(x, y) E_R^*(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} \right] \quad (23)$$

La anterior ecuación describe el comportamiento de una señal continua, la función $r(v, \mu)$ se muestrea en una matriz de $M \times N$ puntos con un tamaño de Δx y Δy , valores tomados del tamaño del pixel de la cámara empleada como instrumento de captura del holograma. De esta manera la señal anterior se puede expresar de manera discreta como:

$$r(m, n) = \frac{i}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} e^{-i\pi\lambda d(m^2\Delta v^2 + n^2\Delta\mu^2)} \dots \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} \mathbf{h}(k, l) E_R^*(k, l) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)} e^{i2\pi(km\Delta x\Delta v + ln\Delta y\Delta\mu)} \quad (24)$$

Para $m = 0,1,2,\dots,M-1$ y $n = 0,1,2,\dots,N-1$.

Por lo tanto el tamaño de pixel para una imagen plana estará dado por: $v = m\Delta v$ y $\mu = n\Delta\mu$. La anterior demostración fue realizada con una función simplificada, pero que es aceptable para los fines de procesamiento requeridos en este trabajo. En general cada valor es una integración de la intensidad recibida sobre la magnitud del pixel.

De acuerdo con Schnars en su libro "Digital Holography"⁸ la relación que existe para la transformada de Fourier entre $\Delta x, \Delta y$ y $\Delta v, \Delta\mu$ es:

$$\Delta v = \frac{1}{M\Delta x} ; \Delta\mu = \frac{1}{N\Delta y} \quad (25)$$

Reemplazando en términos de ξ y η se tiene:

$$\Delta\xi = \frac{\lambda d}{M\Delta x} ; \Delta\eta = \frac{\lambda d}{N\Delta y} \quad (26)$$

Con la substitución de los términos anteriores se obtiene la fórmula de la aproximación de Fresnel. Con los resultados encontrados en las fórmulas (25) y (26) la ecuación (24) expresada completamente en el plano objeto es:

$$\begin{aligned} r(m,n) &= \frac{i}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} e^{-i\pi\lambda d\left(\frac{m^2}{M^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)} \dots \\ &\sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k,l) E_R^*(k,l) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)} e^{i2\pi\left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)} \end{aligned} \quad (27)$$

La intensidad el campo óptico es:

$$I(\xi, \eta) = |r(\xi, \eta)|^2 \quad (28)$$

La fase del campo óptico es:

$$\phi(\xi, \eta) = \frac{\arctan \text{Im}[r(\xi, \eta)]}{\text{Re}[r(\xi, \eta)]} \quad (29)$$

Con la aproximación la dimensión de la imagen estará dada por:

$$\Delta x = \frac{d_{obj}\lambda}{N\Delta\xi} \quad (30)$$

⁸ SCHNARS, Ulf. Digital Holography. Springer. 2005.

El holograma puede ser considerado como una apertura de dimensión $N\Delta x \times N\Delta x$. Un patrón de difracción se forma detrás del holograma. $\Delta\xi = \lambda d / N\Delta x$ es el radio del disco de aire o el diámetro del Speckle que pone el límite físico para la formación de la imagen.

Así, el cálculo aparentemente complicado que se mencionó anteriormente puede reducirse a una formulación más simple:

$$r(\xi, \eta) = c_1 \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left(h E_R^* [c] \right) \right\}_2 \quad (31)$$

Lo que indica una multiplicación compleja del holograma h con el factor de fase c_2 y la onda de referencia conjugada E_R^* . El resultado de esto puede ser tratado como una transformada inversa de Fourier. La constante c_1 al principio del término puede ser despreciada.

La anterior ecuación solo es válida para algunas formas de onda de referencia. En el caso de una onda de referencia esférica se tiene:

$$E_R = e^{-i \frac{\pi}{\lambda d_{ref}} (x^2 \Delta\xi^2 + y^2 \Delta\eta^2)} \quad (32)$$

Considerando que para una onda de referencia plana es un factor constante. En el proceso de reconstrucción numérica cualquier plano de la imagen real puede ser calculado a una distancia arbitraria. Esto es como si se introdujera la imagen real en una pantalla de proyección. Calculando consecutivamente los perfiles (toma axial del objeto bajo estudio) la imagen real se puede obtener digitalmente, este procedimiento es conocido en holografía digital como tomografía.

Finalmente, es posible concluir que la base para la reconstrucción numérica de hologramas digitales es la integral de Fresnel-Kirchhoff (13), de la cual se desprende la aproximación de Fresnel (anteriormente expuesta) y que basa su principio de desarrollo en la aproximación de Taylor.

1.4.4.3 Aproximación por Convulación.⁹ Una alternativa muy común para la reconstrucción de un frente de onda es la llamada aproximación por Convulación, la cual es en principio exacta. Esto suena prometedor, pero existe una limitación que es la introducción de un valor aproximado para una lente. La aproximación por Convulación se mencionara brevemente por no ser el método numérico de reconstrucción empleado en esta investigación.

⁹ Hirsh, Sven. Digital and Analog Hologram Tomography for Medical Applications. 2006. Pág. 20.

La integral de Fresnel-Kirchhoff puede ser considerada como una Convolución, así siguiendo el teorema de Convolución la integral puede ser separada como se indica a continuación:

$$r(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}(\mathbf{h}E_R^*)G\} \quad (33)$$

Donde:

$$G(n, m) = \exp\left\{-i\frac{2\pi d_{obj}}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \left(n + \frac{N^2 \Delta x^2}{2d\lambda}\right)^2}{N^2 \Delta x^2} - \frac{\lambda^2 \left(m + \frac{M^2 \Delta y^2}{2d\lambda}\right)^2}{M^2 \Delta y^2}}\right\} \quad (34)$$

A diferencia de la aproximación de Fresnel, el tamaño de pixel no es fijo, este tiene que ser ajustado con una lente numérica L . Entonces la reconstrucción estará dada por:

$$r(\xi', \eta') = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}(\mathbf{h}E_R^* L)G\} \quad (35)$$

Con una lente cuya descripción matemática es:

$$L(\xi', \eta') = e^{\left(\frac{-2\pi \xi'^2 \eta'^2}{2f}\right)} \quad (36)$$

Por lo tanto, la única solución razonable para el factor de la lente es confinar el área de estudio exactamente al área respectiva de la aproximación de Fresnel. Después de la reconstrucción completa, el campo es simplemente una repetición periódica de celdas unitarias. Entre más grande sea el tamaño del campo se podrá observar más claramente la información periódica, puesto que si el área escogida es muy pequeña predominara el patrón de Speckle en la imagen, lo que no permitirá apreciar con claridad el campo seleccionado.

1.5 INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA

1.5.1 Técnicas de interferometría holográfica. Teniendo en cuenta que por la capacidad de generación de distintos tipos de imágenes tridimensionales y por su utilidad como instrumento de medida, la holografía ha sido aplicada en una amplia gama de campos de la ciencia, permitiéndole así un desarrollo en conjunto con la mayoría de las disciplinas con las que tiene contacto, pues su versatilidad admite realizar múltiples aplicaciones, entre las que se destaca, la metrología óptica, cimentándose en su capacidad para la reconstrucción de frentes de onda, lo que

permite efectuar una comparación de perfiles ópticos para obtener una interpretación tanto cualitativa como cuantitativa de las similitudes y diferencias entre ellos. La anterior descripción, que es una idea general del fundamento de la interferometría, permitiendo introducir el concepto de interferometría holográfica, cuando se tiene que al menos, uno de los frentes de onda estudiados, se obtuvo empleando métodos holográficos. Mediante el análisis de las franjas generadas por la interferencia o superposición de los frentes de onda es posible reconocer las diferencias o similitudes existentes entre ellos.

A continuación se describen algunas de las técnicas de interferometría holográfica revisadas en este trabajo de investigación:

- Interferometría holográfica de doble exposición. “En este método, dos ondas difractadas por el mismo objeto en dos diferentes estados son registradas consecutivamente sobre la misma placa holográfica. El primer registro es convencional y da lugar a un holograma del objeto en estado “relajado”. Luego, se perturba el objeto o la situación de estudio y se registra el nuevo patrón de interferencia en la misma placa. En general, este procedimiento se puede repetir para más exposiciones”¹⁰, logrando de esta manera la adición coherente de frentes de onda complejos. Al momento de iluminar el holograma procesado, se obtendrá la reconstrucción de tantos campos como exposiciones se hayan realizado, es decir, se contará con la superposición coherente de tantos términos como estados del objeto se obtuvieron durante el proceso de registro. En el caso puntual de doble exposición, se obtendrá como resultado de la reconstrucción, dos campos complejos correspondientes a los estados inicial y final del objeto bajo estudio. Dicha reconstrucción de los campos complejos coherentes en un mismo espacio origina fenómenos de interferencia, de tal manera que al observar las imágenes a través del holograma se tendrá la presencia de franjas debido a las diferencias de fase entre estos campos; diferencias de fase derivadas de los cambios en el objeto entre un estado y otro.
- Interferometría holográfica de media temporal. “Esta técnica constituye una generalización del procedimiento de múltiples exposiciones a un continuo de tiempo de exposición. Es utilizada para analizar las vibraciones de objetos sometidos a movimientos oscilatorios cíclicos. Para ello, la superficie u objeto vibrante se registra holográficamente, pero en un proceso donde el tiempo de exposición es necesariamente más grande que el periodo del movimiento”¹¹. De esta manera el resultado del registro será una media temporal de las posiciones que toma cada punto durante el movimiento. Mediante la aplicación de análisis matemático se puede demostrar que la amplitud óptica para cada punto en la imagen reconstruida presenta un comportamiento dependiente de

¹⁰ GABOR, Dennis. Optical image synthesis by holographic Fourier transformation.1965.

¹¹ POWELL, R. Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction.1965.

la profundidad o amplitud del movimiento en ese punto; siendo posible entonces, obtener de estas imágenes información acerca de los modos de vibración y de las medidas de las amplitudes de vibración.

- Interferometría holográfica en tiempo real. “En esta técnica, la interferencia buscada se obtiene superponiendo, en tiempo real, el frente de onda reconstruido holográficamente con el frente de onda coherente reflejado o transmitido por el mismo objeto”¹². Para efectos de lo anterior se realiza el registro convencional de un holograma del objeto bajo análisis, el cual se reubica exactamente en la misma posición que tenía la película durante el proceso de registro, para posteriormente proceder a reconstruir el perfil interferométrico obtenido. Así, cuando éste es iluminado con la onda de referencia original, la imagen virtual coincide con el objeto. Sin embargo, si la forma o la posición del objeto cambia levemente, serán dos ondas de luz las que alcanzarán al observador: una será la onda reconstruida holográficamente y la otra la que provenga del objeto en su estado presente. Estos frentes de onda se superpondrán y como resultado el observador verá una imagen reconstruida cubierta de un patrón de franjas de interferencia, correspondiente al mapa de cambios del objeto.

1.5.1.1 Interferometría de Speckle. “La interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI, por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Pattern Interferometry) es un método óptico no destructivo basado en iluminación láser y sistemas optoelectrónicos de captura y análisis de datos cuyo diseño determina la sensibilidad a las diferentes componentes del desplazamiento”¹³. Dependiendo del diseño experimental, se puede hacer un instrumento sensible a componentes de desplazamiento fuera del plano o en el plano e incluso a funciones de ellas mismas, como sus primeras y segundas derivadas. ESPI permite la detección en campo completo de los desplazamientos de un objeto de prueba. Como los defectos internos y externos introducen anomalías en los desplazamientos, éstos son traducidos en anomalías del patrón de franjas observado. Esto explica el porqué la detección interna de fracturas es posible con ESPI.

1.5.1.2 Patrón de moteado (Speckle). La apariencia granular de un objeto cuando es iluminado por luz coherente es llamada efecto de moteado. El patrón de moteado, causado por la interferencia aleatoria de luz esparcida desde varios puntos de la superficie del objeto, actúa como una rejilla natural impresa en el objeto. Se han reportado varias técnicas en la utilización de este modelo para medir deformación de la superficie.

¹² BROOKS, R. E. Interferometry with a holographically reconstructed reference beam. 1965.

¹³ JONCS, R. and WYKES, C. Holographic and speckle interferometry. Second edition. Pág 19.

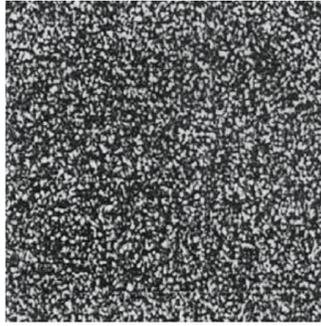


Figura 16. Patrón de moteado (Speckle).

El efecto de moteado puede usarse para obtener información de los desplazamientos a lo largo de los ejes x, y, z de un sistema de coordenadas previamente establecido sobre el objeto. Dependiendo de la dirección de iluminación y la dirección de observación, pueden crearse sistemas experimentales sensibles en plano y fuera de plano.

1.6 METROLOGÍA

“La metrología (del griego μ o , medida y o o , tratado) es la ciencia y técnica que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesos y medidas, y la determinación de las magnitudes físicas”¹⁴ . La metrología, en general, trata del estudio y aplicación de todos los medios propios para la medida de magnitudes, tales como: longitudes, ángulos, masas, tiempos, velocidades, temperaturas, intensidades de corriente, entre otros.

Por esta enumeración, limitada voluntariamente, es fácil ver que la metrología entra en todos los dominios de la ciencia. Por múltiples razones prácticas, el hombre cada vez más tiene la necesidad de medir propiedades físicas con mayor precisión. En su solución viene la óptica como una herramienta supremamente eficiente, con la cual se pueden tomar medidas mucho más pequeñas no imaginables por otros medios.

De esta manera, una clase de metrología es la de tipo óptico, que es la técnica implementada en este trabajo y que se puede definir como una rama de la óptica que tiene como propósito efectuar medidas de muy alta precisión usando las ondas de la luz como escala. Esto se hace por medio de unos instrumentos llamados interferómetros, basados en el fenómeno de interferencia, cuyo principio físico radica fundamentalmente en la naturaleza ondulatoria de la luz.

1.6.1 Ventajas de la medición no invasiva. El creciente auge de los métodos de diagnóstico no invasivo en las últimas dos décadas, ha permitido explorar distintas

¹⁴ FRANCO, Irene. Metrología. Pág 1.

técnicas de análisis, en diversos campos de la ciencia, gracias a que este tipo de estudios no tienen ningún efecto secundario en la muestra a analizar, es decir, no se altera ninguna propiedad inherente del elemento durante el desarrollo del estudio. Los métodos de diagnóstico no invasivo, son empleados entre los más destacados, en la industria de la aviación, en plantas de producción industrial y en el sector automotriz, en la mayoría de estos, para el control de calidad de piezas mediante la detección de imperfecciones mínimas.

Dentro de los métodos no invasivos se encuentran el Ultrasonido, las medidas por corrientes de Eddy, los Rayos X y las técnicas ópticas como ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) y HI (Holographic Interferometry), que es la técnica empleada en este trabajo.

Las ventajas más importantes de la interferometría holográfica como método de diagnóstico no invasivo, son que no existe contacto físico alguno entre el instrumento de medida y el objeto bajo análisis, lo que permite la no alteración de ninguna de las propiedades físicas de la muestra, combinado con un tiempo de exposición mínimo, además de un diagnóstico casi en tiempo real y alta precisión en las medidas, generalmente del orden submicrométrico.

En esta investigación se empleó un método interferométrico para el análisis de deformaciones en un objeto, por lo tanto se listan a continuación, algunas de las características que lo hacen particularmente útil en mediciones dentro determinados rangos:

- Las mediciones realizadas son de carácter no invasivo y sin contacto. Se emplea solo la reflexión o transmisión de campos ópticos y debido a las intensidades utilizadas no se causan alteraciones al objeto bajo análisis, aún en casos delicados, como lo sería el estudio de elementos biológicos.
- Dos estados determinados de un objeto en estudio, pueden ser comparados, gracias a que tanto la generación como la evaluación de la información holográfica puede ser separada temporal y localmente.
- La posibilidad de realizar registros mediante ventanas transparentes permite hacer mediciones tanto en ambientes controlados como hostiles.
- Los beneficios alcanzados en resolución y exactitud en la medición de desplazamientos empleando técnicas interferométricas permiten realizar el cálculo numérico de esfuerzos y deformaciones a nivel microscópico o submicroscópico.

1.7 FILTRADO DE IMÁGENES EN HOLOGRAFÍA DIGITAL

Teniendo en cuenta que una baja relación señal-ruido contribuye a la reducción del desempeño de los sistemas ópticos, es necesario buscar la manera de aumentarla, por lo tanto la revisión de procedimientos para dicho fin se hace indispensable y se tratara en varios de los siguientes apartados de este trabajo.

Entre algunos de los inconvenientes más comunes derivados de la baja relación señal-ruido en métodos ópticos se encuentra el caso puntual de la holografía digital, en donde la reducción del desempeño se ve reflejada en una afección significativa de la eficacia para el reconocimiento de objetos tridimensionales. El anterior problema adquiere mayor importancia al considerar las limitaciones impuestas por los sistemas de visualización y procesamiento de señales digitales.

De esta manera, en holografía digital se tienen dos problemas que contribuyen a la reducción de desempeño, los cuales son: el orden cero de difracción y el ruido de Speckle. “El primero, por su alto contenido energético, consume la totalidad del rango dinámico de los sistemas de visualización, ocultando la información de interés; y el segundo, por sus características de ruido impulsivo, reduce significativamente la resolución espacial del sistema y la capacidad de procesamiento punto a punto de las imágenes reconstruidas”¹⁵.

1.7.1 Eliminación de la componente DC. La presencia del orden cero de difracción es parte de uno de los inconvenientes más destacados en las imágenes holográficas, el cual genera consecuencias devastadoras en las imágenes capturadas empleando holografía digital, debido al rango dinámico limitado del sistema de visualización. Por lo tanto la presencia de niveles altos de gris del orden cero de difracción ocultan la imagen holográfica misma, como se puede apreciar en la siguiente figura:

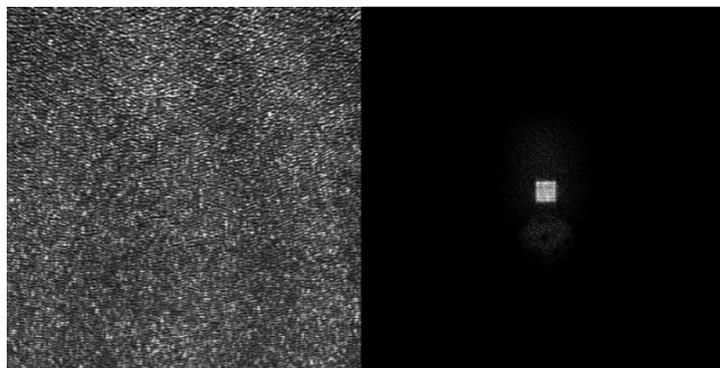


Figura 17. Holograma digital: Izquierda, Intensidad registrada por el instrumento de captura; Derecha, reconstrucción numérica sin la eliminación del orden cero de difracción.

¹⁵ HERRERA, Jorge. Tratamiento del ruido en holografía digital. 2004.

Se han realizado muchos intentos dirigidos a la eliminación de la existencia del orden cero de difracción, todos sustentados en los beneficios que ofrece la era digital e inspirados en aplicaciones digitales de conceptos ópticos o en técnicas de procesamiento digital de imágenes existentes que se encuentran bien establecidas. Para entender el origen de la formación de este componente DC u orden cero de difracción en la imagen, es necesario remitirse a la ecuación (1), la cual se puede reescribir de la siguiente manera:

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = a_r^2 + a_0^2 + 2a_r a_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_r) \quad (37)$$

Los dos primeros términos de la anterior ecuación introducen el componente DC en el proceso de reconstrucción y el tercer término es una variación estadística entre $\pm 2a_r a_0$ de pixel a pixel de la cámara empleada como instrumento de captura de las imágenes holográficas. De esta manera, la intensidad promedio de todos los pixeles que componen la matriz holográfica, está dada por:

$$I_m = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k\Delta x, l\Delta y) \quad (38)$$

Ahora, si a la intensidad total del holograma se le resta la intensidad promedio, el término $a_r^2 + a_0^2$, desaparece y se obtiene:

$$I'(k\Delta x, l\Delta y) = I(k\Delta x, l\Delta y) - I_m(k\Delta x, l\Delta y) \text{ para } K = 0, \dots, N - 1; L = 0, \dots, N - 1 \quad (39)$$

La reconstrucción numérica de I' genera una imagen con un porcentaje de orden cero muy inferior al de la imagen original.

La siguiente figura, muestra los cambios en un holograma digital al cual se le ha realizado el proceso de eliminación de la componente DC.

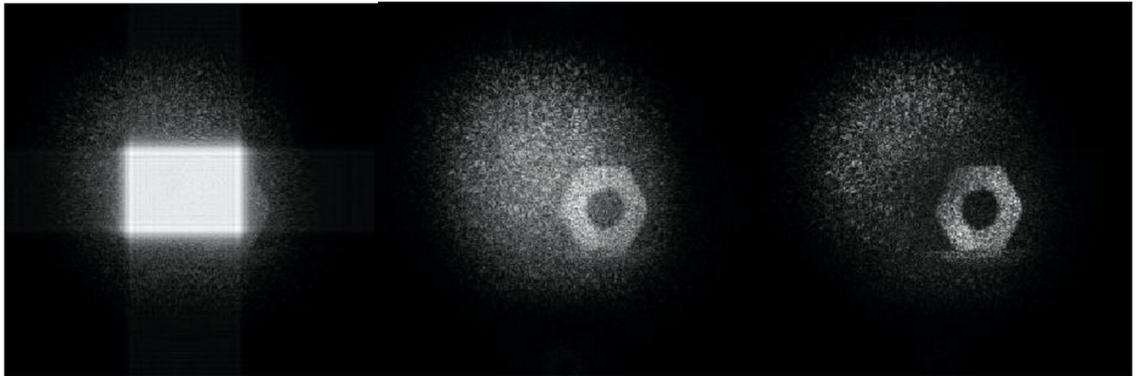


Figura 18. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Centro, Holograma digital con supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con supresión de orden cero y filtro pasa-alto.

La substracción de la intensidad promedio del holograma antes de la reconstrucción es la idea básica para la eliminación del componente DC de la imagen. Es posible conseguir el mismo efecto si se restan dos perfiles interferométricos con diferentes patrones de Speckle en sus franjas, por lo tanto al reconstruir el holograma resultado de la sustracción se obtendrá una imagen con un componente DC no tan evidente.

Otro método, quizás un poco más fácil de implementar es el enmascaramiento del orden cero de difracción, el cual se puede realizar elaborando una máscara digital como se indica a continuación:

- Identificar la posición que contenga el valor de gris del máximo de la intensidad de la imagen reconstruida.
- Determinar todos los pixeles con valores de gris no menores que el 50% del máximo, alrededor de esta posición.
- Reemplazar los valores de gris de estos pixeles por valores aleatorios menores que dicho 50%.
- Reescalamiento de la representación de la imagen para recuperar la apariencia del holograma inicial reconstruido.

Lo anterior sirve para mejorar el rango dinámico en el dispositivo de visualización, lo que permite advertir la imagen reconstruida. Sin embargo, la calidad que se obtiene no es óptima, debido a que algún ruido del orden cero de difracción aparece todavía y, como ocurre en holografía óptica la incómoda región enmascarada aún es visible.

El resultado obtenido después de realizar el anterior proceso de enmascaramiento se indica en la siguiente figura:

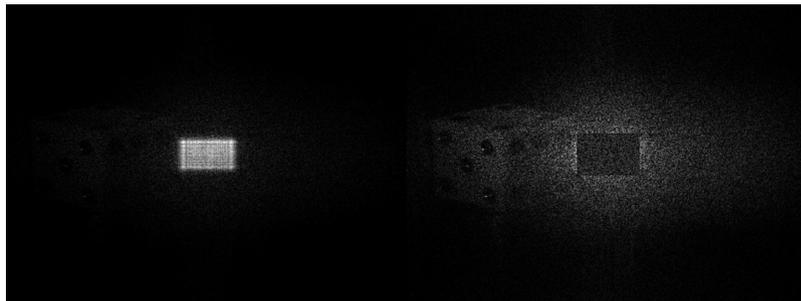


Figura 19. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con enmascaramiento de orden cero.

Otro procedimiento usual empleado para la eliminación de la componente DC de una imagen holográfica es el filtrado espacial de esta, el cual digitalmente se puede conseguir de la siguiente manera:

- Calcular la transformada de Fourier del holograma.
- Enmascarar los términos no deseados.
- Recuperar el holograma aplicando la transformada inversa de Fourier.

Así, el resultado obtenido después de realizar el anterior proceso de filtraje espacial se puede apreciar en la siguiente figura:

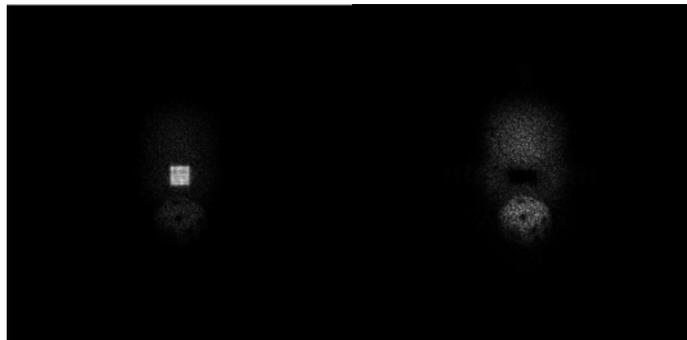


Figura 20. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con filtraje espacial.

La efectividad de esta técnica, es notoria, aunque presenta una desventaja, que es la necesidad de varias transformaciones, además de la correspondiente a la reconstrucción de la imagen misma. Adicionalmente, la selección de la región a desechar en el espectro debe ser manual, ya que no está acotada dentro de unos límites bien definidos, debido a que la intensidad de la onda objeto que hace parte del término DC, aporta frecuencias ligeramente esparcidas alrededor del cero del plano espectral. En consecuencia a ello, parte del orden cero de difracción será difícil de enmascarar y por tanto, persistirá algún nivel de ruido en la imagen reconstruida.

Finalmente, se presenta una de las mejores opciones para la eliminación del orden cero de difracción, la cual es uno de los insumos básicos en uno de los módulos de procesamiento digital de imágenes del software desarrollado para el análisis de perfiles interferométricos en esta investigación.

Esta opción se basa en “la interpretación del término DC como información óptica de frecuencia cero, como campo óptico no difractado durante el proceso de reconstrucción, el cual corresponde a un valor fijo de intensidad sumado sobre todos los píxeles del holograma registrado”¹⁶. Así, dicho término DC estará dado

¹⁶ KREIS, T. y JÜPTNER W. Suppression of the dc tem in digital holography.1997.

por el promedio de intensidades asociadas a todos los pixeles del holograma registrado, entonces retomando las ecuaciones (38) y (39) teniendo:

$$I_m = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k,l)$$

Por lo tanto al restar la intensidad promedio I_m de cada pixel del holograma original $I(k,l)$ se obtiene el holograma modificado $I'(k,l)$, dado por:

$$I'(k,l) = I(k,l) - I_m(k,l) \text{ para } K = 0, \dots, N-1; L = 0, \dots, N-1$$

El cual genera la imagen que se muestra en la figura 21, después del debido proceso de reconstrucción y eliminación de orden cero.

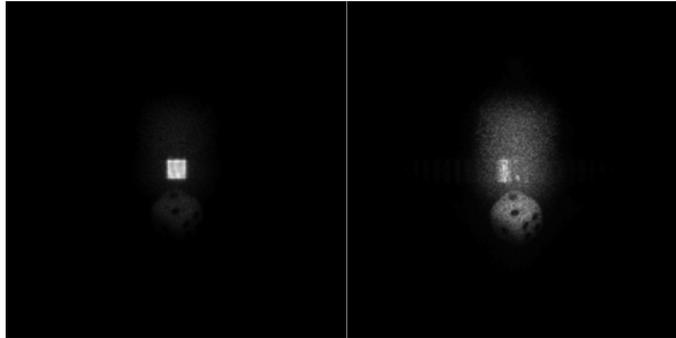


Figura 21. Izquierda, Holograma digital sin supresión de orden cero; Derecha, Holograma digital con eliminación de orden cero de difracción por medio de la sustracción del valor promedio de intensidad del holograma registrado.

Es importante mencionar que este simple procedimiento de eliminación del orden cero de difracción no tiene contraparte óptica. El anterior procedimiento puede ser interpretado también como un filtraje pasa alto con muy baja frecuencia de corte. Dicha interpretación permite proponer un procedimiento de filtrado pasa alto con frecuencia de corte variable, que entrega hologramas modificados $I'(k\Delta x, l\Delta y)$, obtenidos luego de sustraer el promedio de una vecindad de pixeles $p \times p$, de cada pixel en el holograma original. De acuerdo con lo anterior:

$$I'(k,l) = I(k,l) - \frac{1}{p^2} \sum_{i=-\frac{p-1}{2}}^{+\frac{p-1}{2}} \sum_{j=-\frac{p-1}{2}}^{+\frac{p-1}{2}} I[(k+i), (l+j)] \text{ donde } p = 2n+1; n = 0,1,2 \dots \quad (40)$$

$$k = \frac{p-1}{2}, \frac{p-1}{2} + 1, \dots, N_x - \frac{p-1}{2}; l = \frac{p-1}{2}, \frac{p-1}{2} + 1, \dots, N_y - \frac{p-1}{2} \quad (41)$$

En la siguiente figura, se puede observar el resultado de la aplicación de la anterior descripción matemática para un orden $p = 3$ y $p = 5$, respectivamente. Se observa, que mientras más bajo el orden del promedio de la vecindad de píxeles, la supresión del orden cero de difracción es más eficaz. Pero también es evidente el detrimento fuerte de las imágenes, a causa de la eliminación de una región cada vez más amplia de frecuencias espaciales, pues a medida que el orden p del procedimiento baja, la frecuencia de corte del filtro aumenta.

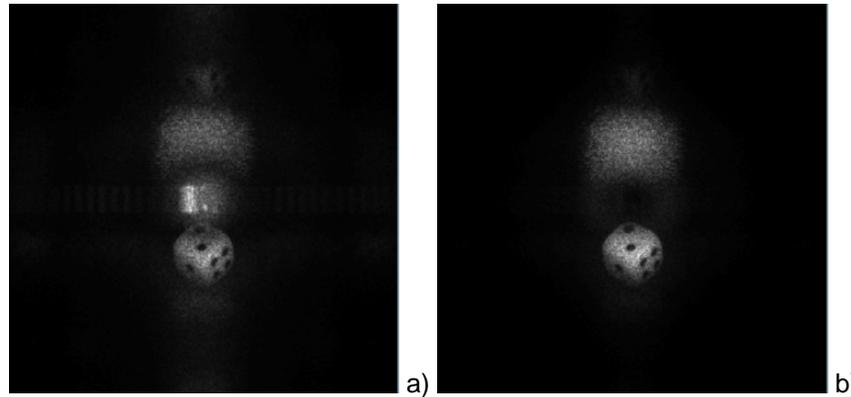


Figura 22. Hologramas digitales con supresión de orden cero mediante la sustracción del promedio de una vecindad de a) 3×3 y b) 5×5 .

De la anterior figura se puede inferir que los métodos de filtrado, reemplazan el orden cero de difracción por un valor de intensidad más bajo que el original, de manera que la imagen reconstruida puede visualizarse después del reescalamiento.

1.7.2 Ruido Speckle en una imagen. La presencia de ruido Speckle en las imágenes obtenidas mediante holografía digital es una de las limitaciones más frecuentes a tratar cuando se procesa este tipo de imágenes, ya que su presencia en ellas contribuye al desmejoramiento de la calidad de las mismas.

Para tratar de superar esta limitación existen algunas alternativas como por ejemplo: “reducción del Speckle desde el registro mismo del holograma, reducción a través del procesamiento de la imagen reconstruida, optimización de los dispositivos de registro y una combinación inteligente de estos esfuerzos”¹⁷. De esta manera “una técnica que se puede emplear para la limpieza de la imagen del ruido Speckle basada en el procesamiento digital de imágenes consiste básicamente en la reducción del tamaño del holograma reconstruido”¹⁸, a través del procedimiento que se esquematiza en la siguiente figura:

¹⁷ HERRERA, Jorge. Tratamiento del ruido en holografía digital. 2004.

¹⁸ FRAUEL, Y., TAJAHUERCE, E., CASTRO, M., and JAVIDI, B. Distortion-tolerant three dimensional object recognition with digital holography. 2001.

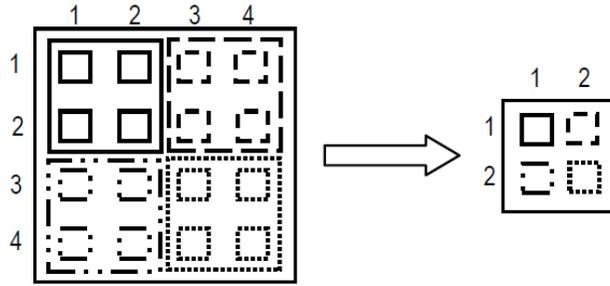


Figura 23. Ilustración del procedimiento para la reducción del tamaño de la imagen reconstruida.

Partiendo del holograma original reconstruido $I(m, n)$ se puede obtener una versión reducida $I'(m', n')$, para el cual cada píxel resulta de promediar regiones cuadradas de lado p en la imagen $I(m, n)$. Por lo tanto, el número de píxeles de la imagen $I(m, n)$ es $N_x \times N_y$, donde N_x y N_y corresponden al número de píxeles del sensor CMOS o CCD (empleado como instrumento de captura) a lo largo de cada eje coordenado, así el número de píxeles en la imagen reducida $I'(m', n')$ estará dado por: $\text{int}\left(\frac{N_x}{p}\right) \times \text{int}\left(\frac{N_y}{p}\right)$, donde int representa la parte entera y p el orden de reducción.

Dicha reducción se puede entender como un filtrado pasa bajo localizado y modificado, que permite generar una imagen de salida más pequeña y suavizada comparada con la original. La región de suavización es un cuadrado de lado p , esto es, cada píxel de la matriz $I'(m', n')$ se obtiene del promedio local de una vecindad de píxeles de $I(m, n)$, por lo tanto:

$$I'(m', n') = \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p I[(p[m' - 1] + i), (p[n' - 1] + j)] \text{ donde } p = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (42)$$

$$m' = 1, 2, \dots, \text{int}\left(\frac{N_x}{p}\right); n' = 1, 2, \dots, \text{int}\left(\frac{N_y}{p}\right) \quad (43)$$

La reducción del ruido Speckle en las siguientes imágenes permiten evidenciar la efectividad de la técnica empleada. Por otra parte, si se analiza los efectos del procedimiento sobre las imágenes es posible concluir que entre más grande sea el orden de reducción, más pequeño será el ruido Speckle (la reducción más notoria se obtiene con $p = 5$), también se tiene un incremento en la borrosidad de la imagen debido al filtrado pasa bajo, contribuyendo a la disminución de la calidad de la misma. Lo anterior significa que la elección del orden de reducción está supeditado a la aplicación específica, al tamaño de la imagen original y al ruido Speckle presente inicialmente en la imagen reconstruida.

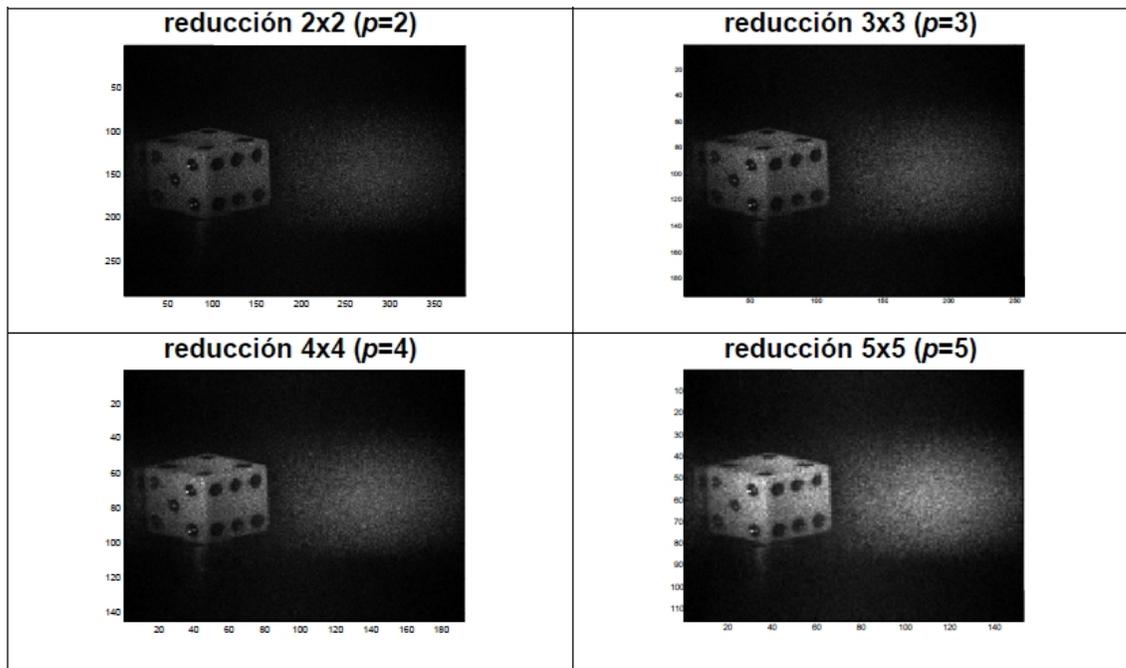


Figura 24. Reducción del ruido Speckle mediante el cambio del tamaño de la imagen.

1.7.3 Filtro pasa bajos. Para realizar un filtrado de este tipo basta con poner a cero los módulos de los coeficientes de Fourier relativos a las altas frecuencias, dejando sin modificar los de las bajas frecuencias. Es importante mencionar que dependiendo de la aplicación se debe elegir una frecuencia de corte adecuada a partir de la cual se considere si una frecuencia es alta o baja. En la siguiente figura, se muestra una imagen sobre la cual se ha aplicado un filtro pasa bajos, junto con sus correspondientes matrices de Fourier y la respectiva escala empleada para ello:



Figura 25. Izquierda: Imagen original; Centro: Imagen filtrada empleando un filtro pasa bajos; Derecha: Matrices de Fourier y escala de color empleada.

1.7.4 Filtro de mediana y de promedio. Para poder describir el efecto de estos dos filtros en una imagen, es necesario mencionar primero que ambos se pueden considerar como filtros de suavizado, por lo tanto el suavizado espacial consiste en el promediado de los pixeles adyacentes al pixel que se evalúa. Si se describe el filtro de suavizado más simple que se pueda diseñar, este corresponde a una

matriz de 3×3 con todos los elementos a 1. Ahora, el resultado de la Convolución de cada pixel se deberá dividir por 9 para asegurar la obtención de valores dentro del rango de la matriz. Los efectos de este filtro se pueden apreciar en la siguiente figura:



Figura 26. Aplicación de un filtrado espacial de suavizado; Izquierda: Imagen original; Derecha: Imagen suavizada.

Otros ejemplos de matrices de filtros de suavizado espacial se indican a continuación:

$$h = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} ; h = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Teniendo en cuenta lo anterior se puede definir los conceptos de filtro de mediana y de promedio:

- Filtro de mediana. Se basa en la sustitución del valor de un pixel por el valor de la mediana del conjunto formado por él mismo y sus ocho vecinos.
- Filtro de promedio. Consiste en la comparación de la intensidad de un pixel con la de sus ocho vecinos. Si la diferencia es superior a cierto umbral U (definido previamente), se sustituye tal pixel por el valor promedio de los pixeles vecinos, en otro caso se mantiene su valor de intensidad.

Se debe resaltar que tanto el filtro de mediana como el de promedio, son filtros no lineales, y por tanto no se pueden obtener mediante una operación de convolución. Lo anterior debido a que si se cuenta con un operador O para imágenes bidimensionales se dice que es lineal si cumple:

$$O[k_1 \cdot I_1(x, y) + k_2 \cdot I_2(x, y)] = k_1 \cdot O[I_1(x, y)] + k_2 \cdot O[I_2(x, y)] \quad (44)$$

Siendo k_1 y k_2 dos constantes e I_1 e I_2 dos imágenes bidimensionales.

1.7.5 Filtro de ventana de Fourier. El efecto temporal de una medida finita puede ser incorporado en un análisis de Fourier usando una función ventana. La ventana

en el dominio del tiempo hace referencia a la ventana temporal, así como la transformada de Fourier hace referencia a la ventana espectral. Lo anterior permite describir brevemente el efecto de la ventana en el tiempo sobre una medida espectral, teniendo en cuenta la forma de la ventana que se va a aplicar.

De esta manera si se limita las medidas de tiempo a una ventana temporal de longitud T se tendrá un efecto sobre la transformada de Fourier de la señal truncada. Definiendo la transformada de Fourier como:

$$\tilde{X}(w) = \int_{-T/2}^{+T/2} X(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} w(t)X(t) e^{-j\omega t} dt \quad (45)$$

$$w(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq T/2 \\ 0 & |t| > T/2 \end{cases} \quad (46)$$

Usando la propiedad de modulación de la transformada de Fourier se puede expresar el espectro de $\tilde{X}(w)$ en términos del espectro de Fourier de $X(w)$ y la ventana espectral $W(w)$, así:

$$\tilde{X}(w) = \frac{1}{2\pi} X(w) * W(w) \quad (47)$$

En la anterior ecuación se observa que el espectro $\tilde{X}(w)$ es igual a la convolución de $X(w)$, con la ventana espectral $W(w)$. La ventana espectral puede interpretarse como un filtro espacial aplicado al espectro de $X(w)$, generando así una mezcla de componentes espectrales. Para conservar las características de este espectro, la ventana espectral debe ser real y altamente concentrada en la región de $w = 0$. Las dos primeras condiciones requieren del tiempo de la ventana para que esta sea real. El último requisito será claro cuando se mencionen las características espectrales de la función ventana $w(t)$.

Ahora, si se toma una ventana rectangular de ancho T , su transformada de Fourier estará dada por.

$$W(w) = \frac{2\text{sen}(wT/2)}{w} \quad (48)$$

Esta función presenta su primer cruce por cero en $w_0 = 2\pi/T$. La ventana espectral muestra un decaimiento relativamente lento, en orden de w^{-1} . Algunos de los efectos negativos son la presencia de armónicos laterales y el comportamiento oscilatorio, como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

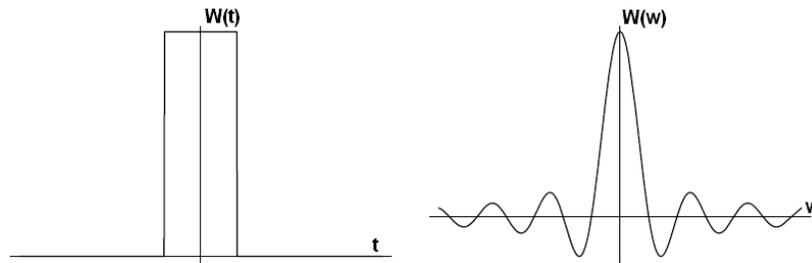


Figura 27. Izquierda: Ventana de tiempo rectangular; Derecha: transformada de Fourier de la función ventana.

El impacto del filtro de ventana se puede apreciar más claramente cuando se aplica a una señal puramente sinusoidal, entonces para $X(t) = \cos(w_0 t)$, se tiene:

$$\bar{X}(w) = \frac{1}{2\pi} [\pi\delta(w + w_0) + \pi\delta(w - w_0)] * W(w) = \frac{1}{2}W(w + w_0) + \frac{1}{2}W(w - w_0) \quad (49)$$

$$\bar{X}(w) = \frac{\text{sen}\left(\frac{[w + w_0]T}{2}\right)}{w + w_0} + \frac{\text{sen}\left(\frac{[w - w_0]T}{2}\right)}{w - w_0} \quad (50)$$

En la figura 28, se puede apreciar el espectro de la ventana sinusoidal anteriormente descrita, en donde es evidente la simetría de las frecuencias dominantes en su espectro.

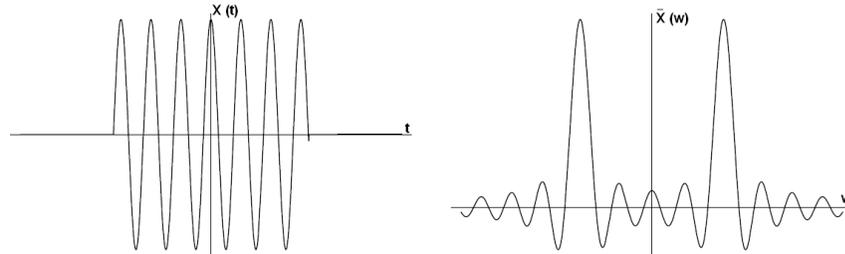


Figura 28. Izquierda: Ventana de tiempo sinusoidal; Derecha: transformada de Fourier de la función ventana.

Nótese que cambios pequeños en el ancho de la ventana rectangular aplicados a la señal sinusoidal pueden generar discontinuidades en las fronteras. Dichas discontinuidades afectan el espectro de Fourier pero no han sido tenidas en cuenta hasta el momento. Si se aplica esta técnica a señales arbitrarias (con espectros arbitrarios), posiblemente la interpretación de los resultados será muy complicada, debido a que prácticamente es imposible distinguir una cresta pequeña al lado de una cresta grande de los artefactos resonantes. Otro inconveniente es la llamada resolución espectral, es decir, la capacidad para distinguir la mínima diferencia de frecuencia entre dos picos de frecuencia en la evaluación del espectro. En la siguiente figura, se indican los espectros (solamente para frecuencias positivas) de dos señales sinusoidales y de su suma,

de esta manera si se reduce la diferencia de frecuencia por debajo de cierto punto de referencia se alcanzara el máximo cambio en la separación de dos crestas.

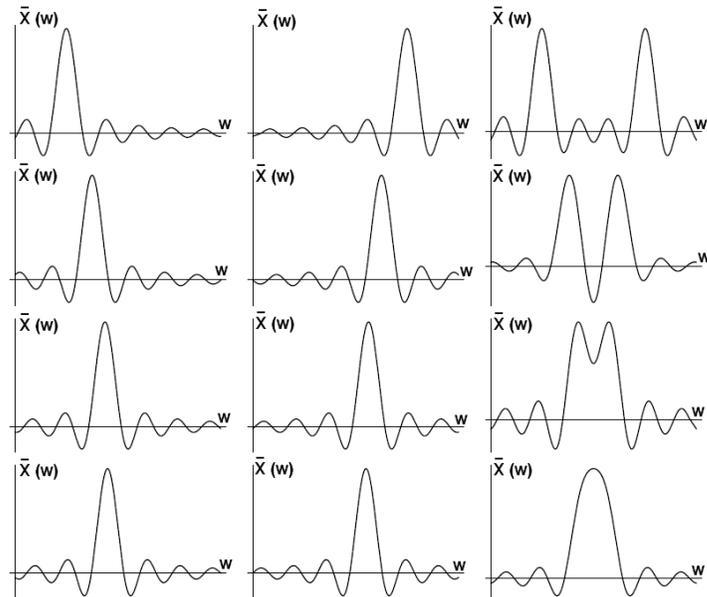


Figura 29. Cada fila contiene el espectro solo de frecuencias positivas para dos señales sinusoidales diferentes y para su suma, la diferencia de las frecuencias entre las sinusoides se aprecia en la forma de las crestas y de los valles de las ondas.

Explorando una opción diferente para $w(t)$ se obtendrá cambios en las propiedades espectrales, así los lóbulos laterales negativos pueden suprimirse por un cambio simple de la ventana espectral, por ejemplo tomando el cuadrado de dicha ventana. Lo anterior puede lograrse reemplazando la ventana de tiempo rectangular por una ventana de tiempo triangular de base $2T$, el resultado será una convolución de la ventana de tiempo rectangular con ella misma. Con ello la ventana espectral se vuelve más concentrada y se deteriora más rápidamente, aunque puede hacerse aun más compacta elevándola a una potencia más alta, por ejemplo a la cuatro. Como consecuencia se nota que la ventana de tiempo se convierte cada vez más, en un método efectivo para la supresión de armónicos producto de los artefactos resonantes (Figura 30).

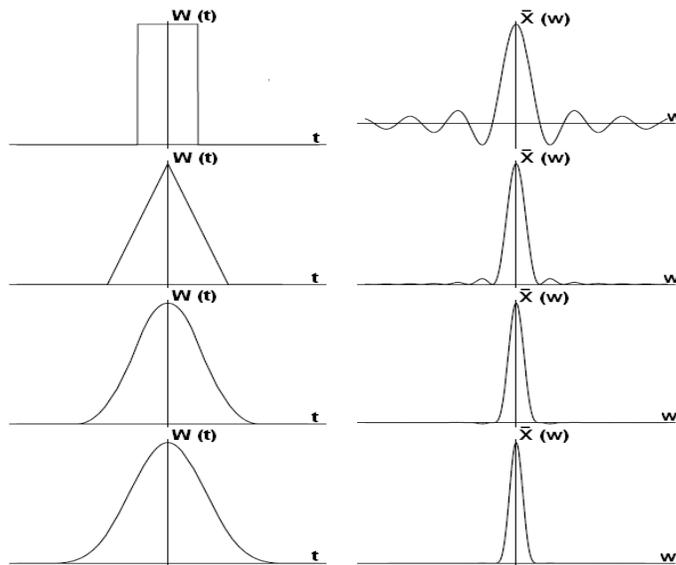


Figura 30. Las ventanas de tiempo pueden ser derivadas de la ventana rectangular convolucionando la función rectangular con ella misma. Izquierda: (a. sin convolución, b. con una convolución, c. con dos convoluciones, d. con tres convoluciones); Derecha: Ventanas espectrales correspondientes a las ventanas de tiempo ya mencionadas.

El anterior método permite evitar las discontinuidades en las fronteras de la ventana de tiempo. La localización de la unión entre tiempo y frecuencia no puede ser alcanzada, pero obedece a un principio de incertidumbre, que es la Teoría del límite central, en donde los estados de una función se aproximan a una función Gaussiana (Figura 31).

La función Gaussiana posee algunas propiedades especiales como:

1. La transformada de Fourier de una función Gaussiana es nuevamente una función Gaussiana.
2. La función Gaussiana minimiza el producto duración-tiempo y el ancho de la banda espectral.

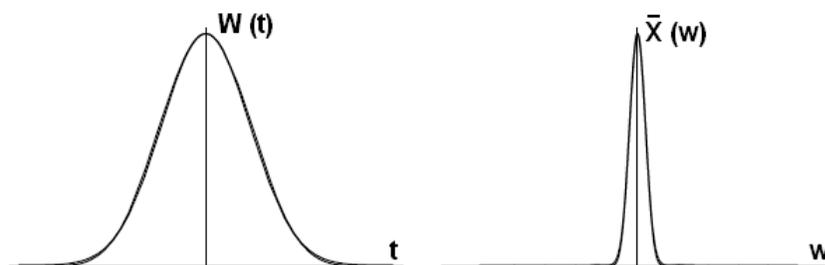


Figura 31. Izquierda: Dos ventanas de tiempo superpuestas: 1) Una ventana Gaussiana y 2) Una ventana rectangular después de tres convoluciones sucesivas. Derecha: Dos ventanas espectrales superpuestas. 1) Transformada de Fourier de La ventana Gaussiana y 2) Transformada de Fourier correspondiente a la ventana rectangular después de tres convoluciones sucesivas.

1.8 DESENVOLVIMIENTO DE FASE.

“El desenvolvimiento de fase es una técnica usada para remover las discontinuidades 2π en imágenes que tienen envuelta su fase, dicha discontinuidad se presenta en su mapa de fases. Esta técnica se basa en la detección de un salto de fase de valor 2π , agregando o substrayendo un desplazamiento del mismo valor a pixeles sucesivos que tienen dicho corrimiento de fase, basados en el mecanismo del umbral, lo que permite recuperar la forma continua del mapa de fase”¹⁹. El desenvolvimiento de fase tiene muchas y variadas aplicaciones en el procesamiento digital de imágenes, como por ejemplo: las imágenes por resonancia magnética, la interferometría de radar de apertura sintética, el sonar de apertura sintética, la óptica adaptativa, el procesamiento de datos sísmicos y por supuesto la interferometría holográfica digital que es la técnica empleada en esta investigación. En muchas de las técnicas mencionadas la fase extraída está relacionada con alguna cantidad física dependiendo de la aplicación, por ejemplo: cuantificación de una deformación o altura de una superficie en interferometría, distorsión de un frente de onda en óptica adaptativa, grado de inhomogeneidad del campo magnético en el problema de separación agua/grasa en las imágenes por resonancia magnética o en la relación entre la fase del objeto y la fase del bi-espectro en imágenes astronómicas. En técnicas como estas, donde la información requerida esta codificada en un mapa de fase se hace necesario el uso de un algoritmo para poder extraer la información. La figura 32 muestra imágenes de fase envuelta y desenvuelta de distintas aplicaciones que emplean esta técnica como herramienta de análisis.

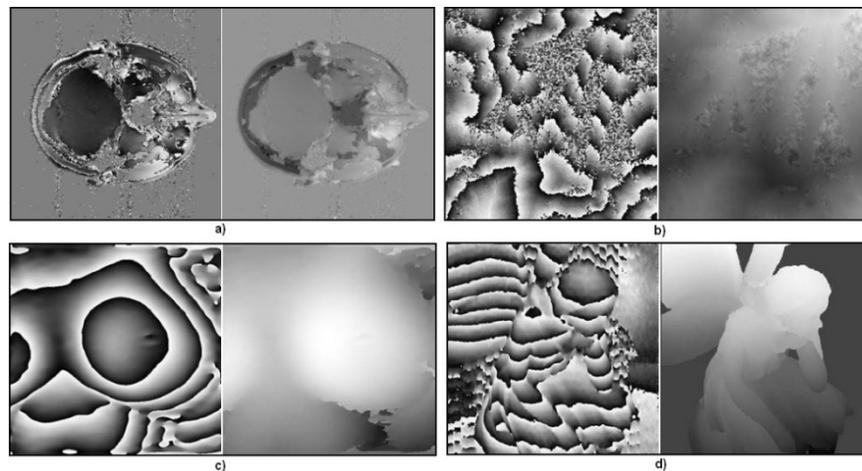


Figura 32. En las distintas figuras: Izquierda: Mapa de fases envuelto; Derecha: Mapa de fases desenvuelto; a) imagen de resonancia magnética de una cabeza humana, b) parte de la tierra en una imagen de radar de apertura sintética, c) imagen de un pecho humano en tratamiento de radioterapia y d) imagen de una estatua artística de una hada.

¹⁹ HUSSEIN, Abdul Rahman. Three Dimensional Fourier Fringe Analysis and Phase Unwrapping. 2007.

1.8.1 Desenvolvimiento de fase en una dimensión. Será más fácil de entender algunas de las dificultades encontradas en el desenvolvimiento de fase en dos dimensiones ilustrando varios aspectos importantes del desenvolvimiento de fase con señales sencillas en una dimensión. Si se revisa la representación matemática de la siguiente señal compleja, se tiene:

$$s(t) = e^{j5\pi t} ; 0 \leq t \leq 1 \quad (51)$$

Ahora, como el interés es reconstruir la fase continua $\varphi(t) = 5\pi t$ de la función $s(t)$, se puede obtener solamente la fase envuelta $\psi(t)$ mediante la operación de extracción de fase, descrita por:

$$\psi(t) = \arctan[\Im(s(t)), \Re(s(t))] \quad (52)$$

donde: \Im y \Re hacen referencia a la parte imaginaria y real respectivamente de la función compleja $s(t)$, y la función \arctan está definida en el cuarto cuadrante donde $-\pi < \psi(t) \leq \pi$. El operador arco tangente también puede ser considerado como el operador de envoltura W , donde:

$$\psi(t) = W[\varphi(t)] \quad (53)$$

En la figura 33, se puede apreciar la fase continua y la fase envuelta descritas por la ecuación (51). En esta gráfica se puede observar que cuando $\varphi(t)$ es una función lineal de t , la fase envuelta $\psi(t)$ se puede trazar como el patrón cerrado representado por la línea punteada. Así, para un valor dado de t , se puede obtener la representación en línea punteada de $\psi(t)$. Una estimación de $\varphi(t)$, denotada $\theta(t)$, se puede obtener mediante la adición de un múltiplo apropiado de 2π radianes para $\psi(t)$. Es fácil de determinar visualmente que no hay nada que agregar a $\psi(t)$ para $0 \leq t < 0.2$ para conseguir una estimación correcta de la fase desenvuelta dentro de este intervalo. Similarmente, para $0.2 \leq t < 0.6$, un múltiplo de 2π debe ser sumado, mientras que hay que agregar $2 \times 2\pi$ en el intervalo $0.6 \leq t < 1.0$. Finalmente, se puede determinar por simple inspección visual en la gráfica el desenvolvimiento correcto, detectando los saltos de 2π en la fase envuelta y sumándole un múltiplo apropiado de 2π .

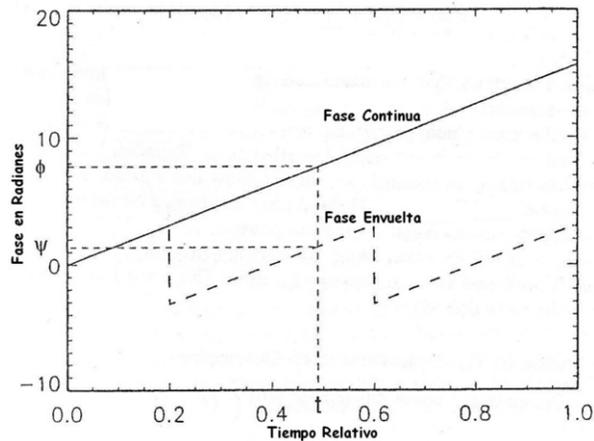


Figura 33. Representación gráfica de la fase continua y de la fase envuelta de una función lineal.

Si bien este ejemplo sencillo captura la esencia del desenvolvimiento de fase en una dimensión, la aplicación es problemática por varias razones. Para trabajar con señales reales en un computador se requiere que sean muestreadas y convertidas en señales digitales. Por lo tanto, las funciones continuas se convierten en una secuencia o una matriz de muestras. Si los datos de la muestra representan una señal continua particular, se sabe por la teoría del muestreo que constituyen una representación incompleta de las siguientes maneras: En primer lugar, la medida de los datos incluidos en la muestra de la señal continua se transforma en puntos discretos en el tiempo. En segundo lugar, la discretización solo permite abarcar un limitado grado de la duración de la señal. Una tasa de muestreo insuficiente (submuestreo) o la duración pueden oponerse a la obtención de un nivel satisfactorio de fidelidad en la reconstrucción de la señal continua. Además, la fase envuelta que se extrae de la señal muestreada ya no permite desenvolver con un buen nivel de confiabilidad.

En resumen, muchos de los problemas del desenvolvimiento surgen al pasar del dominio continuo al dominio discreto. En el dominio continuo, en ausencia de singularidades, sólo hay una manera de desenvolver la fase y la solución de desenvolvimiento es única. Sin embargo, en el dominio discreto, se deben introducir ciertas suposiciones (como por ejemplo ausencia de ruido). De esta manera, el desenvolvimiento de fase es equivalente al problema de recuperar la fase envuelta continua de la fase envuelta discreta que ha sido muestreada.

Un método específico que se puede implementar para entender el concepto de la fase desenvuelta, es obtenerla mediante la integración de su pendiente. Este concepto puede ser extendido a la solución del problema de desenvolvimiento de fase de señales n -dimensionales mediante la siguiente representación. De esta manera, si se supone que los valores de la pendiente de la fase se conocen a lo largo de ella en algún punto inicial τ_0 , la fase de algún otro punto τ se obtiene empleando la siguiente integral de contorno:

$$\varphi(r) = \oint [\Delta\varphi \cdot dr + \varphi(r_0)] \quad (54)$$

Donde la integral de línea o de contorno puede estar definida en cualquier trayectoria en el espacio n-dimensional que conecte los puntos r_0 y r ; y $\Delta\varphi$ es el gradiente de fase. Anteriormente se mencionó que la presencia de singularidades puede disminuir la capacidad para encontrar la solución de fase en señales unidimensionales. En dos o más dimensiones, las singularidades y/o el ruido pueden hacer que la fase obtenida mediante la ecuación (54), dependa del camino de integración escogido, lo que puede complicar en gran medida la solución del problema. De hecho, es seguro decir que todos los algoritmos de desarrollo de fase dependientes de la trayectoria en dos o más dimensiones, son más elaborados en cuanto a la selección de una trayectoria adecuada de integración de las pendientes de la fase.

Adicionalmente, si se acepta que el cálculo o la medida de la pendiente de la fase tienen ruido, se puede solucionar la siguiente ecuación para minimizar el error cuadrado presente en ella, entonces teniendo en cuenta el concepto de mínimos cuadrados, se tiene:

$$\epsilon^2 = \int W(\nabla\varphi - g)^2 dA \quad (55)$$

Dónde dA representa un elemento infinitesimal de área. Además se parte de la asunción de que W es una función específica y que la medida de la pendiente g tiene ruido, el cual matemáticamente se puede describir como:

$$g = \nabla\varphi + n \quad (56)$$

Donde n es un vector de ruido que está presente en la pendiente de la fase $\nabla\varphi$. La ecuación (55), es el origen de la arquitectura matemática de los algoritmos de desarrollo de fase independientes de la trayectoria basados en el teorema de la norma-mínima.

1.8.2 Desarrollo de fase en dos dimensiones. El desarrollo de fase puede ser definido como “el proceso mediante el cual se recupera el valor absoluto del ángulo de fase de una función continua que se extiende sobre un rango superior a 2π . Este valor absoluto se pierde cuando el término de la fase se envuelve en sí mismo con una distancia periódica de 2π debido a la naturaleza fundamental de las funciones de las ondas sinusoidales usadas en la medición de

propiedades físicas”²⁰. O simplemente también ha sido definido como “el proceso de resolver el problema de ambigüedad causado por el hecho de que la fase absoluta se encuentre envuelta dentro del intervalo $(-\pi, \pi)$, de donde se debe recuperar la información continua de la fase envuelta”²¹.

En el caso dónde no hay perturbaciones en los datos de la fase, la fase desenvuelta puede obtenerse fácilmente integrando las pendientes de la fase entre todos los datos enteros que la componen, lo que puede realizarse de una manera que es completamente independiente de la trayectoria de integración.

Pero hay varias fuentes de perturbaciones que causan que esta simple aproximación de desenvolvimiento falle en la mayoría de los casos. Por ejemplo: submuestreo, ruido, discontinuidades en el objeto o quiebres en las franjas, agujeros o pérdida de información de la fase, entre otros. Durante las últimas tres décadas el campo de desenvolvimiento de fase en dos dimensiones ha sido intensamente estudiado y se han publicado cientos de artículos al respecto. Muchas técnicas se han propuesto para resolver el problema de desenvolvimiento de fase. Estos algoritmos varían en la exactitud y requisitos computacionales. En la mayoría de los casos, los resultados más exactos requieren de procesos computacionales más complejos. Estas técnicas pueden ser clasificadas dentro de dos categorías mayores, que son: algoritmos de desenvolvimiento de fase local o global.

Los algoritmos de desenvolvimiento de fase local, también llamados algoritmos dependientes de la trayectoria, desenvuelven el mapa de fases integrando las pendientes de la fase sobre un determinado camino que conecta todos los pixeles en el mapa de fases envuelto. La fase desenvuelta depende del camino de integración que se escoja, por lo tanto si el algoritmo de desenvolvimiento sigue dos caminos diferentes de un pixel a otro puede producir dos respuestas diferentes para la fase desenvuelta.

Los algoritmos de desenvolvimiento de fase global formulan el proceso de desenvolvimiento en términos de la minimización de una función global para estimar la pendiente de la fase; estos algoritmos no emplean un camino de integración para el desenvolvimiento de fase, es decir, son algoritmos independientes de la trayectoria.

Teniendo en cuenta lo anterior es necesario revisar las arquitecturas de construcción de los algoritmos de desenvolvimiento de fase tanto dependientes como independientes de la trayectoria, por lo tanto, se tiene:

²⁰ ROBINSON, D. and REID, G. Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques. 1993.

²¹ GENS, R. Two-Dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry: Developments and New Challenges. 2003.

- Algoritmos de desenvolvimiento de fase local. Como se mencionó anteriormente “los algoritmos de desenvolvimiento de fase local encuentran los valores de la fase integrándola a lo largo de un determinado camino. Estos siguen un camino que cubre todo el mapa de fase y es por eso que los algoritmos de desenvolvimiento de fase local son llamados también algoritmos dependientes de la trayectoria”²².

En los métodos de desenvolvimiento de fase local, la fase desenvuelta está definida por:

$$\varphi(b) = \varphi(a) + \sum_{i=a}^{b-1} [\Delta(\varphi)](i) \quad (57)$$

Donde: $\varphi(b)$ es la fase desenvuelta en un punto arbitrario b , $\varphi(a)$ es la fase desenvuelta en un punto inicial a y Δ es el operador diferencial definido como:

$$\Delta\{\varphi(n)\} = \varphi(n+1) - \varphi(n) \quad (58)$$

La ecuación 57, muestra que los valores de fase desenvuelta para el pixel b son iguales a los valores de fase desenvuelta para el pixel a , más la sumatoria de los diferentes valores de fase desenvuelta de una determinada trayectoria entre a y b . Realmente, la ecuación (57), es una ecuación general que puede aplicarse a cualquier función continua ya que los estados de cualquier función pueden expresarse como una suma de sus diferencias. Por lo tanto, esta ecuación no puede usarse para encontrar la solución de la fase desenvuelta y necesita ser modificada.

“Los valores de fase desenvueltos y los valores de fase envueltos pueden estar relacionados entre sí por”²³:

$$\psi(n) = \varphi(n) + 2\pi \cdot k(n); \quad -\pi < \psi(n) \leq \pi \quad (59)$$

$$\varphi(n) = \psi(n) + 2\pi \cdot v(n); \quad -\infty < \varphi(n) < \infty \quad (60)$$

Donde: $\psi(n)$ son los valores de fase envueltos, $\varphi(n)$ son los valores de fase desenvueltos, $k(n)$ es la función que contiene los enteros que deben agregarse a la fase desenvuelta φ para estar envuelta entre $(-\pi, \pi)$, n es un entero y $v(n)$ es la función que contiene los enteros que deben agregarse a la fase envuelta ψ para poder ser desenvuelta. Nótese que:

²² GHIGLIA, D. and PRITT, M. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software. 1998.

²³ ITOH, K. Analysis of the Phase Unwrapping Algorithm. 1982.

$$v(n) = -k(n) \quad (61)$$

Definiendo el operador de envoltimiento como w para que sea la operación con la cual se convierta la fase desenvuelta $\varphi(n)$ a fase envuelta, matemáticamente se obtiene lo siguiente:

$$w\{\varphi(n)\} = \arctan \left[\frac{\text{sen}(\varphi(n))}{\text{cos}(\varphi(n))} \right] \quad (62)$$

o

$$w\{\varphi(n)\} = \psi(n) = \varphi(n) + 2\pi \cdot k(n) \quad (63)$$

Así, la diferencia en la fase envuelta estará dada por:

$$\Delta\{\psi(n)\} = \psi(n+1) - \psi(n) \quad (64)$$

Sustituyendo el valor de la fase envuelta en la ecuación (59), dentro de la ecuación(64), se tiene:

$$\Delta\{\psi(n)\} = \Delta\varphi(n) + 2\pi \cdot \Delta k(n) \quad (65)$$

Aplicando el operador de desenvolvimiento w en el diferencial de la fase envuelta $\Delta\{\psi(n)\}$, se tiene:

$$\begin{aligned} w\{\Delta(\psi(n))\} &= \arctan \left[\frac{\text{sen}(\psi(n))}{\text{cos}(\psi(n))} \right] = \arctan \left[\frac{\text{sen}(\Delta\varphi(n) + 2\pi\Delta k(n))}{\text{cos}(\Delta\varphi(n) + 2\pi\Delta k(n))} \right] \dots \\ &= \arctan \left[\frac{\text{sen}(\Delta\varphi(n))}{\text{cos}(\Delta\varphi(n))} \right] \end{aligned} \quad (66)$$

$$w\{\Delta(\psi(n))\} \Delta\varphi(n) \quad (67)$$

Sustituyendo la ecuación (63), en la ecuación (57), se tiene:

$$\varphi(b) = \varphi(a) + \sum_{i=a}^{b-1} w\{\Delta(\psi(i))\} \quad (68)$$

Donde: $\varphi(b)$ es la fase desenvuelta en el punto b y $\varphi(a)$ es la fase desenvuelta en un punto inicial arbitrio a , nótese que se asume que el punto inicial de la fase desenvuelta es igual al de la fase envuelta.

Finalmente, la ecuación (68), permite definir la esencia de los algoritmos de desenvolvimiento de fase local, los cuales basan su construcción en la integración de las diferencias de la fase envuelta a lo largo de una trayectoria determinada de desenvolvimiento.

- Algoritmos de desenvolvimiento de fase global. “Los algoritmos de desenvolvimiento de fase global en comparación con los algoritmos dependientes de la trayectoria, toman una aproximación completamente diferente para el desenvolvimiento de fase. Estos algoritmos formulan el problema de desenvolvimiento de fase en el sentido generalizado de la norma mínima. Por esta razón, muchos investigadores se refieren a los algoritmos de desenvolvimiento de fase global como algoritmos de la norma mínima”.

Estos algoritmos intentan encontrar la fase desenvuelta mediante la minimización del error global de la función. Lo anterior se describe matemáticamente en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon^p = \|\text{Solución} - \text{Problema}\|^p \quad (69)$$

De esta manera, cuando no se tiene el problema de submuestreo, la pendiente de la fase desenvuelta es igual a la pendiente envuelta de la fase envuelta; de acuerdo a lo anterior se tiene:

$$\Delta\varphi(x, y) = w\{\Delta\psi(x, y)\} \quad (70)$$

Los algoritmos de desenvolvimiento de fase global buscan la fase desenvuelta de las pendientes locales que estén más próximas en la dirección de x e y , tan cercanamente como sea posible de las pendientes enveltas. Lo anterior se puede definir matemáticamente como sigue:

$$\varepsilon^p = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\Delta^x \varphi(i, j) - \tilde{\Delta}^x \psi(i, j)|^p + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} |\Delta^y \varphi(i, j) - \tilde{\Delta}^y \psi(i, j)|^p \quad (71)$$

Donde: $\Delta^x \varphi(i, j)$ y $\Delta^y \varphi(i, j)$ son las pendientes de la fase desenvuelta en las direcciones x e y respectivamente, y están dadas por:

$$\Delta^x \varphi(i, j) = \varphi(i + 1, j) - \varphi(i, j) \quad (72)$$

$$\Delta^y \varphi(i, j) = \varphi(i, j + 1) - \varphi(i, j) \quad (73)$$

$\tilde{\Delta}^x \psi(i, j)$ Y $\tilde{\Delta}^y \psi(i, j)$ son los valores envueltos de las pendientes de la fase envuelta en las direcciones x e y respectivamente, y están dadas por:

$$\tilde{\Delta}^x \psi(i, j) = w\{\psi(i + 1, j) - \psi(i, j)\} \quad (74)$$

$$\tilde{\Delta}^y \psi(i, j) = w\{\psi(i, j + 1) - \psi(i, j)\} \quad (75)$$

De esta manera la ecuación (71), describe la esencia de los algoritmos de desenvolvimiento de fase global.

1.8.3 Método de Goldstein. En muchos de los algoritmos dependientes de la trayectoria, la exactitud del resultado depende del camino escogido para realizar el desenvolvimiento. El algoritmo de Goldstein es uno de los algoritmos clásicos dependientes de la trayectoria, el cual es muy efectivo generando extremadamente rápido caminos óptimos de integración. La esencia de este algoritmo es conectar los residuos cercanos con los cortes de cada ciclo para así balancearlos. Los residuos también pueden ser equilibrados conectándolos con los cortes de la rama o ciclo en los bordes de la imagen. Existen otros métodos además de Goldstein para generar los cortes en las ramas o trayectorias de integración escogidas, sin embargo, estos métodos se restringen a cortes dipolares. En cambio, el algoritmo de Goldstein genera tipos más generales de corte de la trayectoria en los que se pueden unir los residuos, en lugar de generar solo uniones de pares como los algoritmos antes mencionados.

En la figura 34, se indica un ejemplo de aplicación del algoritmo de Goldstein en donde se puede apreciar los datos de fase, los datos de los residuos y la trayectoria escogida por el algoritmo para la conexión de los residuos.

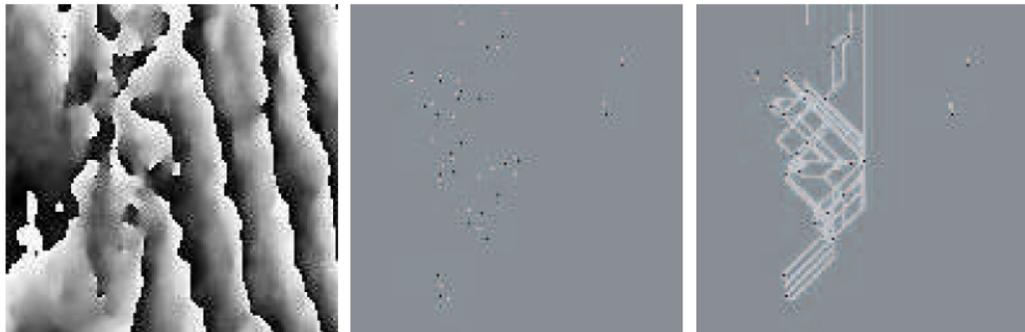


Figura 34. Mapa de fase envuelto (izquierda), residuos (centro) y trayectoria de corte de los residuos generada por el algoritmo de Goldstein.

El algoritmo de Goldstein está diseñado para minimizar las longitudes de corte en cada ciclo, conectando los residuos a sus vecinos más cercanos, sin tener en cuenta la calidad de los valores de fase. La estrategia del vecino cercano no siempre es la mejor aproximación, por eso para resolver este problema se emplea la técnica del residuo par. La disposición de los cortes de la rama está basada en la consideración de residuos enteros. Para minimizar la suma de las longitudes de los cortes, estos, deben conectar dos residuos polares opuestos. Normalmente hay algunos residuos singulares aislados después del emparejamiento, por lo que

la suma total de los residuos enteros no es cero. Dichos residuos se conectan en los bordes de la imagen. Para los residuos que se emparejan se tiene que estarían conformados por ellos mismos más el residuo polar opuesto, sin embargo, no siempre el residuo más cercano es el adecuado para ser conectado. Entre las distancias enteras más cercanas para cada residuo, los residuos que se encuentran a distancias más cortas, tienen prioridad para ser conectados con su vecino opuesto más cercano.

En la siguiente figura, se puede observar que hay cuatro residuos en la imagen. Los pixeles oscuros marcados con **1** y **2** son residuos positivos y los pixeles blancos marcados con **3** y **4** son residuos negativos. Se empleara P_1 , P_2 , N_3 y N_4 para etiquetar dichos residuos respectivamente. En la imagen se puede apreciar que N_3 es el residuo negativo más cercano tanto a P_1 como a P_2 . Obviamente, N_3 no puede conectarse a dos residuos polares opuestos, uno de ellos debe ser eliminado. Por lo tanto, se usa la distancia más corta a N_3 para guiar la selección. Seleccionando así, el pixel que presenta la distancia más corta para el corte de la rama. Entonces, P_1 quedara conectado con N_3 .

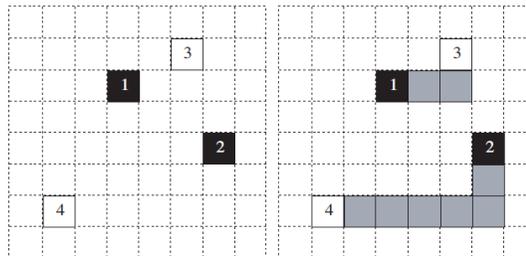


Figura 35. Ubicación de los cortes en la rama; Izquierda: Cuatro residuos; Derecha: Cortes de la rama basados en la técnica del emparejamiento de residuos.

De la descripción anterior, se puede concluir dos conceptos básicos cuando la rama corta entre dos residuos.

1. Las polaridades de los residuos que están conectados en los cortes de la rama deben ser diferentes.
2. Los dos residuos que están conectados, deben ser los de polaridades opuestas más cercanos y que representen la menor distancia para el corte de la rama.

De esta manera, la clave del método de emparejamiento de residuos es asegurarse de que la distancia de cada par de ellos sea la más cercana entre los residuos que no están equilibrados. Un parámetro adicional conocido como *dis*, es el que aumenta el paso a paso de este método, siendo necesario para garantizar que la distancia entre cada par de residuos conectados sea la más cercana.

Como la polaridad y las coordenadas de los residuos son información indispensable para el desarrollo de este método, se necesita entonces dos matrices para los valores coordinados de los residuos positivos y negativos respectivamente. Si existen residuos singulares aislados después del emparejamiento se deben vincular a los bordes de la imagen. Finalmente, después de que todos los residuos se han equilibrado se pueden desenvolver los valores de la fase.

En la siguiente figura, se puede apreciar un diagrama esquemático que representa el proceso del método de emparejamiento de residuos.

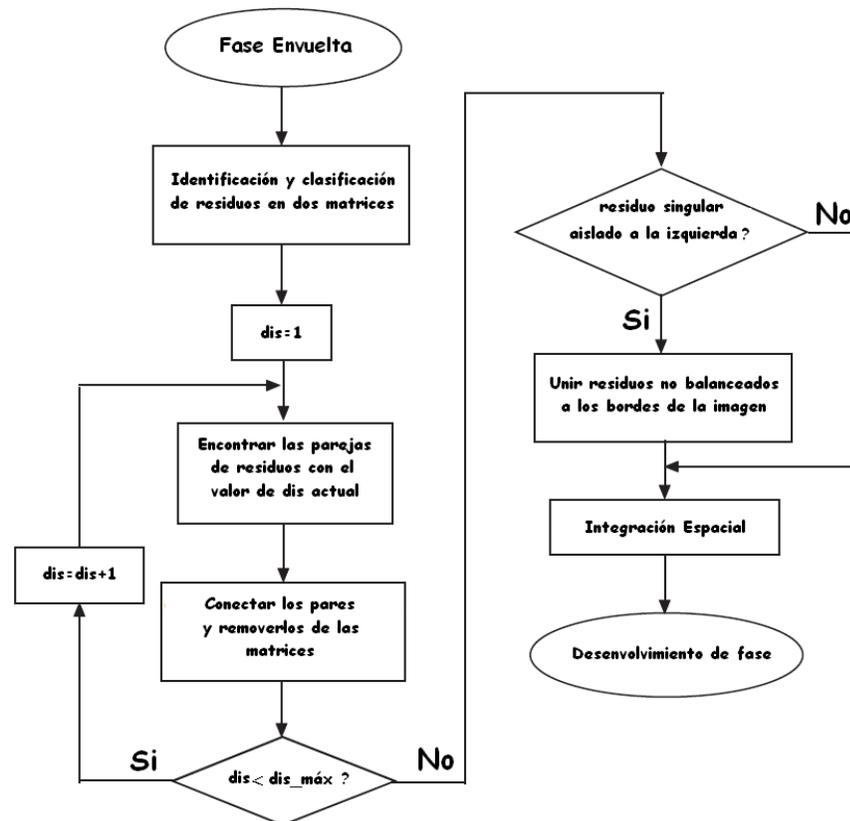


Figura 36. Diagrama esquemático del método de emparejamiento de residuos.

Ahora, después de haber realizado el proceso de identificación de residuos, se obtendrá dos matrices de las coordenadas de los residuos con polaridades opuestas. Así, para encontrar las parejas de residuos más cercanas, se emplea el parámetro adicional *dis* el cual sirve para definir la distancia actual más cercana.

Teniendo en cuenta lo anterior se debe definir cómo el parámetro *dis* describe la distancia entre dos residuos (los dos residuos deben tener polaridades opuestas). La distancia entre dos puntos generalmente representa una línea recta. Si se tiene dos residuos, (i_1, j_1) e (i_2, j_2) , como se indica en la figura 52, la distancia estará dada por:

$$dis_{1,2} = \sqrt{(i_1 - i_2)^2 + (j_1 - j_2)^2} \quad (76)$$

Sin embargo, no es conveniente describir la distancia con fracciones decimales para efectos de cálculos, por eso se recurrirá a la siguiente función para definir la distancia:

$$dis'_{1,2} = \max(|i_1 - i_2|, |j_1 - j_2|) \quad (77)$$

Por ejemplo, en el cuadro de distribución de residuos de la parte izquierda de la figura 52 la $dis'_{1,2}$ es 2 píxeles. Ahora, si se observa el cuadro de la derecha de la figura 52 se puede encontrar que los cuadros más pequeños están mutuamente centrados con un residuo y cubriendo otro residuo, entonces: $(2 \times dis'_{1,2} + 1) \times (2 \times dis'_{1,2} + 1)$ píxeles, por lo tanto 5×5 píxeles.

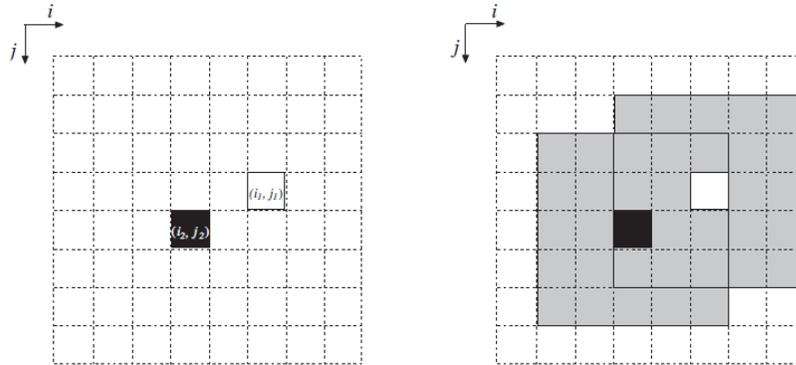


Figura 37. Izquierda: parejas de residuos; Derecha: Los cuadros más pequeños centrados con un residuo y cubriendo otro respectivamente.

A dis se le dará un primer valor de 1, lo que significa que la distancia actual más cercana será 1 píxel. Entonces, es necesario revisar las parejas de residuos con el valor de dis actual de dos matrices conectadas. Después de que estos residuos están conectados se deben quitar respectivamente de las matrices. Así, el valor de dis actual no es conveniente para el resto de los residuos en las matrices, necesitando agregar 1 píxel cada vez para obtener el nuevo valor de dis .

Sin embargo, el dis requiere un umbral máximo para que el punto pueda restringir los cortes de la rama dentro de una longitud apropiada. Una longitud no apropiada puede convertirse en una región determinada que no pueda desenvolverse. Para una imagen de $M \times N$ píxeles se debe encontrar el límite de $\frac{\min(M, N)}{4}$, para evitar la aparición de regiones que presenten inconvenientes en el momento de desenvolvimiento de la imagen.

1.8.4 Método guiado. El método guiado es un algoritmo dependiente de la trayectoria cuya esencia radica en la compensación de singularidades, en donde el grado de compensación está determinado por el mapa de calidad. El mapa de calidad consiste en una serie de valores que definen la calidad o bondad de cada valor de la fase. El mapa puede definirse a partir de la información de la fase como una seudocorrelación, como la variación de la derivada de la fase, o como las pendientes máximas de la fase. La operación del algoritmo es la siguiente: se selecciona un pixel inicial de alta calidad y se examinan sus cuatro vecinos. Dichos vecinos se desenvuelven y se guardan en una lista. Entonces, el algoritmo procede iterativamente como sigue: El pixel de alta calidad de la lista se remueve de ella, y sus cuatro vecinos son desenvueltos y puestos en esta lista. (Los pixeles son ordenados y guardados en la lista en el orden de la calidad de sus valores). Si un vecino ya se ha desenvuelto, no se pone en la lista. Este proceso reiterativo de quitar el pixel de alta calidad de la lista desenvolviendo a sus cuatro vecinos e insertándolos en la misma, continúa hasta que todos los pixeles se hayan desenvuelto.

Es natural ver este algoritmo como una aproximación de la región creciente. En las áreas de pixeles de calidad superior, la región de pixeles desenvueltos crece hasta que queden sólo pixeles de buena calidad. El algoritmo sigue entonces el camino de pixeles de alta calidad a través de las regiones de baja calidad, hasta que la siguiente región de alta calidad es encontrada. De esta manera, todos los pixeles de calidad superior se desenvuelven primero, y los pixeles de baja calidad se desenvuelven después.

Algunos algoritmos crecen independientemente de la calidad de las regiones, (sea alta o baja calidad) conectando los residuos en un paso posterior de posprocesamiento de la información. Lo anterior radica en que la aproximación creciente de la región múltiple, realizada correctamente permite encontrar los lugares óptimos para la unión de las regiones. Sin embargo, este acercamiento trae consigo mucho procesamiento que puede llegar hacer innecesario, adicionalmente se requiere también de una técnica para unir ambas regiones (baja y alta calidad). En cambio, el método guiado, descrito en este aparte de la investigación, es mucho más simple y permite obtener muy buenos resultados en cuanto a la aproximación de la fase se refiere.

El método guiado realiza un proceso similar de compensación de singularidades al realizado por el algoritmo de Goldstein, descrito en el apartado anterior. Este método requiere de una matriz para la fase, de los pixeles de alta calidad seleccionados y de la información de la posible solución para la fase. También requiere una matriz para almacenar el mapa de calidad. Las principales diferencias entre el método de Goldstein y el Guiado son las maneras en como administran la información de la lista. El procedimiento de compensación de singularidades quita los pixeles de la lista en cualquier orden, pero el algoritmo del método guiado debe mantener la lista en el orden correcto basado en los valores

de calidad de los pixeles. Lo anterior aumenta significativamente el tiempo de ejecución y hace necesario mencionar la segunda gran diferencia entre estos dos algoritmos. El algoritmo de calidad guiado debe emplear el procedimiento de reducción de la lista puesto que debe guardar la lista más pequeña posible. Sin este procedimiento, el tiempo de ejecución sería mayor en casi un orden de magnitud.

El procedimiento de reducción de la lista opera de la siguiente manera: Cuando el tamaño de la lista excede un límite preestablecido, la mitad de los pixeles con valores bajos de calidad están alejados de ella y marcados con una bandera especial. Estos pixeles son referidos como "pospuestos" porque ellos después serán devueltos a la lista; además sus valores desenvueltos no cambian.

El umbral mínimo de calidad estará dado por los pixeles de más baja calidad que permanezcan en la lista y ningún pixel cuyo valor de calidad este por debajo de este umbral se insertará en ella, de tal manera que cuando uno de estos pixeles es encontrado se desenvuelve y se marca como "pospuesto".

El algoritmo itera hasta que la lista este vacía. A estas alturas todos los pixeles restantes que unen los pixeles desenvueltos tienen valores de calidad que son demasiado bajos. Entonces el umbral de calidad mínimo debe reducirse hasta el punto en el cual se introducen los pixeles "pospuestos" cuya calidad excede este nuevo umbral en la lista, repitiéndose continuamente dicho proceso. Este procedimiento de reducción de la lista es la causa para que el algoritmo siga exactamente la misma trayectoria de desenvolvimiento en todas sus iteraciones. La única diferencia es que algunos pixeles están alejados de la lista y se insertaron después para controlar el tamaño de la misma. El umbral de calidad asegura que la trayectoria de desenvolvimiento sea siempre la misma.

Finalmente, solo resta preguntar ¿Cuál es el límite en el tamaño de la lista si se desea aumentar al máximo la velocidad del algoritmo? La respuesta depende de la naturaleza del mapa de calidad, pero si se asume una matriz de $M \times N$ pixeles es posible encontrar que el límite en el tamaño de la lista está dado por $M + N$ pixeles.

1.9 ANÁLISIS DE DEFORMACIONES Y PROCEDIMIENTOS.

Un interferograma holográfico convencional se genera por la superposición de dos ondas, las cuales provienen de estados diferentes de un objeto. Un interferograma porta la información de los cambios de fase de la onda en forma de franjas oscuras o claras. Sin embargo, la fase de un perfil interferométrico no puede obtenerse inequívocamente de un solo interferograma. La fase de un perfil de interferencia es usualmente calculada a partir de tres o más registros

interferométricos de los cambios de fase mediante algoritmos implementados para tal fin. Esto requiere el esfuerzo experimental adicional.

La holografía digital permite una manera completamente diferente de procesar y extraer información de frentes de onda que hayan experimentado el fenómeno de interferencia. De esta manera, un holograma digital es grabado para cada estado del objeto y en lugar de sobreponer estos hologramas como en la interferometría holográfica convencional, usando placas fotográficas, los hologramas digitales se reconstruyen separadamente según la teoría de reconstrucción del campo óptico tratada en apartados anteriores. Así, de las amplitudes complejas resultantes $A_1(\xi, n)$ y $A_2(\xi, n)$ se pueden calcular los valores de fase de la siguiente manera:

$$\varphi_1(\xi, n) = \arctan \frac{\text{Im } A_1(\xi, n)}{\text{Re } A_1(\xi, n)} \quad (78)$$

$$\varphi_2(\xi, n) = \arctan \frac{\text{Im } A_2(\xi, n)}{\text{Re } A_2(\xi, n)} \quad (79)$$

Las ecuaciones (78) y (79) denotan respectivamente el estado inicial y final del objeto. En ambas ecuaciones la fase toma valores entre $-\pi$ y π , los principales valores de la función \arctan . La fase de la interferencia se puede calcular ahora directamente por sustracción, como sigue:

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 & \text{Si } \varphi_1 \geq \varphi_2 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi & \text{Si } \varphi_1 < \varphi_2 \end{cases} \quad (80)$$

Esta ecuación permite el cálculo de la fase de la interferencia directamente de los hologramas digitales. La generación y la evaluación de un interferograma no son necesarias.

Como se mencionó anteriormente el camino para obtener la fase de la interferencia en interferometría holográfica digital es totalmente diferente al de la interferometría holográfica usando placas fotográficas, principalmente en cuanto a la reconstrucción del campo óptico se refiere.

Por otro lado, la derivación de la relación entre el vector de desplazamiento \vec{d} , las condiciones de límite geométricas descritas por el vector \vec{S} y la fase de la interferencia $\Delta\varphi$ son válidas para la interferometría holográfica digital. Esto significa que la deformación se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d}(x, y, z) \cdot (\vec{b} - \vec{S}) = \vec{d}(x, y, z) \cdot \vec{S} \quad (81)$$

Como un ejemplo de la medida cuantitativa de una deformación se pueden mencionar las pruebas de impacto realizadas en un plato de fibra de plástico reforzada que se emplea cada vez más en la industria aeronáutica, el comportamiento de la deformación de la fibra de plástico reforzada bajo la carga de impacto difiere de la carga estática, así que los experimentos de impacto son necesarios. Por lo tanto la técnica empleada en esta investigación, satisface las necesidades experimentales para el cálculo de deformación en este tipo de materiales puesto que es necesario solo un registro por cada estado de deformación.

Las medidas de desplazamiento mediante holografía digital pueden ser usadas para determinar propiedades mecánicas y térmicas de materiales, como por ejemplo, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el coeficiente de expansión térmica. Para la obtención de estas cantidades es necesaria la evaluación tridimensional de la forma y los desplazamientos en las tres dimensiones del objeto bajo estudio, un modelo físico del comportamiento del objeto cargado y el conocimiento de la carga aplicada para el análisis. El modelo físico debe contener una o más de las constantes del material como parámetros. Un procesamiento numérico de los datos medidos de acuerdo al modelo físico empleado entregarán los parámetros requeridos con una exactitud determinada por la fiabilidad numérica del modelo. Un resumen completo de la evaluación del anterior proceso se muestra en la siguiente figura:

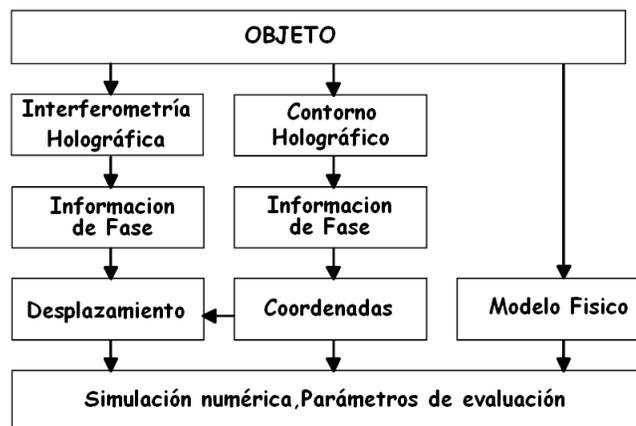


Figura 38. Esquema de evaluación para la determinación de propiedades en materiales mediante interferometría holográfica digital.

1.9.1 Módulo de Young. El módulo de Young puede ser determinado mediante la implementación de un modelo físico que contenga esta cantidad como parámetro. De esta manera, si se tiene una pequeña barra de silicio fijada en uno de sus extremos a un soporte, y cargada mecánicamente en el extremo opuesto con una fuerza conocida, el desplazamiento en 3D de la superficie (u, v, w) (Figura 41) puede ser medido con un interferómetro mediante la evaluación de por lo menos tres interferogramas (Figura 40) registrados con direcciones diferentes de

iluminación. Un modelo de flexión de la barra que contenga el módulo de Young E como un parámetro libre es la base para un procesamiento numérico de los valores experimentales, por lo tanto se tiene:

$$u(y) = \frac{Fl^3}{6EI_y} \left[2 - 3\frac{y}{l} + \frac{y^3}{l^3} \right] \quad (82)$$

Donde u es el desplazamiento en la dirección x e y una posición sobre la barra de longitud l . I_y es el momento axial de inercia en el plano (x, z) que puede ser estimado con la ayuda de una forma de medición. F es la fuerza aplicada sobre el extremo de la barra. Puesto que las fuerzas aplicadas son relativamente pequeñas se debe contar con un mecanismo de carga especial como el que se indica en la figura 39. El resorte de constante k se supone que se conoce con precisión, así como el desplazamiento $\Delta a = a - a'$. Con esta información la fuerza puede ser evaluada con la siguiente ecuación:

$$F = k\Delta a \quad (83)$$

Varios experimentos con barras delgadas de silicio (dimensiones: 3 mm de longitud, 1 mm de ancho) emitió un valor medio de $E = 162 \text{ Mpa}$. El valor de la literatura (en él considera la dirección de cristal) es de aproximadamente $E = 162 \text{ Mpa}$. Estos valores pueden variar en un gran rango de acuerdo a la historia del material, el tratamiento y el grado de impureza.

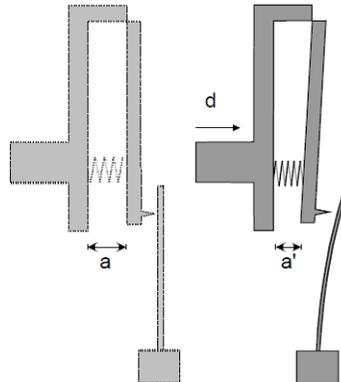


Figura 39. Principio de funcionamiento del mecanismo de carga para muestras pequeñas.

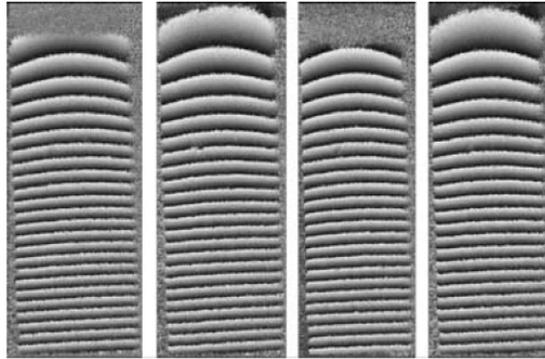


Figura 40. Cuatro mapas de fase 2π registrados desde cuatro direcciones diferentes de iluminación.

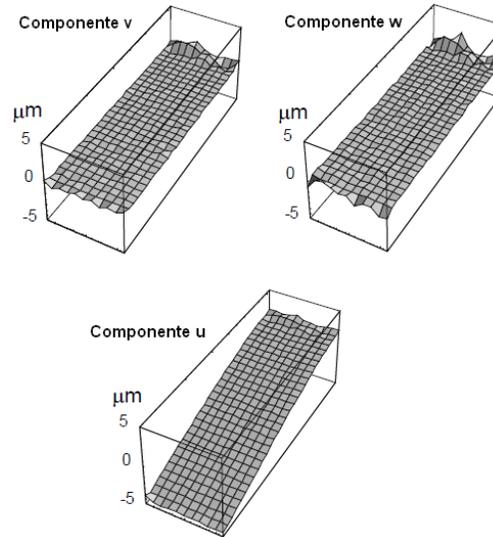


Figura 41. Deformación calculada en coordenadas cartesianas (escala de la gráfica en μm).

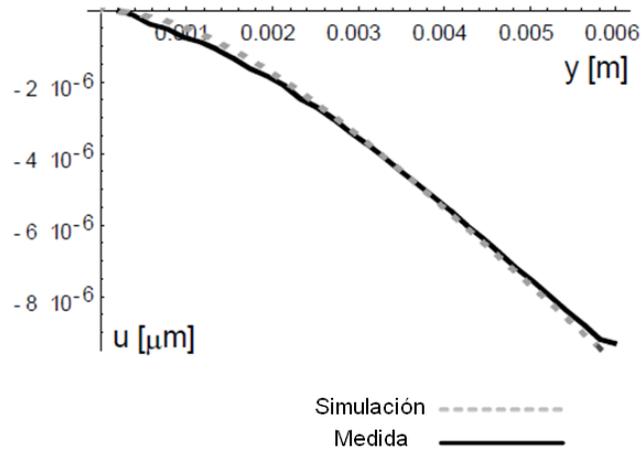


Figura 42. Perfil de deformación en la dirección x .

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Habiendo realizado un detallado estudio y una adecuada apropiación de los conocimientos básicos y suficientes, se persigue como plan de trabajo abordar el alcance de los objetivos específicos, resaltando las necesidades y su respectiva solución, encaminando el proceso y así se permita observar un adecuado desarrollo dando lugar al logro del trabajo como alcance del objetivo general.

Cabe señalar que el trabajo desarrollado plasma de manera global los conocimientos en relación a holografía e interferometría holográfica en una implementación en software, cuya dirección de trabajo se remonta al análisis del grado de deformación física que sufren ciertos objetos al realizarles algún tipo de tratamiento, de igual manera, se presenta la adquisición de algunos elementos que pueden dar lugar a un montaje propiamente implementado en la Universidad de Nariño.

Este proceso abarca la necesidad de retomar los objetivos específicos como planes de trabajo, detallando las necesidades concretas y su respectiva estructuración, de este modo se presentan a continuación:

2.1 RECOLECTAR Y DEFINIR TÉCNICAS DE ANÁLISIS POR INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA.

La Interferometría Holográfica se puede expresar como el mecanismo físico-matemático que permite aprovechar las características y bondades de la holografía, haciendo relación a que un holograma registra un frente de onda conservando la información de carácter complejo de dicho frente asociada a la fase del campo óptico de interferencia, sumada a la interferometría que utiliza la correlación entre frentes de onda para realizar mediciones de elevada resolución.

En el numeral 4.5 de este trabajo, denominado *Interferometría Holográfica* se presenta una introducción a algunas de las más destacadas técnicas que hacen uso de diseños equivalentes con un mismo fin, la determinación de modificaciones mediante medición no invasiva de una muestra dada empleando técnicas ópticas.

Se analizaron diferentes métodos y técnicas que hacen uso de la interferencia de patrones de luz coherente, interferometría, holografía e interferometría holográfica, así como una disposición apta para el registro de muestras y ensayos, que permitan una manipulación sencilla y efectiva.

Se toma en consideración que las características propias de la holografía admiten dos tipos básicos de adquisición de registros holográficos, clasificados según la observación del medio de registro en el cual se produce la interferencia, denominados *Hologramas De Transmisión* y *Hologramas De Reflexión* que esquemáticamente se observan en la Figura 43.

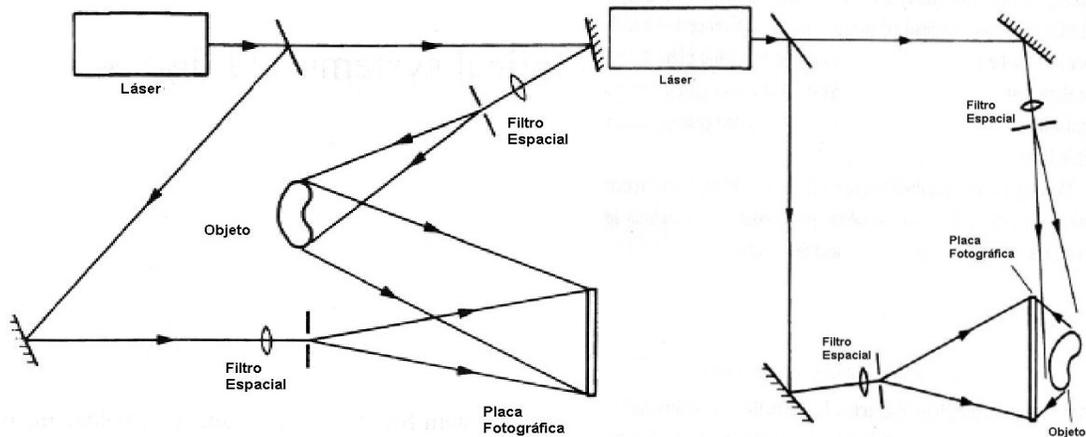


Figura 43. Holograma por transmisión (izquierda) y por reflexión (derecha).²⁴

Tratando fundamentalmente que en la interferometría holográfica convencional interfieren dos campos ondulatorios (frentes de onda) coherentes los cuales son reflejados en dos estados diferentes a la superficie de un objeto cuyo registro da como resultado un interferograma, que además de registrar la intensidad almacena la fase correspondiente, es evidente que una apropiada manipulación de los esquemas que aparecen en la figura 43, darán como resultado los patrones de franjas resultantes de la interferencia entre las fuentes de onda provenientes de la superficie del objeto en diferentes instantes.

Al recurrir a la holografía de tipo digital, en donde los hologramas son registrados digitalmente sustituyendo el método de la placa holográfica mediante una cámara digital de alta resolución y sensor tipo CCD (Charge Coupled Device) o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), la adquisición mediante el registro de hologramas por transmisión resulta inapropiado y complejo, razón por la cual se selecciona el método de registro por reflexión, incorporando la idea básica en que se recurre a la utilización de un método numérico para reconstruir o propagar el frente de onda almacenado, resultando simultáneamente de este una imagen de amplitud y una de fase para cada holograma, permitiéndose un análisis numérico de los frentes de onda registrados sin la necesidad de su reconstrucción física.

²⁴ VINCITORIO, Fabio. Aplicación Del Láser De Potencia Y La Interferometría Holográfica Al Corte Y Estudio De Partes E De Núcleos De Balastos Para Equipos Auxiliares De Iluminación. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná

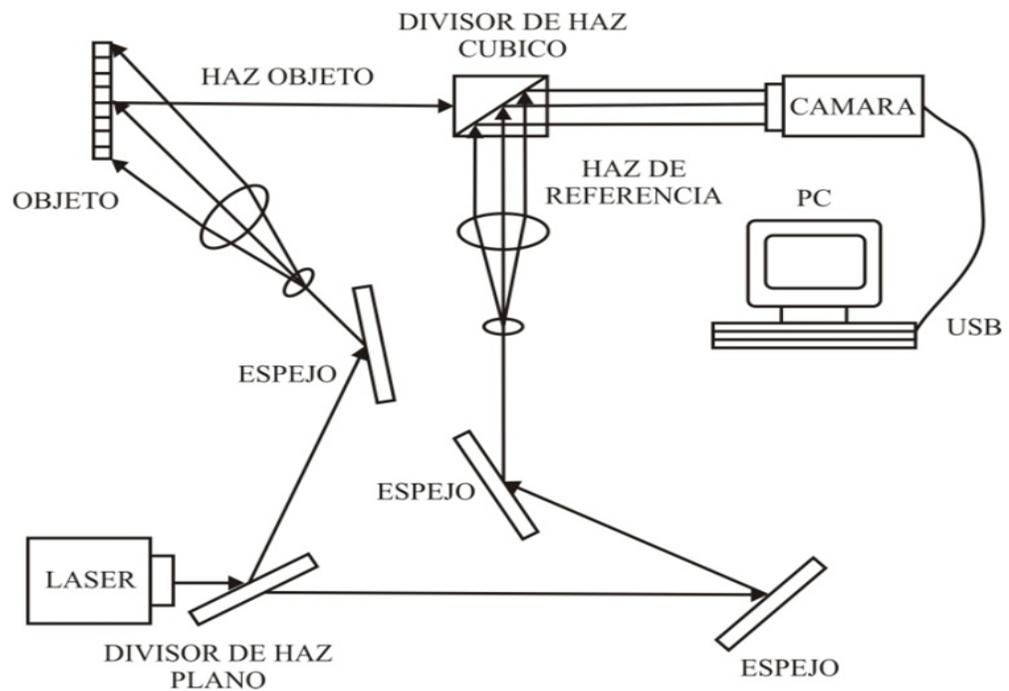


Figura. 44. Esquema óptico para holografía de tipo digital

En la figura 44, la luz láser esparcida sobre el objeto, interfiere o se combina con la onda del plano referencia en el sensor de la cámara que puede ser CCD o CMOS mediante un *divisor de haz cúbico*, capturando una imagen de las características del objeto interfiriendo con el haz de referencia en el que se superpone en forma de modulación de ondas las características de fase y amplitud del objeto bajo estudio, formando un holograma.

En el esquema anterior se desarrolla y establece la técnica de *Holografía De Doble Exposición* como participe en este trabajo para realizar ensayos por interferometría holográfica, en el que dos hologramas con longitud de onda λ_1 y λ_2 son grabados por la cámara en diferentes instantes y bajo diferentes condiciones del objeto modificado en la misma posición en la que se encuentra, que mas tarde son reconstruidos numéricamente mediante un computador, a los cuales respectivamente se les extrae la información de la fase ϕ_1 y ϕ_2 cuya diferencia $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$, que se manifiesta como una serie de franjas claras y oscuras que se superponen a la imagen del objeto, está relacionada con la distribución de altura de la superficie alterada de objeto.²⁵

Un diagrama de flujo del proceso que conlleva la interferometría holografica digital se muestra en la figura 45, sintetizando lo mencionado anteriormente

²⁵Digital Holography.,[En línea]. Disponible en: <http://www.ljmu.ac.uk/GERI/79690.htm>

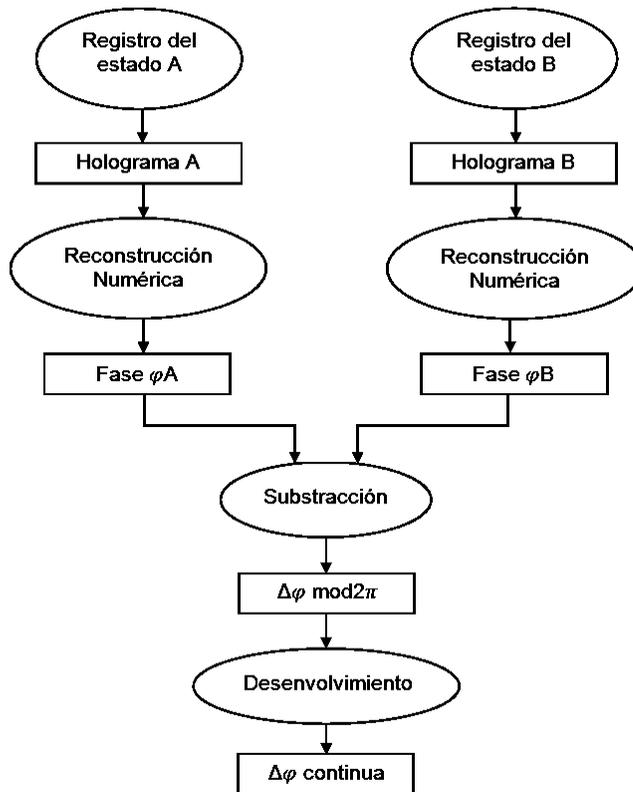


Figura 45. Diagrama de flujo del proceso de interferometría holográfica digital.²⁶

2.2 IMPLEMENTAR UN SISTEMA EXPERIMENTAL EL CUAL PERMITA INCLUIR UN MÓDULO DE ANÁLISIS POR INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL.

2.2.1 Pruebas preliminares. Habiendo discutido la técnica de interferometría holográfica a implementar cuyo montaje físico se establece como de *Holografía De Doble Exposición*, se procedió a buscar medios y mecanismos para poder realizar un montaje físico y pruebas preliminares a nivel de la *Universidad de Nariño* no consiguiendo los equipos que se deseaban en cuanto a que el área de investigación de la Universidad de Nariño ha dedicado pocos espacios para desarrollos de tipo óptico-holográfico no contando con los elementos necesarios para desarrollo de Holografía ya sea de tipo Análogo o Digital, por lo cual los dispositivos encontrados en el laboratorio de Física Moderna tan solo sirvieron para dar lugar a comprobaciones experimentales básicas del fenómeno de interferencia de frentes de onda en algunas técnicas como son *Michelson*, *Anillos de Newton* y *Young*, en los cuales se obtuvo resultados satisfactorios en cuanto al proceso de comprobación de estas experiencias.

Los elementos usados principalmente en esta etapa se muestran a continuación:

²⁶ SCHNARS, Ulf. Digital Holography. Springer. 2005.



Figura 46. Interferómetro de Michelson.



Figura 47. Láser de helio-neón Uniphase de 0.1 mW y longitud de onda 632.8 nm (rojo).

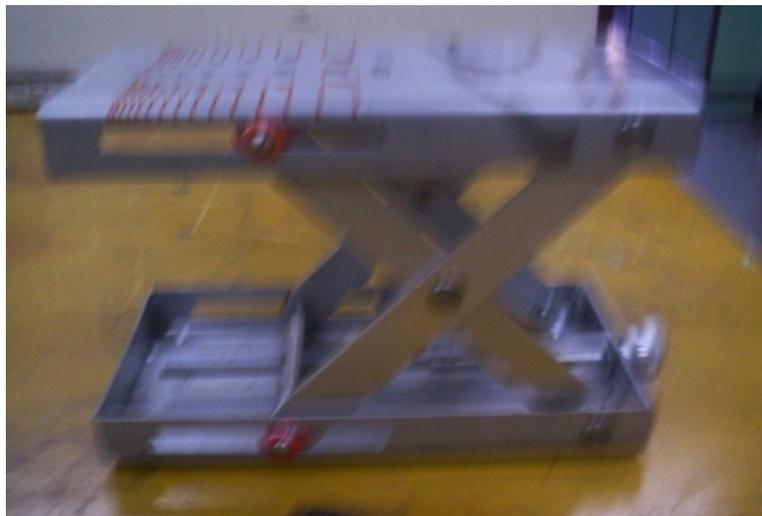


Figura 48. Jinetillo o elevador.

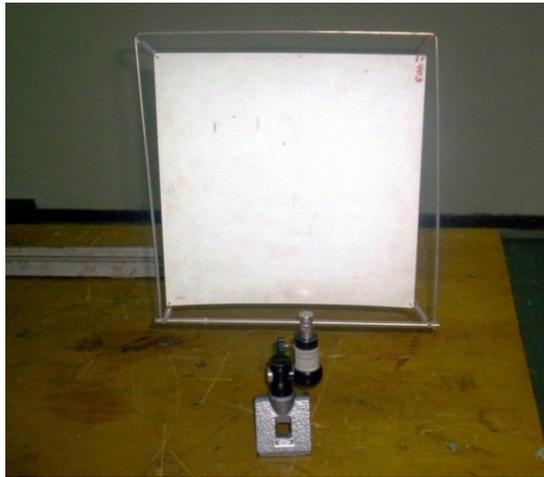


Figura 49. Pantalla.



Figura 50. Filtro espacial o expansor de haz.

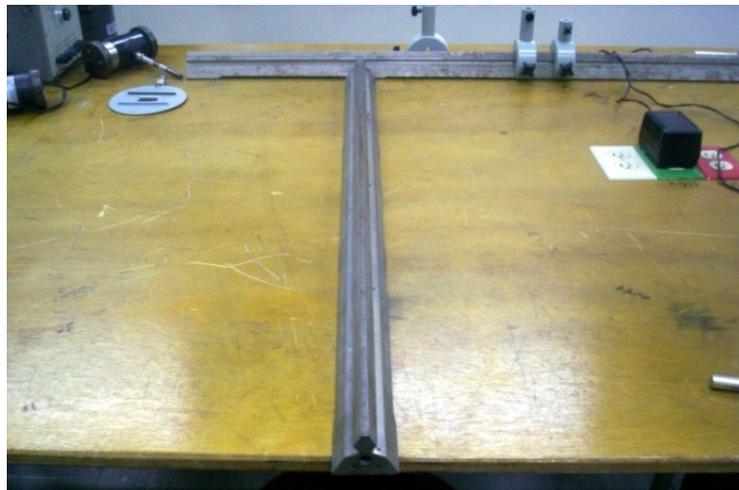


Figura 51. Banco óptico y soportes.

Mediante la utilización de los elementos mostrados en la figuras 46 a 51, se llevaron a cabo algunas pruebas preliminares, cuyas evidencias fotográficas se muestran a continuación, logradas con el láser en funcionamiento y observando sobre la pantalla la emisión del mismo estructurando interferencias, haciendo uso de un ambiente con una intensidad de luz muy baja.

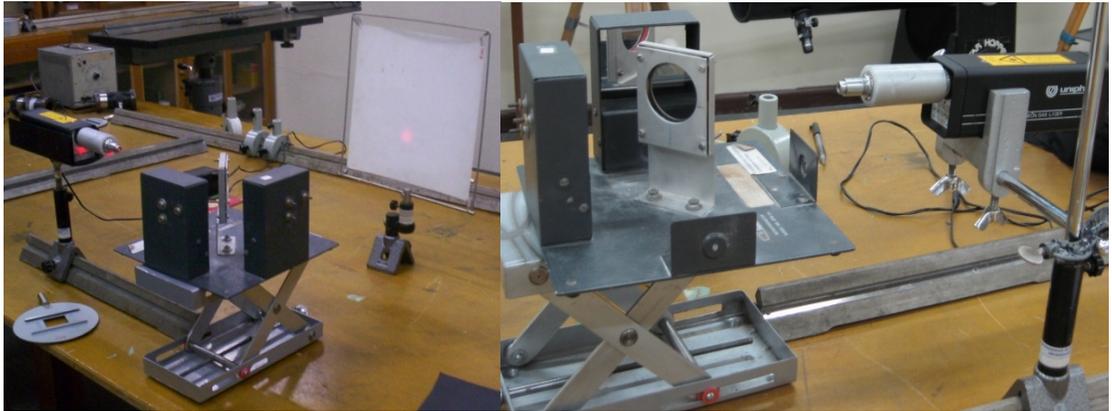


Figura 52. Montaje experimental efectuado.

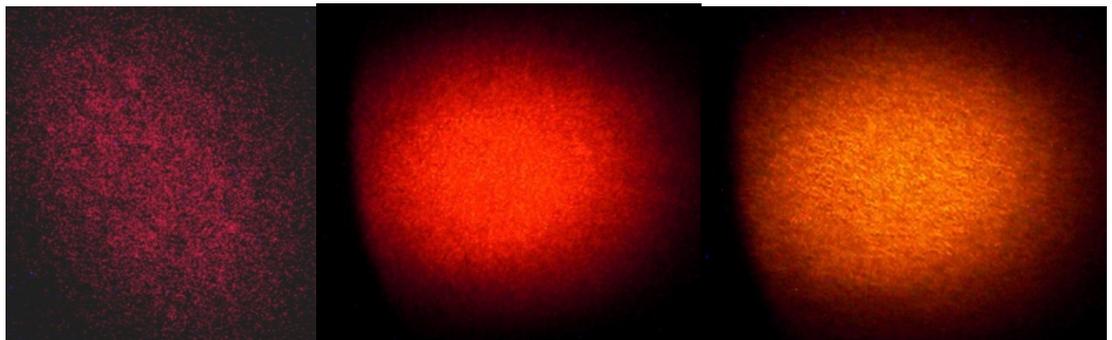


Figura 53. Observación del patrón de Speckle en diferentes instantes.



Figura 54. Franjas de interferencia producto del interferómetro de Michelson.

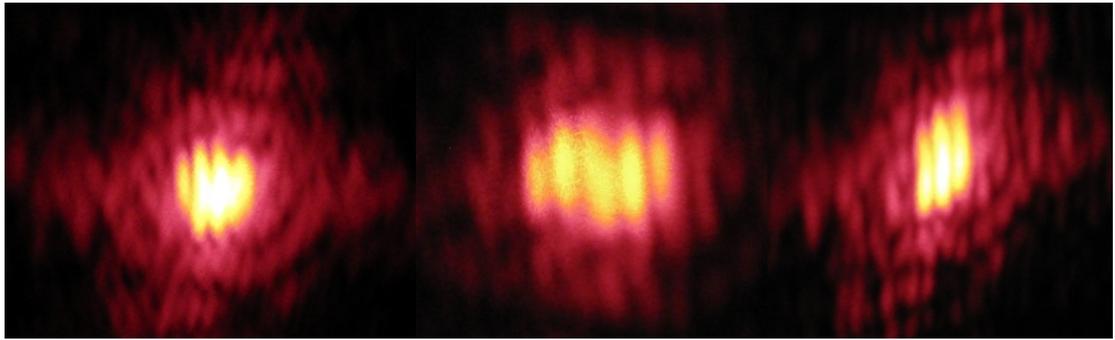


Figura 55. Franjas de interferencia mediante el interferómetro de Young.

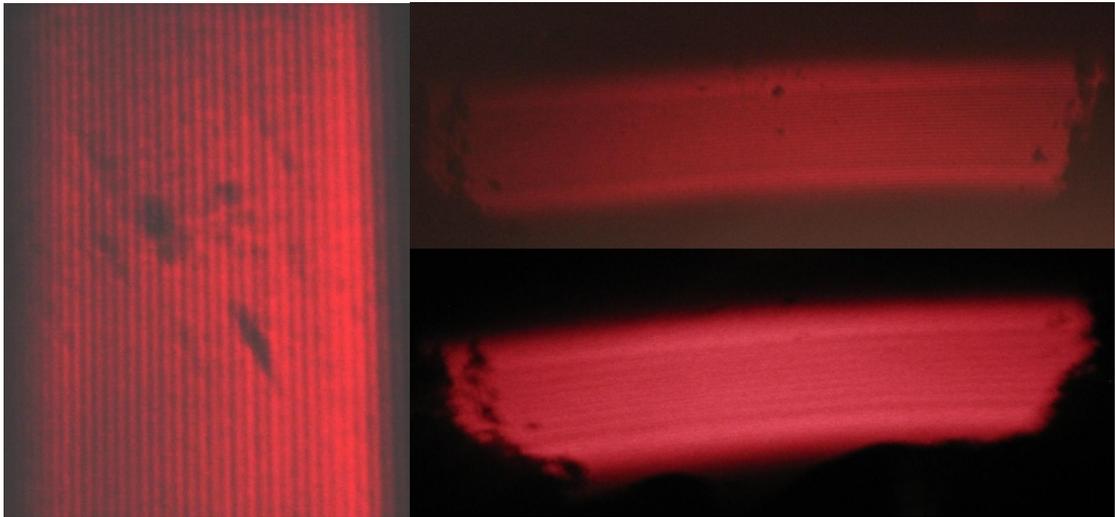


Figura 56. Franjas de interferencia o anillos de Newton.

2.2.2 Implementación del montaje experimental. Gracias a la bibliografía adquirida durante todo el proceso de trabajo, se logró realizar un contacto importante con uno de los impulsores de las técnicas que conllevan aplicaciones de tipo óptico en Colombia, principalmente en holografía, con quien se concertó una denominada *pasantía investigativa* en relación a una visita programada a los laboratorios de Holografía Digital de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en la cual fue posible recibir una orientación adecuada sobre algunas características especiales que poseen los montajes ópticos, por parte del Ph.D. *Freddy Alberto Monroy Ramírez*, quien se desempeña actualmente como profesor asistente y director del Grupo de Óptica Aplicada (GOA) del Departamento de Física - Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y quien amablemente permitió el manejo de equipos con los que cuenta, relacionados a continuación:

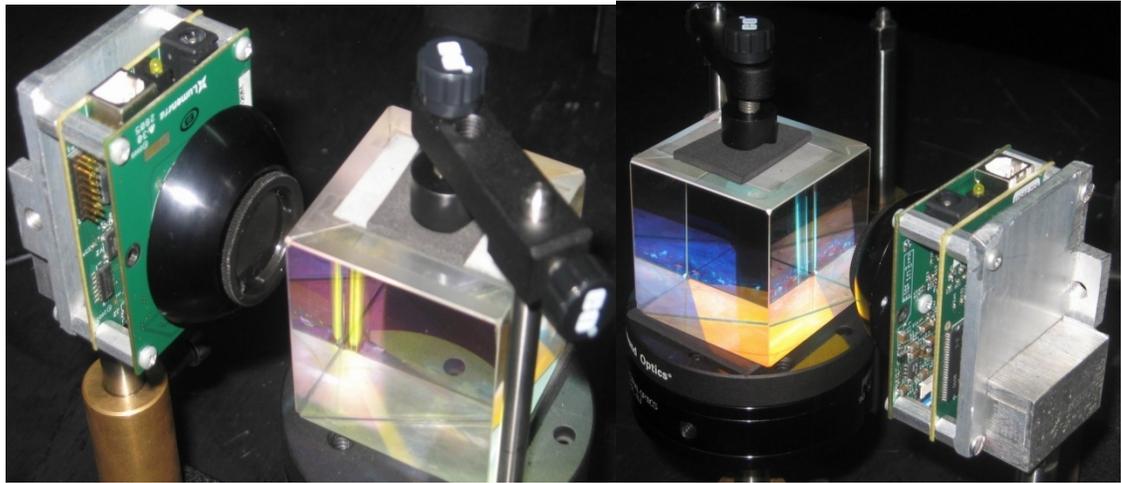


Figura 57. Cámara Lumenera de alta resolución sensor tipo CMOS y divisor de haz cúbico.

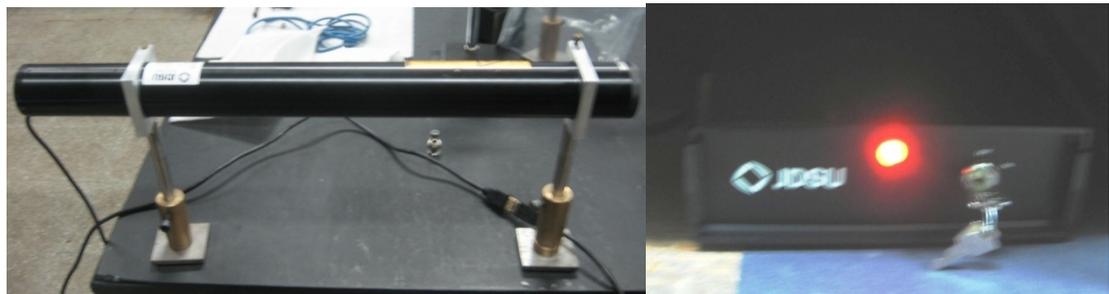


Figura 58. Láser JDSU de 10 mW de potencia y longitud de onda de 632.8 nm (rojo) y su respectiva fuente de poder.

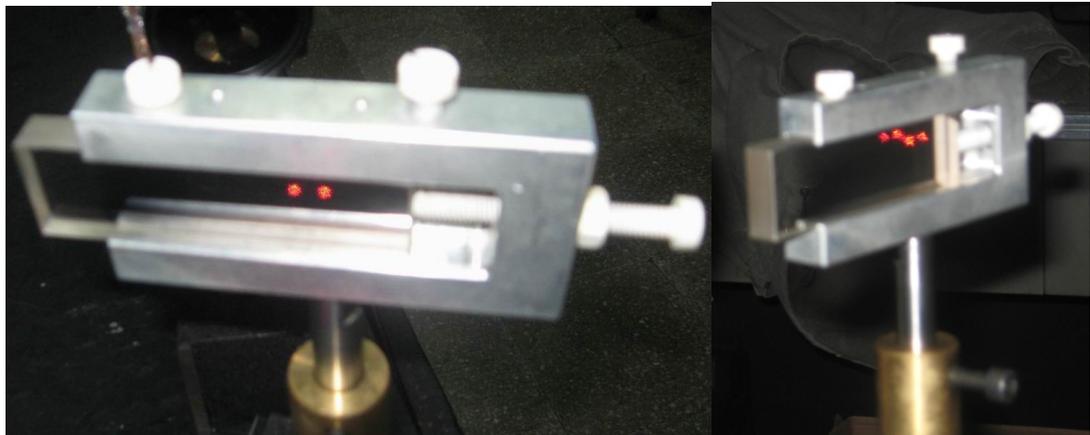


Figura 59. Divisor de haz plano variable.



Figura 60. Shutter (obturador) y filtro espacial.

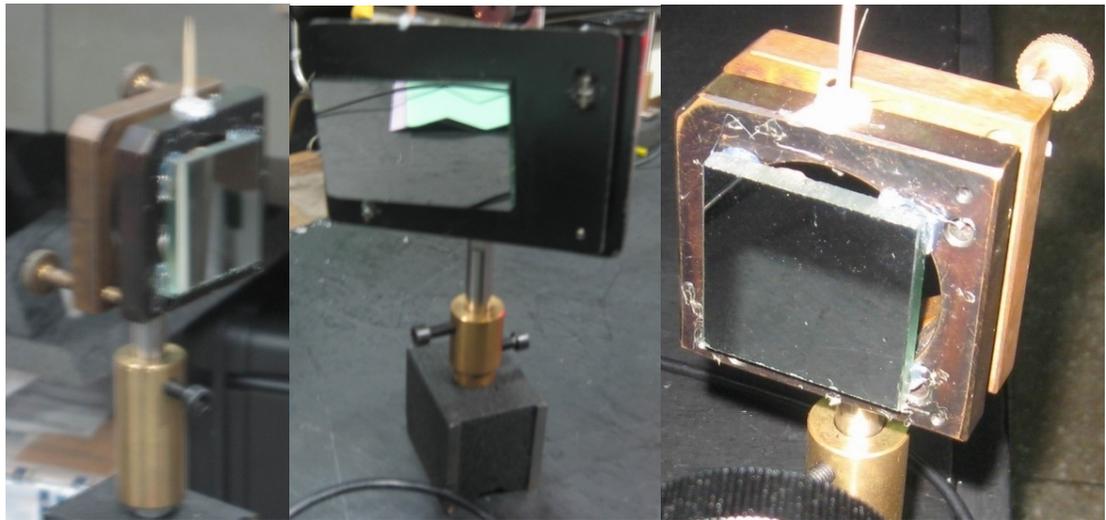


Figura 61. Espejos de cara paralela.

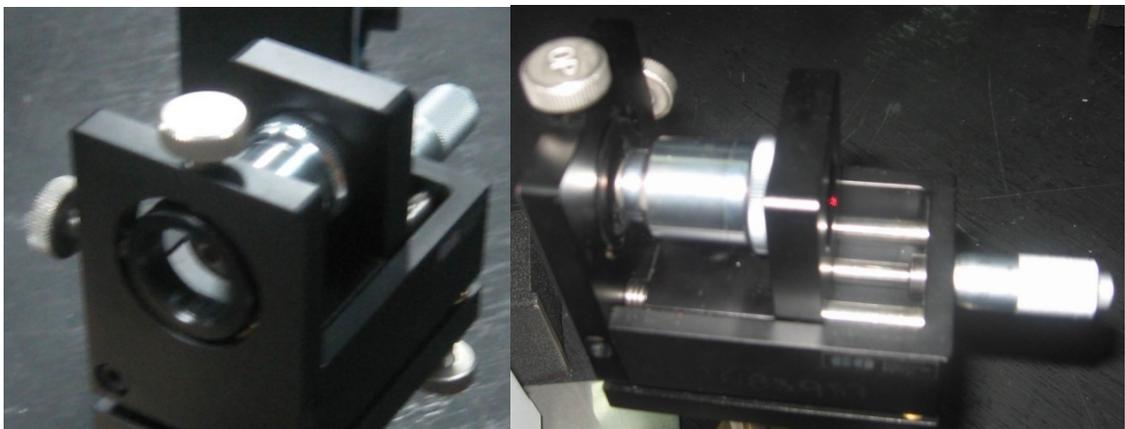


Figura 62. Sistema de filtro espacial y colimador.

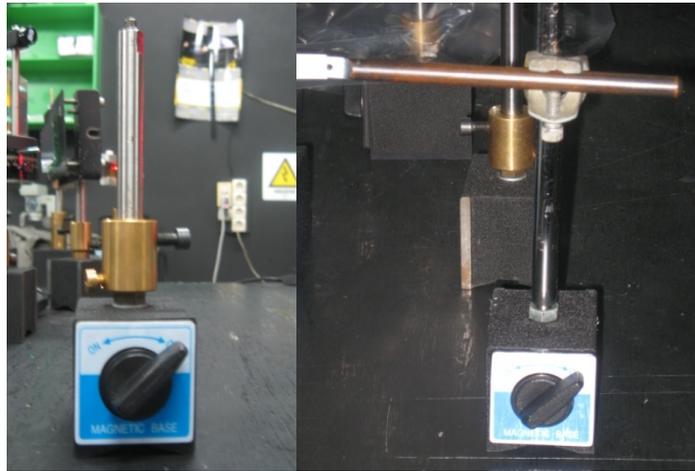


Figura 63. Base magnética con soporte.

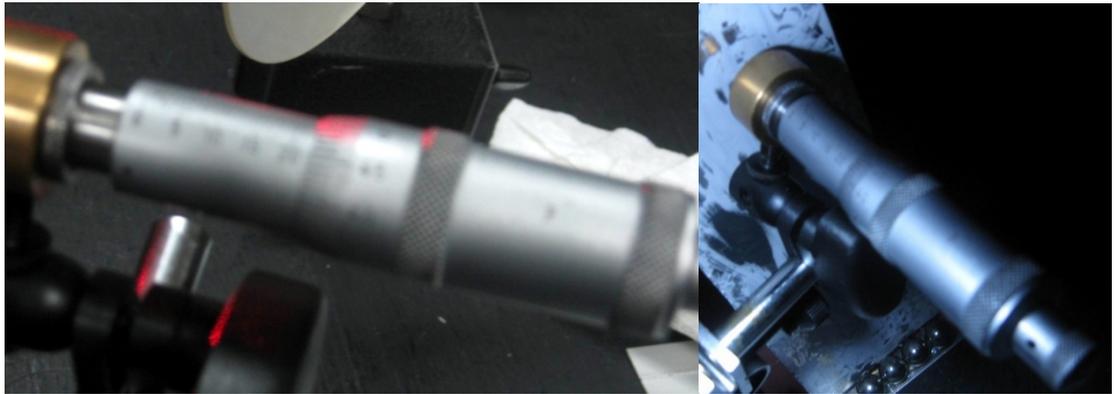


Figura 64. Tornillo micrométrico.

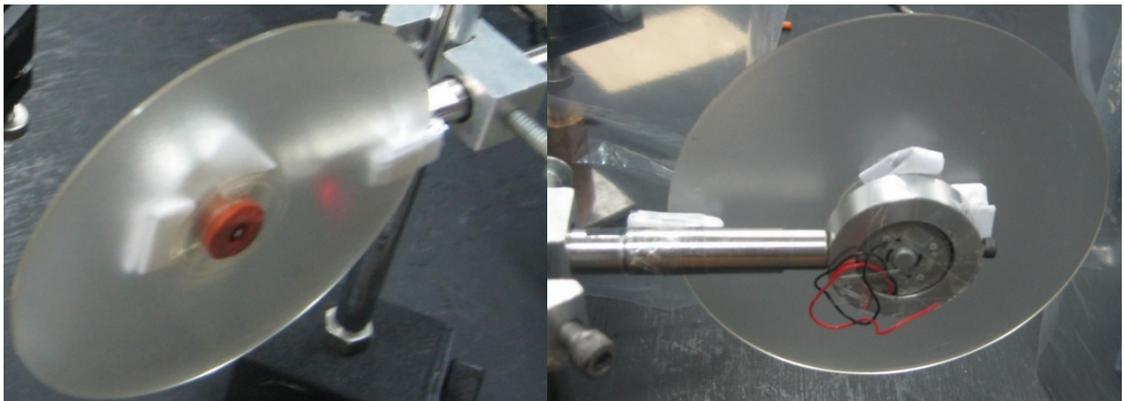


Figura 65. Disco difusor.



Figura 66. Mesa antivibración con doble placa de acero.

Con los equipos mostrados en las figuras 57 a 66, en los cuales aparecen algunos elementos característicos como son el obturador, las bases magnéticas y el disco difusor fue posible realizar la implementación del montaje que se presenta como esquema en la figura 44.

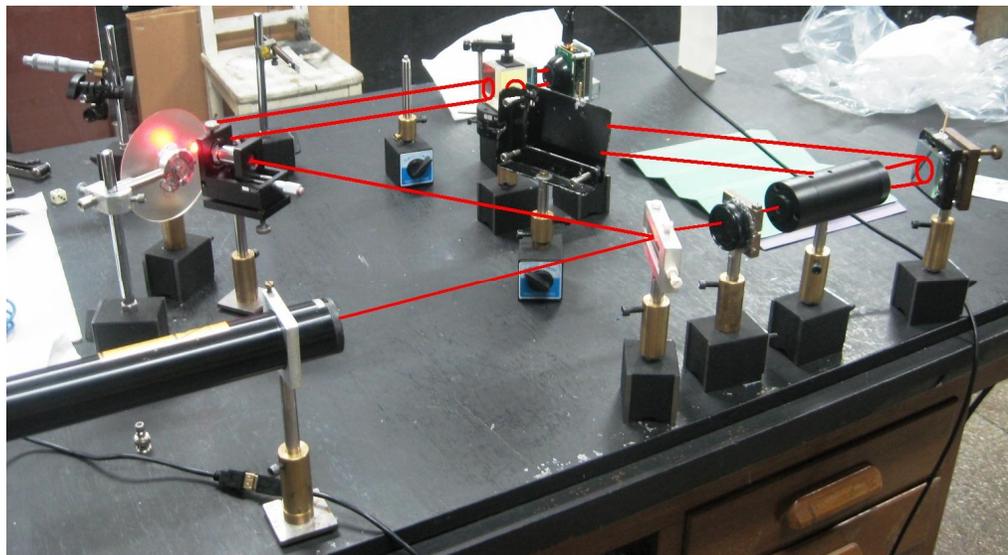


Figura 67. Montaje físico implementado en los laboratorios de óptica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá para holografía digital de doble exposición.

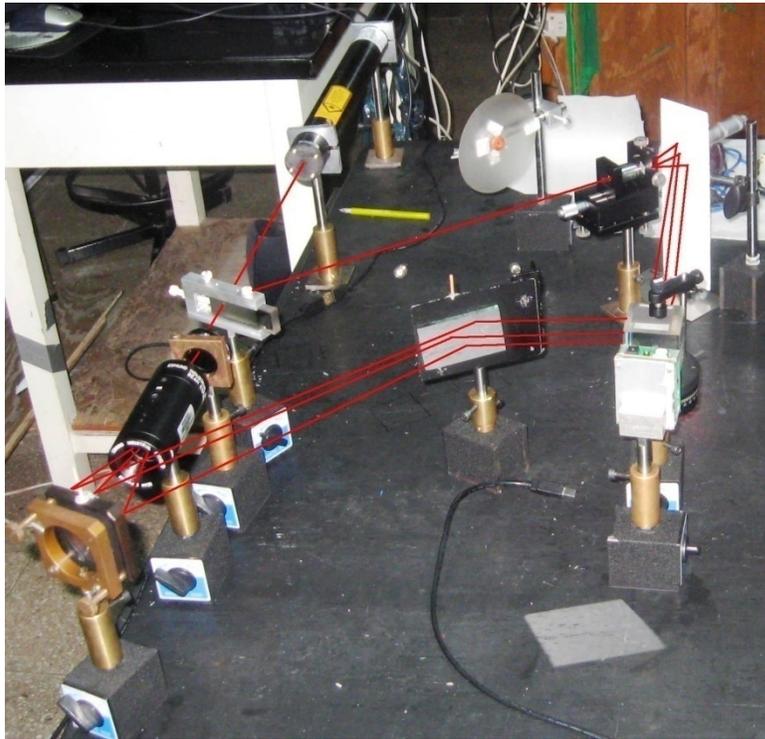


Figura 68. Montaje físico implementado en los laboratorios de óptica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá para interferometría holográfica de doble exposición.

El montaje general cuenta con un láser de Helio-Neón JDSU de 10 mW de potencia con una longitud de onda de 632.8 nm , cuya emisión es dirigida hacia el *divisor de haz plano* parcializando en un porcentaje de cerca del 50% la luz que lo atraviesa y la que se refleja sobre su superficie.

La emisión a través del *divisor de haz plano* pasa por un *shutter* u *obturador* de la señal de luz encargándose de reducir la intensidad del haz referencia para que las características del objeto enmarcadas en el haz objeto se resalten manteniendo su intensidad mayor al del haz referencia. La misma señal viaja a través de un *filtro espacial* encargado de expandir el haz referencia y así poder tener las mismas características de iluminación necesarias sobre el objeto. Esta señal se refleja sobre un *espejo plano* que posee pérdidas casi inexistentes, en donde un porcentaje muy alto de la luz se refleja sobre su superficie, no incorporando pérdidas o ruido óptico como en el caso de los espejos comunes conformados por vidrio y una película reflectiva a su respaldo, la dimensión del ancho del vidrio provoca que se produzca reflexión sobre su superficie y la superficie de la película obteniendo haces no deseados que pueden interferir con una verdadera emisión y su respectiva utilidad. El haz referencia difundido es dirigido mediante un segundo *espejo plano* y a su vez hacia el *divisor de haz cúbico*.

La parte de la luz láser reflejada sobre el *divisor de haz plano* es dirigida a un sistema de *expansión y colimación* del haz orientado hacia el objeto, el cual como en el caso anterior realiza una apertura y centralización de la luz emitida y así homogeneizar su iluminación.

La *cámara Lumenera* sensor tipo *CMOS* de resolución **1280x1024** pixeles y tamaño de registro de pixel de $6.7 \mu\text{m}$ cuadrados (alto x ancho) ubicada en este caso en forma paralela al *divisor de haz cúbico*, registra a través del mismo el haz objeto producto de la reflexión de la iluminación que produce el objeto bajo estudio, interfiriendo con el haz referencia sobre el *divisor de haz cúbico*, que cumple la función de combinador de los haces objeto y referencia, dando como resultado el registro de un holograma.

Los soportes mencionados estaban provistos de bases magnéticas para lograr una alta adherencia a la mesa, adicional a la manipulación y desplazamiento que permitían en relación a la mesa antivibración de doble capa de acero con un alto grado de estabilidad.

La diferencia entre la aplicación del montaje para holografía y para interferometría holográfica radica en el elemento difusor del haz objeto para el caso de holografía y la modificación realizada sobre el objeto bajo estudio en el caso de interferometría holográfica.

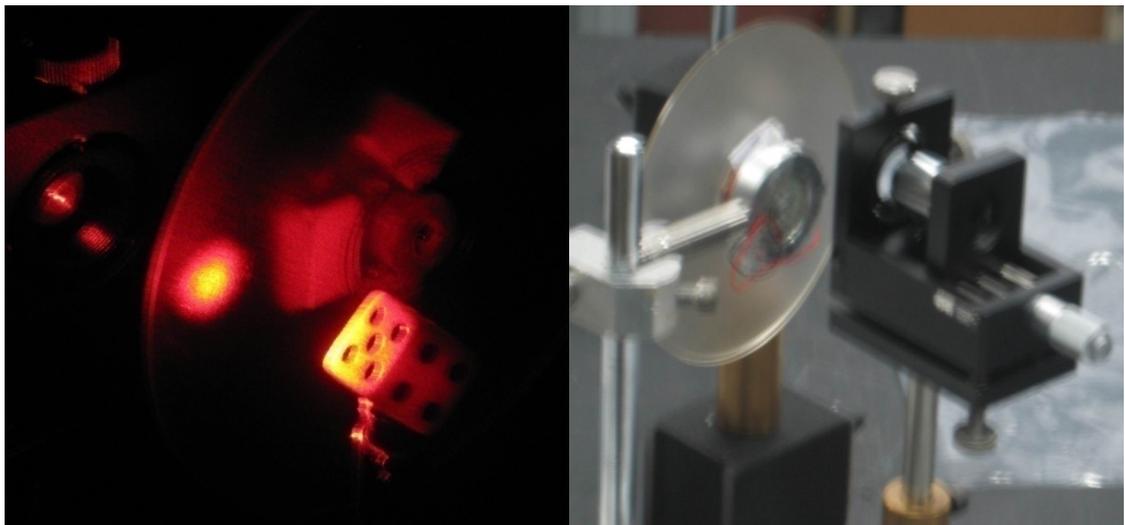


Figura 69. Disco difusor ubicado entre el haz dirigido al objeto y el objeto.

En holografía digital se toma como una alternativa de eliminación del orden cero de difracción, la sustracción de dos hologramas *decorrelacionados* que hace referencia a registros de hologramas de un mismo objeto bajo iluminación diferente, que se ajusta cambiando la posición del *disco difusor* antes del objeto en la figura 69, de esta manera se introduce una distribución de fase aleatoria en la

onda iluminante entre los dos registros y por tanto, una alteración de la codificación de la información del objeto sobre el patrón de interferencia, eliminando información similar persistente como es el caso del componente DC.

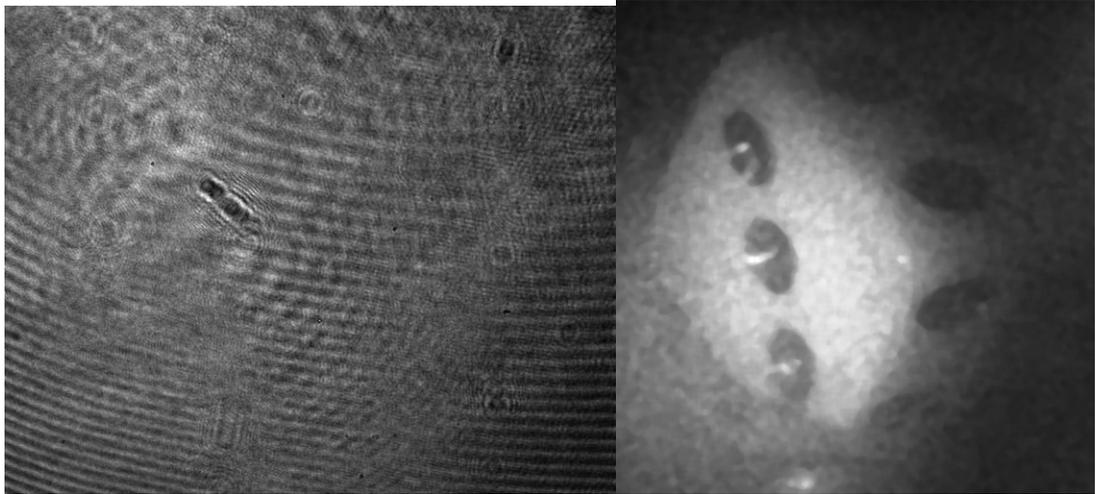


Figura 70. Holograma digital y reconstrucción numérica del dado mostrado en la figura 69.

Un ejemplo de holograma digital es presentado en la figura 70 (izquierda), cuya reconstrucción numérica (derecha) corresponde al dado mostrado en la figura 69, conformado por un procesamiento entre cinco hologramas decorrelacionados.

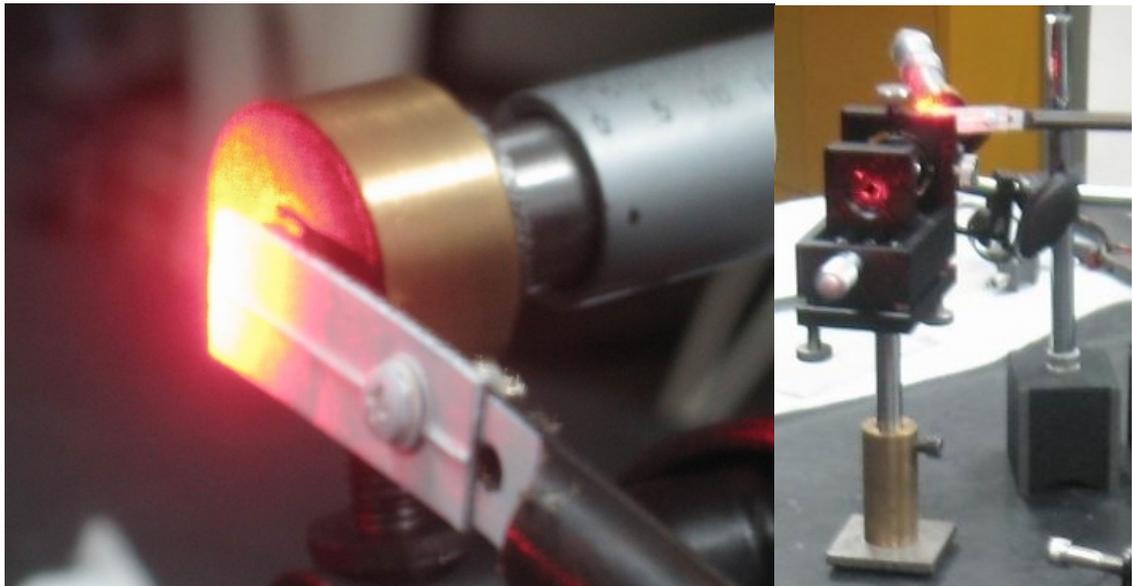


Figura 71. Modificación de una lámina mediante presión de tornillo micrométrico.

Una de las pruebas realizadas en relación a interferometría holográfica fue con base a la modificación de una lámina mediante presión ejercida por parte de un tornillo micrométrico como el que se muestra en la figura 71, analizando el grado

de desplazamiento para cada alteración y registrando en un holograma cada estado, comprobando modificaciones debidas a esfuerzos.

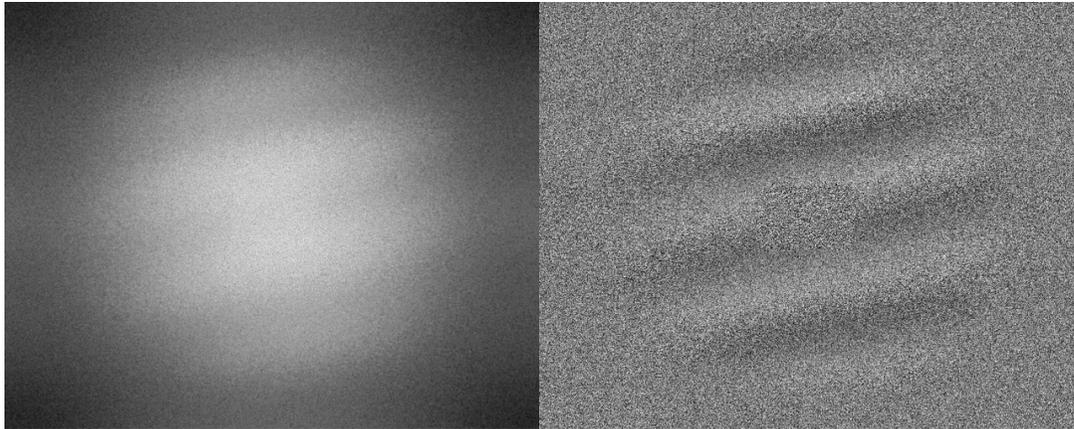


Figura 72. Diferencia de amplitud y fase para una deformación mecánica sobre una placa.

Como evidencia de la experiencia tratada en este apartado se presenta en la figura 72, la reconstrucción en amplitud y fase de un estado de la lámina presentada en la figura 71, en diferencia del estado inicial produciendo un interferograma, relacionado con la amplitud (izquierda) y mapa de fases (derecha) de la deformación ocasionada.

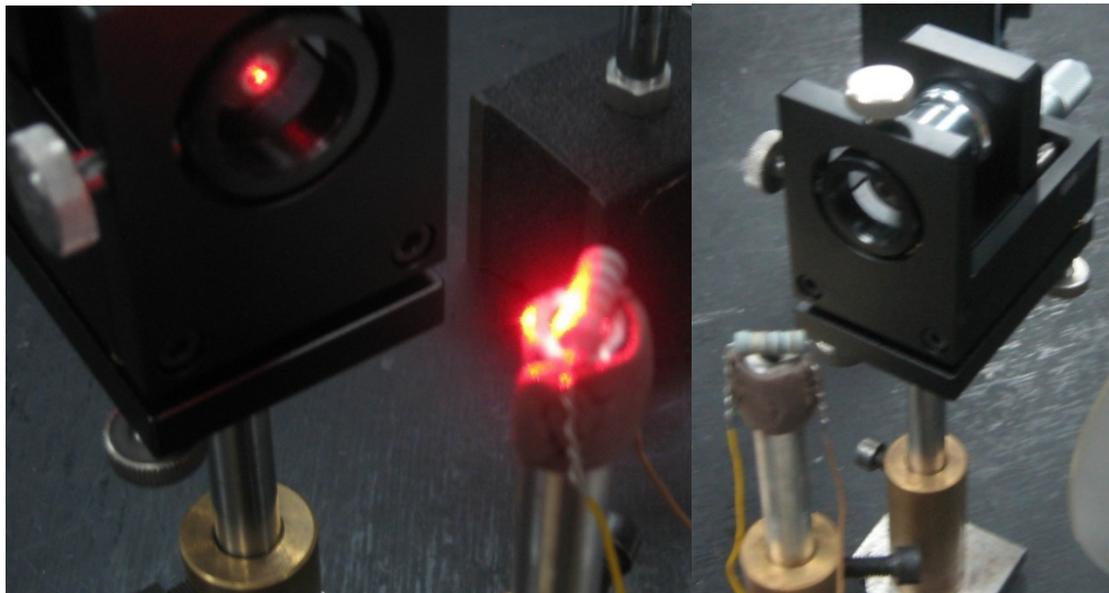


Figure 73. Análisis de una resistencia mediante interferometría holográfica.

Otro ensayo realizado, que permitió verificar modificaciones por causa térmica fue efectuado sobre resistencias de carbón, ubicadas como se presenta en la figura 73, cuyos terminales fueron expuestos a una diferencia de potencial variable en

forma ascendente, registrando las características del objeto en cada variación en un holograma digital, como en el caso anterior.

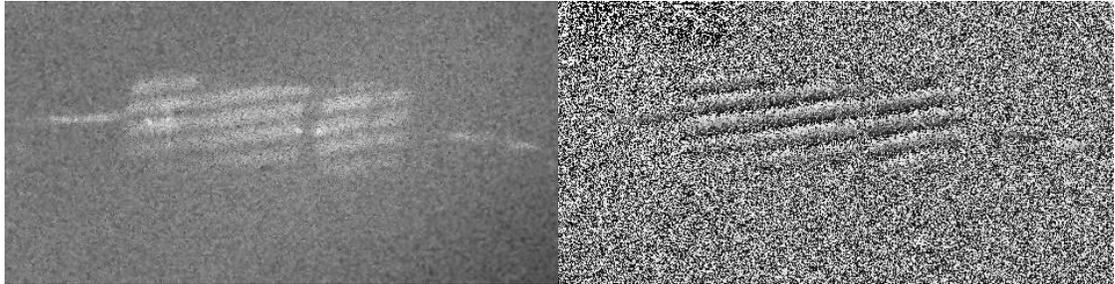


Figura 74. Diferencia de amplitud y fase para una deformación térmica.

Uno de los resultados de la modificación de una resistencia por causa térmica se observa en la figura 74.

Los anteriores procesos de análisis por interferometría holográfica fueron efectuados en ausencia del *disco difusor*, debido a que una alteración de la iluminación modifica el patrón de *Speckle* que permite observar la modificación causada sobre un determinado objeto bajo análisis, tomando el mismo como la señal de luz referencia.

Con el mismo montaje se realizaron pruebas con el software y código propiamente desarrollado, tan solo realizando modificaciones elementales para congeniar con las características propias de los equipos con los cuales se contaba, obteniendo resultados satisfactorios.

2.3 DESARROLLAR UN MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES GRÁFICAS A PARTIR DE LAS TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA IMPLEMENTADAS.

Haciendo uso de un lenguaje de programación orientada a objetos se realizaron diferentes programas y modificaciones que llevaron a la creación de una fracción del software final realizado durante el transcurso de esta investigación, encargado de asumir la tarea de controlar una cámara como dispositivo de adquisición digital para el registro de hologramas en el equipo de computo del cual se haga uso para realizar la adquisición de hologramas y posterior tratamiento en busca de análisis de deformación de escala mínima.

2.3.1 Elaboración de un algoritmo primario para adquisición de imágenes. En vista de que es necesario el uso de un equipo de computo para realizar el tratamiento de imágenes y de que los equipos de captura gozan de diferentes tipos de conexión tales como USB, FireWire o GigE, se optó por realizar un módulo que controle y determine cámaras USB, debido a las múltiples ventajas sobre

adquisición, control y estándar que poseen los dispositivos USB, cuyas entradas de conexión se encuentran actualmente incluidas en cualquier computador, siendo el caso que el sistema se desee transportar en un computador portátil o de escritorio.

Contando con la mención anterior se procedió a buscar un elemento básico de captura por medio USB, como es una cámara Web. Para ello se adquirió la cámara *Veo Stingray S/N: 330VB39C* cuyas características son:

- Fácil manejo de enfoque mediante una rueda o anillo con la que se localiza nitidez de imagen.
- Provista de un LED de alta intensidad que indica en verde cuando se encuentra capturando imágenes digitales.
- Con su base giratoria captura imágenes en todos los ángulos con una libertad de 360 grados, además de poseer una inclinación de arriba hacia abajo de 20 grados.
- Conexión USB de carga y descarga rápida con un cable de 6 pies de longitud.



Figura 75. Cámara Veo Stingray

De este modo, se hizo uso del software de programación y tratamiento digital MATLAB, con el cual se realizó todo el desarrollo computacional, tratamiento y control de los registros digitales y el mecanismo de su adquisición, haciendo énfasis en el control de disparo (inicio de captura) y modificación de características por defecto, tales como resolución, intensidad, color, ubicación (haciendo referencia a la prioridad dirigida al encontrar otros elementos de captura conectados en el mismo computador).

En la figura 76, se puede observar la ventana que se generó tras haber concretado el código de adquisición y tratamiento básico de imagen en relación al aumento o disminución de la intensidad visual de las mismas, así como la identificación del primer dispositivo activo y el número de muestras a obtener dentro de un lapso de tiempo estimado por el usuario.

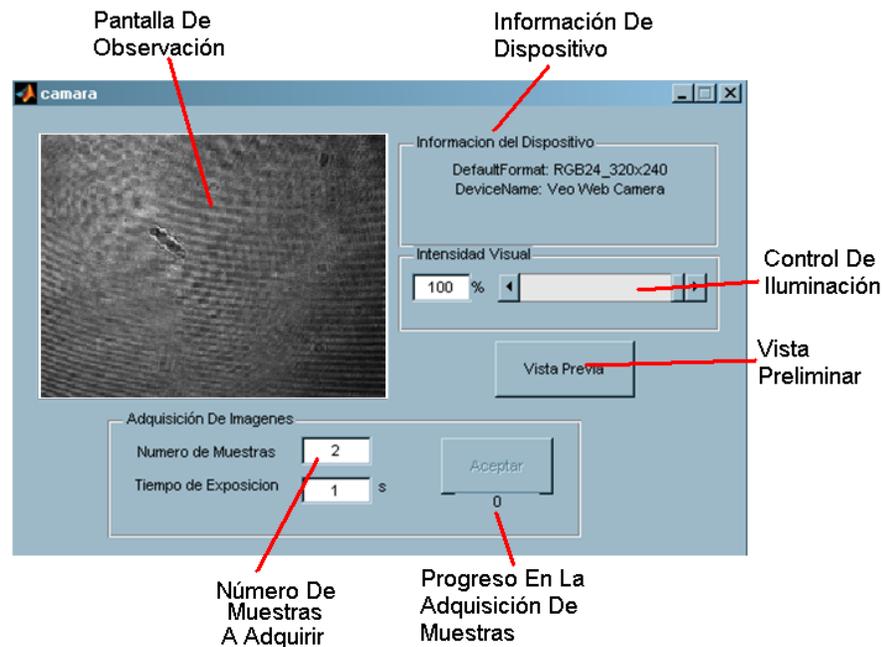


Figura 76. Ventana de control para adquisición de registros.

El procedimiento para adquirir una serie de imágenes en el módulo presentado en la figura 76, se muestra como:

- Tras haber activado el módulo, este determina si existe algún dispositivo de captura de imágenes, como son las cámaras web, conectado de lo contrario advierte con un mensaje de error.
- Habiendo determinado un dispositivo de captura presenta las características básicas de formato y nombre específico (información de dispositivo).
- Se da una observación a la *Vista Previa* ajustando la intensidad deseada por el usuario, esta modificación no se realiza sobre el dispositivo, sino bajo la función de Matlab definida como *imadjust* que ajusta el nivel de intensidad de una imagen dada, aumentando o disminuyendo el índice que se refiere a la *gama* de la imagen, generando una variación en la intensidad, aclarando u obscureciendo la imagen. En esta etapa el botón *Aceptar* se encuentra inhabilitado hasta que nuevamente se accione *Vista Previa*.
- Tanto en el proceso de observación como en una etapa posterior es posible cambiar los datos de *Número De Muestras* y *Tiempo De Exposición*, hasta antes de aplicar el botón aceptar que se encuentra ya habilitado.
- Finalmente, mediante un ciclo de iteraciones se realiza el proceso de captura de imágenes en escala de grises haciendo uso de la función *rgb2gray* para un posterior almacenamiento, ya sea en formato *.mat haciendo uso de la función *save* o en archivos de imagen mediante el uso de la función *imwrite*.

En la figura 77, se presenta el módulo en funcionamiento haciendo uso de la cámara mostrada en la figura 57.

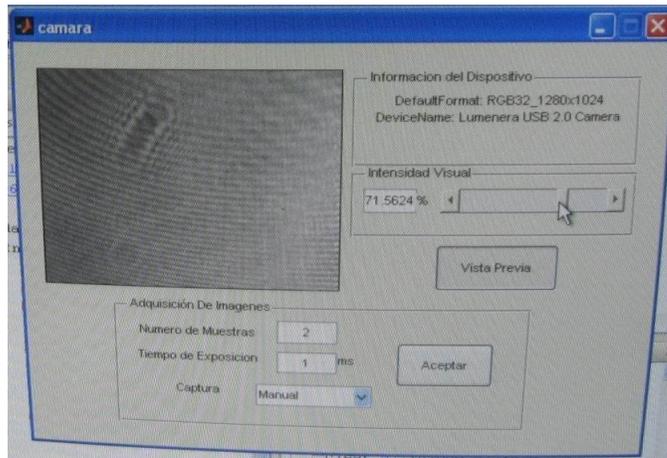


Figura 77. Adquisición de registros holográficos desde cámara Lumenera.

A continuación se indica el diagrama de flujo correspondiente al proceso de captura de registros denominado cámara.

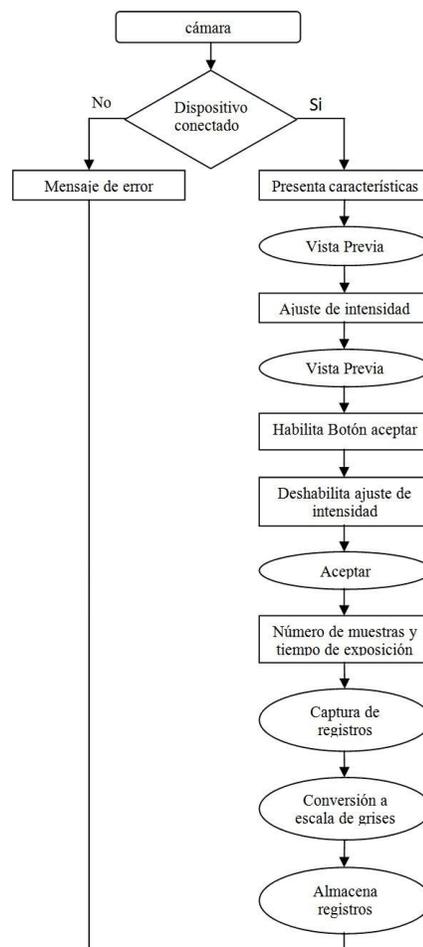


Figura 78. Diagrama de flujo del proceso de captura

2.3.2 Implementación del módulo para captura de registros holográficos. Si bien la apariencia y utilidad de la ventana mostrada en la figura 76, es adecuada, se pensó en solventar posibles contrariedades en relación a algunas situaciones que puedan presentarse:

- El dispositivo de captura necesario no se encuentra como el dispositivo por defecto de adquisición de imagen, contando con que se encuentren conectados más de uno.
- El formato que adquiere el dispositivo por defecto no es el adecuado para la prueba que se desea realizar.

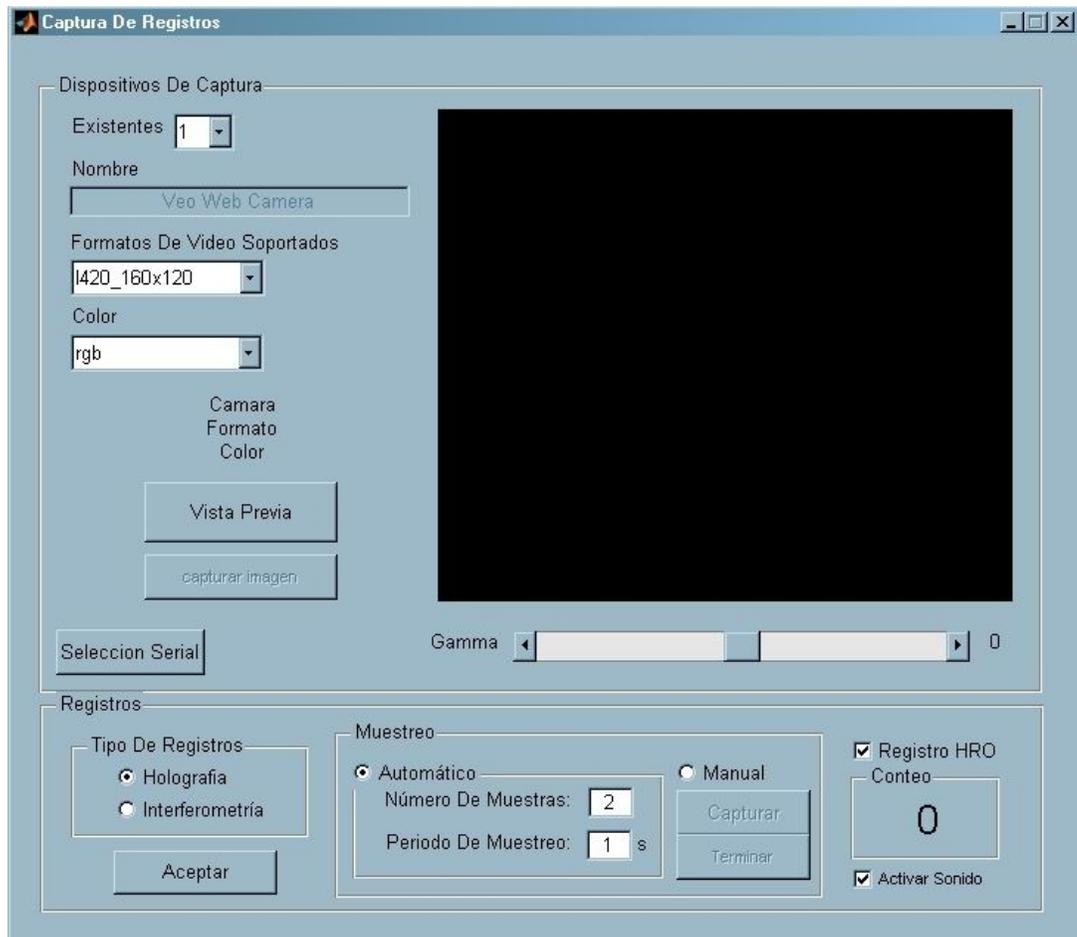


Figura 79. Ventana de captura y control para adquisición de registros.

De esta manera se buscaron mecanismos para determinar la cantidad de dispositivos disponibles, las características propias de cada uno, seleccionar el adecuado y modificar los formatos de almacenamiento por defecto, según lo requiera un determinado usuario, cuyos resultados fueron altamente satisfactorios tras el manejo del comando *imaqhwinfo*, mejorando notablemente la utilidad del módulo de adquisición de la figura 76, modificado en la figura 79.

Adicional a los casos previamente expuestos, surgen aditamentos que permiten mejorar las características de adquisición de registros holográficos, definiendo en cada caso la utilidad que se le dará a los mismos.

2.3.2.1 Sistema electrónico de control. Como se mencionó en el numeral 5.2.2 de este trabajo, una de las opciones existentes para realizar una mejora en la calidad de imágenes en holografía digital es hacer uso de una iluminación alterada por la disposición de un disco difusor.

Una de las técnicas existentes para realizar la sustracción del componente DC es capturar por separado los registros de haz objeto y de haz referencia, impidiendo el paso de cada uno en la captura del registro contrario, con el fin de realizar una sustracción digital de los haces objeto y referencia a cada holograma.

Retomando la ecuación 5, se comprende la intensidad registrada en el plano del holograma conformada por la superposición de los haces referencia y objeto, en donde los dos primeros términos corresponden a la intensidad del objeto y a la de referencia respectivamente, responsables del orden cero de difracción o componente DC, cuya sustracción por separado da lugar a la retención solo de las imágenes virtual y real del objeto registrado.²⁷

Habiendo expuesto los anteriores argumentos, se lleva a cabo el proceso de diseño, control y automatización de estos pasos, considerando la disposición del diagrama de bloques en la figura 80.

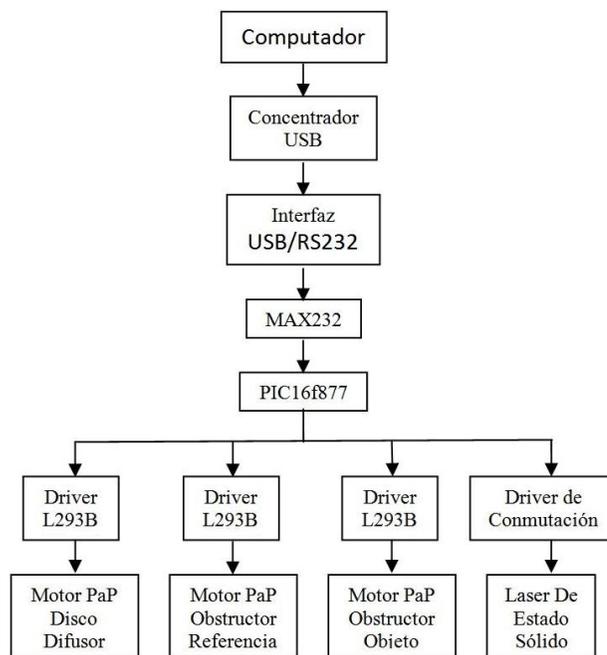


Figura 80. Diagrama de bloques del sistema electrónico.

²⁷ HERRERA, Jorge. Tratamiento del ruido en holografía digital. 2004

Como es notorio, para llevar a cabo este proceso se dispone de un equipo de computo que puede poseer conexión de tipo USB, a través de la cual se pretende realizar una conexión serial RS232, haciendo relación a que la mayoría de los equipos actualmente construidos poseen el estándar USB dejando de lado conexiones como la serial, o conectando directamente al puerto serial si el equipo en uso lo permite.

Se selecciona una conexión serial por las ventajas que le disponen al presente trabajo, entre las que se destacan:

- Una longitud de conexión mayor al del estándar USB, en donde se puede dejar el montaje a una distancia considerable, evitando variaciones de ruido por parte del usuario (caminar, hablar, etc.).
- Transmisión rápida pada datos menores, no haciendo necesaria una alta velocidad de transmisión (2.4Kbps)
- Estándar de comunicación aceptada por la mayoría de los microcontroladores.

Habiendo resuelto el medio de comunicación y la velocidad de transmisión, la información es acondicionada a niveles de voltaje comprendidos por el microcontrolador PIC16f877, que respectivamente realiza el proceso de codificación y transmisión de señal de control hacia los diferentes dispositivos de actuación, mediante elementos de control denominados *drivers* que para el caso de motores es usado el circuito integrado L293B y para el encendido del láser un circuito de conmutación transistorizado.

Se señala que los motores usados como actuadores son *paso a paso* debido a las características útiles al trabajo:

- Control de ángulo sencillo a diferencia de trabajar con motores de corriente continua.
- Giro continuo y constante en contraste de trabajar con servomotores.
- Poseen el suficiente torque para la utilidad que se les dará.

Un motor cumple de manera automática el proceso de giro del disco causando alteración de la iluminación. Se implementan dos motores adicionales, uno por cada haz, los cuales poseen en su eje una lámina que inhibe el paso de los haces al momento de realizar el registro contrario, obteniendo un filtro de origen análogo para el componente DC, mejorando enormemente la calidad de imagen tanto para holografía como para interferometría holográfica. Se realiza un encendido del láser desde el mismo mecanismo de control, eliminando la necesidad de que el usuario deba llevar a cabo esta tarea.

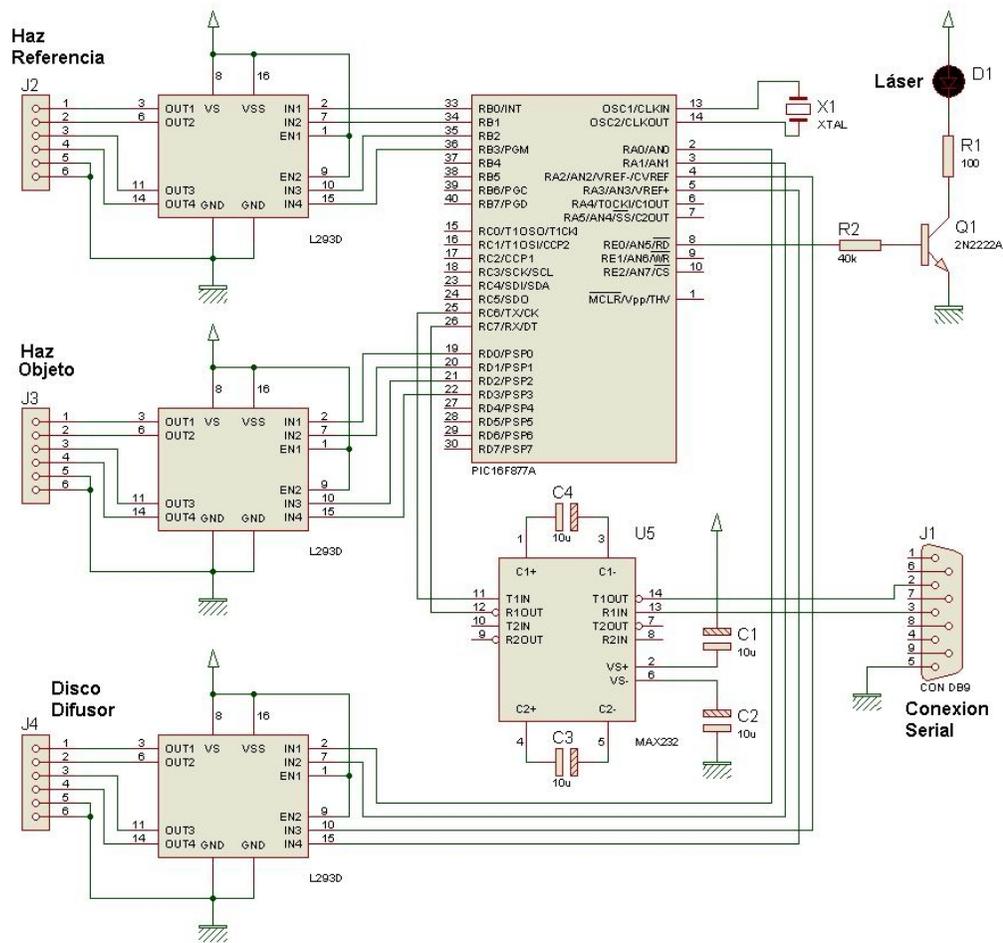


Figura 81. Diagrama del circuito electrónico.

Uno de los posibles inconvenientes que se encontró al hacer uso de la comunicación serial es que el puerto de comunicación puede variar dependiendo de la ubicación o conexión del convertor USB/RS232, o por la disposición de otros dispositivos que crean puertos virtuales de comunicación serial. Por tanto se desarrolló el módulo que se presenta en la figura 82, el cual determina los puertos de comunicación activos de forma automática y permite su respectiva selección haciendo uso de un menú desplegable, mediante la función *instrhwinfo*.



Figura 82. Ventana de selección de puerto serial.

El mismo se activa en la ventana *Captura De Registros* presentada en la figura 79, oprimiendo el botón *Selección Serial*.

2.3.2.2 Captura de registros. En la sección de *Registros* de la figura 79, se puede observar un adelanto en las convenciones sobre el tratamiento que se le dará a los registros, para holografía o para interferometría holográfica.

En el primer caso al seleccionar como *Tipo De Registros* la opción *Holografía*, se permite una administración interna del disco difusor, el cual variará su giro tras cada captura de imagen, caso contrario a lo que sucede al seleccionar *Interferometría*, en el que el disco permanecerá estático en acuerdo de mantener las características de luz.

De igual forma se presenta una opción para realizar una captura *HRO*, en la que se efectúa la adquisición del haz de referencia R y del haz objeto O en una primera instancia, para continuar con la toma de hologramas digitales H.

Se mantienen las características de la figura 76, en la que el proceso de captura requiere que se disponga del número de registros a efectuar y el tiempo entre cada registro, existiendo también un conteo anunciante. Adicionalmente, se considera que en algunas ocasiones una prueba por medio de interferometría holográfica puede conllevar diferentes lapsos de tiempo entre la captura de registros y que una iteración para ello puede resultar poco apta, por lo tanto se adiciona una sección denominada *Muestreo* en la que se puede seleccionar entre un mecanismo manual o automático para la captura de registros.

Finalmente, se presenta la opción *Activar Sonido*, la cual permite que cada registro efectuado sea anunciado además de manera visual, en forma sonora.

2.4 REALIZAR UNA IMPLEMENTACIÓN EN SOFTWARE QUE PERMITA VISUALIZAR LOS RESULTADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y OBTENCIÓN DE PATRONES DE ANÁLISIS UTILIZANDO UNA INTERFAZ GRÁFICA EN MATLAB.

Como muchos de los programas conocidos, se ha desarrollado un software en el cual sea posible llevar a cabo diversos procesamientos mediante una interfaz que haga uso del sistema y se comporten de forma casi automática para que un usuario se capaz de realizar modificaciones de entorno mediante eventos, sin la necesidad de ser un desarrollador o basarse en un lenguaje de programación o estructuración básico, creando una interfaz gráfica de usuario o GUI en inglés que comunica el sistema computacional o de control con el usuario.

El desarrollo deseado se ha realizado apoyado, como se ha relatado en el numeral anterior, en MATLAB como software de programación, basándose en su gran

robustez, características simples en el manejo matemático y gran capacidad en el procesamiento digital de imágenes, punto clave de esta investigación.

Tras una serie de modificaciones en cuestión de procesamiento, mejora de código fuente, recopilación de algoritmos y distribución ordenada para realizar los procesos necesarios, se procedió a realizar en esta tesis el software denominado *HID* con base a las siglas de Holografía e Interferometría Digital, provisto de características que permiten realizar registros holográficos, detección de dispositivos de captura existentes, puertos de comunicación, diferentes tipos de filtros y procesamiento de imágenes haciendo del mismo una herramienta útil en algún tipo de aplicación que aproveche las características propias de la holografía para llevar a cabo pruebas como en el caso de la metrología óptica. Las diferentes características que componen el sistema de análisis conllevan a una serie de eventos relacionados, describiendo cada uno como una función implícita y necesaria para un desarrollo práctico a conocedores de la utilidad de sistemas similares de holografía e interferometría holográfica, de este modo la serie de servicios que se ofrecen han permitido que sea posible definir características propias de funcionalidad presentadas como ventanas de procesamiento individual.

2.4.1 Ventana principal (HID).

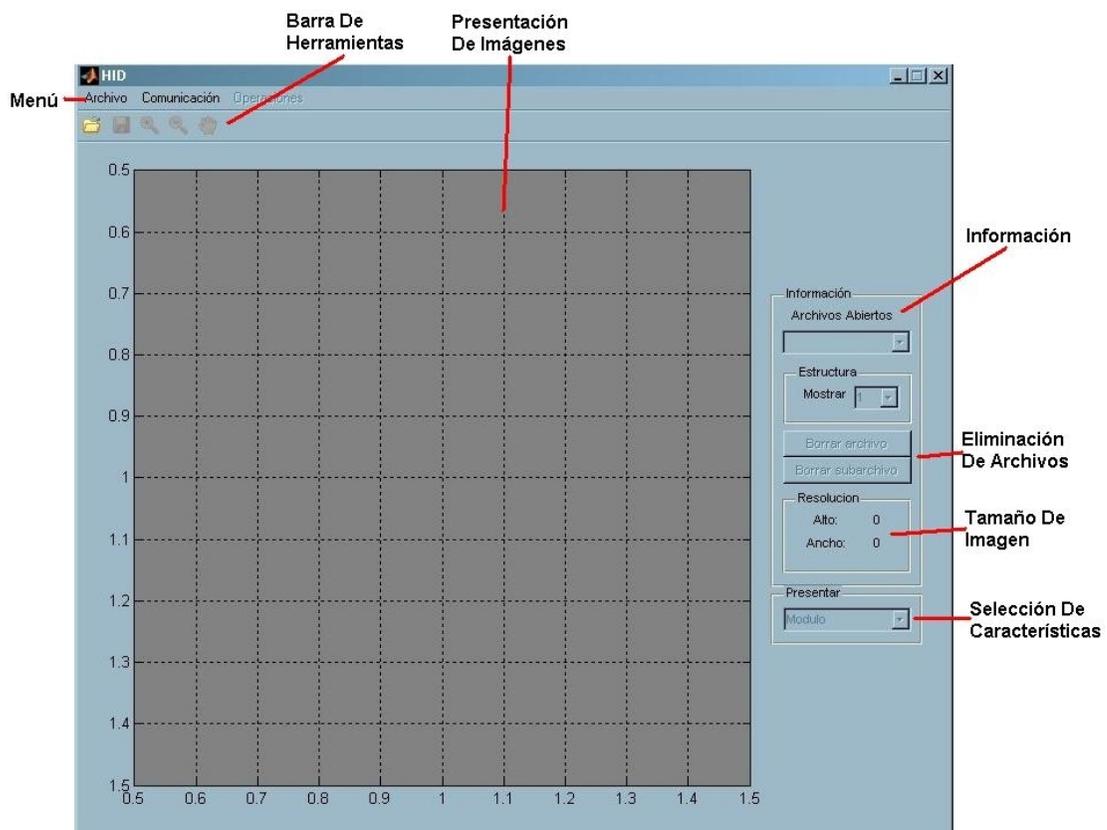


Figura 83. Ventana principal

De forma similar a muchos de los programas basados en presentación de ventanas a los cuales se está habituado, la ventana principal ha sido diseñada con una selección de menús desplegables y una barra de herramientas para acceder a los diferentes mecanismos de procesamiento implícitos dentro de cada nueva ventana cuyo resultado se refleja en esta misma para un nuevo procesamiento o finalización general.

La figura 84, refleja de forma adecuada lo anteriormente mencionado.

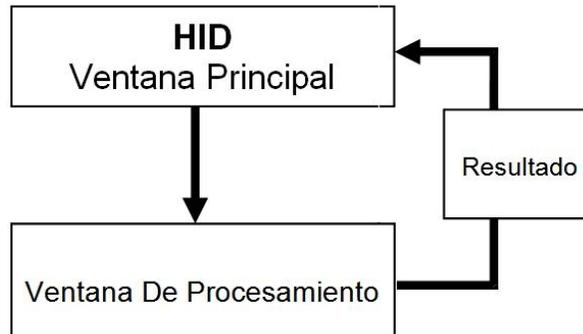


Figura 84. Relación de la ventana principal y ventanas de procesamiento.

De igual forma en esta ventana es posible realizar diferentes actividades, como es la apertura y almacenamiento de archivos desde y hacia los formatos jpg (Joint Photographic Experts Group), bmp (Windows Bitmap), png (Portable Network Graphics) y mat (MATLAB formatted file) haciendo uso de los iconos *Abrir* y *Guardar* de la barra de herramientas.

Cabe señalar que los archivos con extensión *.mat tienen características especiales para ser aprobados por el sistema, cada archivo debe llevar como variable de trabajo interna *holo* que trata de una matriz de celdas (*cell*) o colección de contenedores los cuales pueden almacenar cualquier tipo de dato de forma independiente. Para el caso presente los datos en primera instancia son imágenes o las mismas tras realizarles algún tipo de tratamiento, almacenadas como matrices fácilmente tratables en el software Matlab.

En la figura 85, se indica un esquema que presenta en forma gráfica esta distribución.

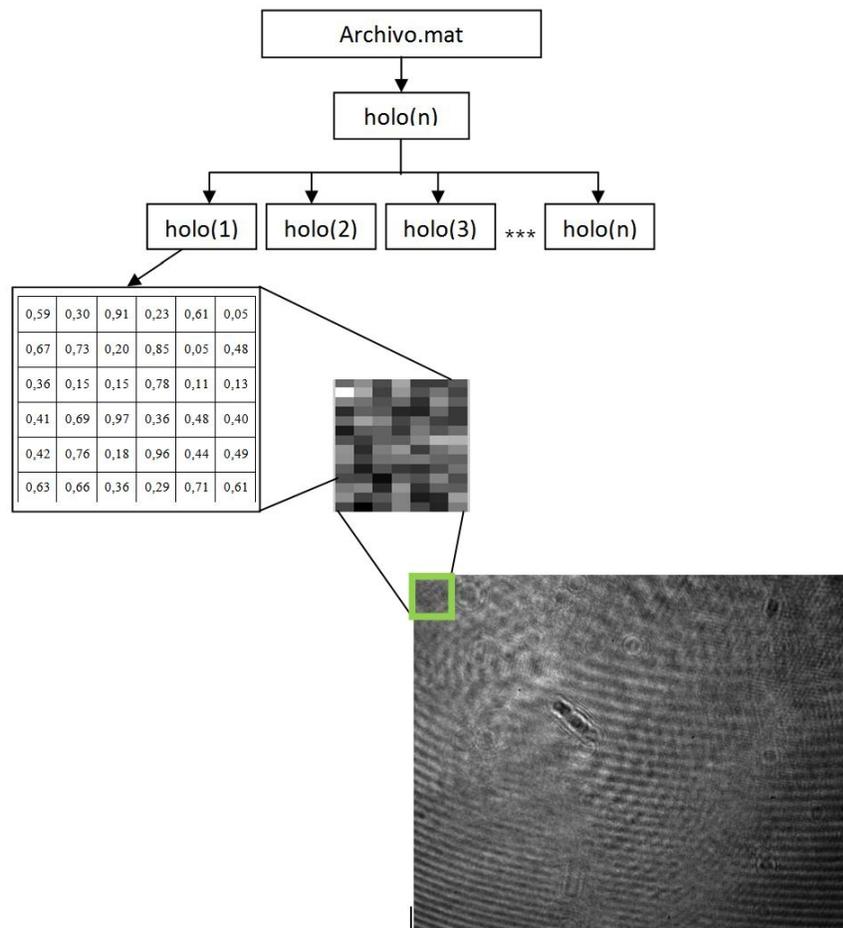


Figura 85. Distribución de celdas en archivos formato *.mat

La barra de herramientas posee adicionalmente tres elementos que permiten la indagación de una determinada imagen mediante las herramientas de aumento o acercamiento de imagen denominado Zoom In, disminución o Zoom Out y manipulación o Pan.



Figura 86. Barra de menús y de herramientas

Los menús que se presentan en la figura 86, denominados *Archivo*, *Comunicación* y *Operaciones* presentan diferentes links hacia otras ventanas de procesamiento y procesamiento local.

Archivo: Menú que se despliega para dar lugar a la pestaña *Nuevo Análisis*, que permite realizar dos tipos de pruebas completas, que son la *Holografía Digital*

(reconstrucción mediante hologramas decorrelacionados) e *Interferometría Digital* (diferencia de amplitud y fase entre muestras dadas).

De igual forma permite cerrar el programa de forma general al activar la pestaña *Salir* (figura 87).



Figura 87. Menú archivo desplegado

Comunicación: Muestra la pestaña *Captura De Registros* (figura 88), que presenta la ventana de la figura 79, en la que se determinan los dispositivos de captura de imagen conectados, los diferentes formatos en los que puede capturar y realizar los respectivos registros mediante las características que establezca el usuario, adicionalmente detecta y pone a disposición los puertos seriales habilitados para capturar las imágenes necesarias activando el camino y la electrónica correspondiente.



Figura 88. Menú comunicación desplegado

Operaciones: Menú desplegable que permanece inhabilitado mientras no se cuente con un archivo que se haya abierto para realizar un procesamiento y/o análisis. Dentro del mismo existen pestañas con las que se realiza una modificación local y otras que llaman a ventanas de tratamiento (figura 89), como son:



Figura 89. Menú operaciones desplegado.

- Transformación: Internamente posee las pestañas.

- FFT: Realiza la Transformada de Fourier Discreta de la imagen que se encuentra visualizada en la ventana principal.
- FFT inversa: Transformada Inversa De Fourier Discreta de la imagen visualizada.
- Shift: Inversión de los cuadrantes de una matriz mediante la función *fftshift*, útil en los casos en que se realiza una reconstrucción numérica y el espectro de amplitud mayor se aloja en los extremos, dirigiéndolos al centro de la imagen denominándose componente DC.

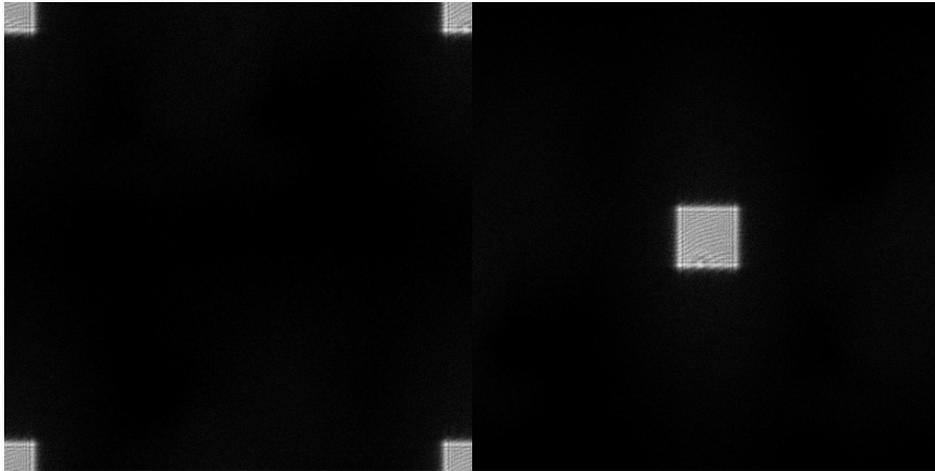


Figura 90. Ejemplo aplicación de Shift a un holograma reconstruido.

- Inversión de Imagen: Hace referencia al negativo digital en el cual el nivel de mayor intensidad para a ser el menor, y viceversa.
- Calcular: Abre una ventana que permite realizar operaciones entre imágenes como suma, resta, promedio y diferencia de fase.
- Filtros: Llama a la ventana denominada *Filtros*, en la que se sintetizan todos los filtros desarrollados a lo largo del presente trabajo.
- Reconstrucción Numérica: Ventana que permite hacer una propagación individual del holograma visualizado en la ventana principal.
- Desenvolvimiento de fase: Es una ventana de procesamiento para decodificar la información contenida en la fase que se adquiere de un proceso de interferometría holográfica digital.
- Perfil de imagen: Permite visualizar las elevaciones de un camino señalado por un usuario en una imagen dada.

- Seleccionar y cortar: Proceso local con el que se puede recortar una imagen ubicada en la ventana principal mediante el uso de un recuadro generado con la función *imrect*, con el que se selecciona el área a recortar y se aplica la acción de *doble clic* dentro del recuadro para llevar a cabo la modificación. Cabe señalar que durante este proceso todas las herramientas y menús se encuentran inhabilitadas para que el mismo se realice en una forma adecuada.

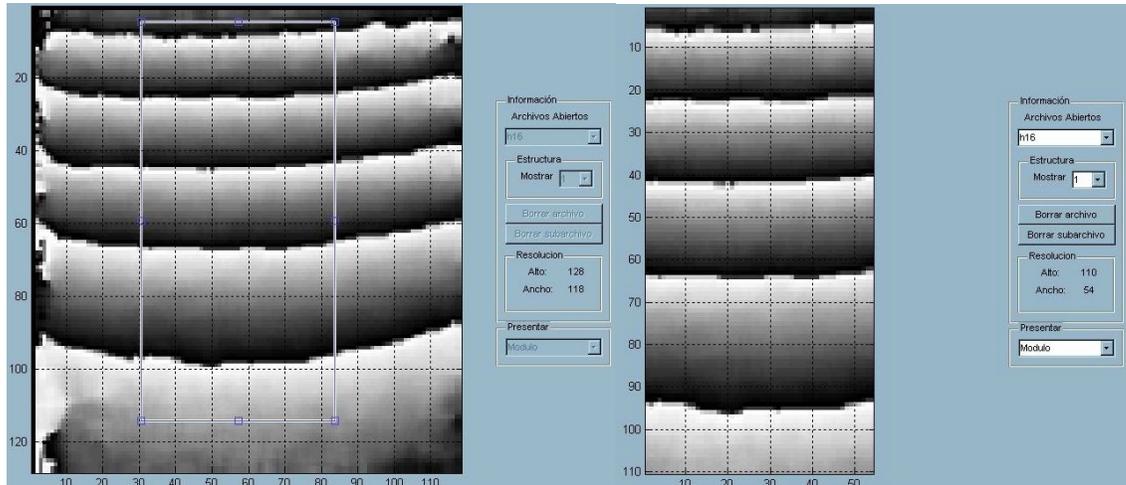


Figura 91. Uso de la herramienta Seleccionar Y Cortar.

Adicional a las características referidas en la barra de menús y de herramientas, la *ventana principal* posee una sección denominada *Información*, la cual está conformada por:

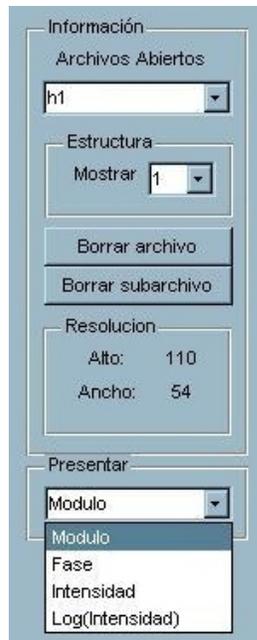


Figura 92. Sección de información.

- Archivos abiertos: Se refiere a un menú desplegable en el que se direcciona de forma individual los archivos abiertos, nombrándolos como *h*número, en donde *número* hace referencia a la posición en que se ha abierto el archivo (*h1, h2, h3,..., hn*), cuyo conteo termina una vez el programa general se haya cerrado.
- Mostrar: Menú en el que se muestra la cantidad y selección de subarchivos internos que poseen los archivos abiertos, relacionado con los formatos *.mat que pueden contener internamente múltiples subarchivos.
- Borrar archivo: Botón que permite eliminar uno de los archivos contenidos en el menú *Archivos Abiertos*.
- Borrar subarchivo: Botón con el que se eliminan los subarchivos contenidos en el archivo seleccionado. Se establece que al eliminar un subarchivo de un archivo que contienen solo uno, se eliminará éste del menú *Archivos Abiertos*.
- Resolución: Indicador de las dimensiones propias de la imagen visualizada, mostrando los valores de alto y ancho respectivo.
- Presentar: Menú desplegable que exhibe características necesarias de observar en este trabajo para una imagen *im* dada, para lo cual se hace necesario definirla en términos de una señal compleja:

$im = a + bi$, donde a corresponde al término real y b al término imaginario.

- o Módulo: Hace referencia a presentar el resultado de la operación $abs(im)$ en Matlab la cual consiste en $\sqrt{a^2 + b^2}$
- o Fase: Permite visualizar la fase de la imagen presente, determinada mediante la función $angle(im)$, definida como $\tan^{-1}(b/a)$
- o Intensidad: Cuadrado del valor real de imagen sumado al cuadrado del imaginario, identificada como $a^2 + b^2$ y en Matlab $(abs(im))^2$.
- o Log (Intensidad): Logaritmo de la intensidad de imagen, visualizando un nivel de intensidad mayor en valores bajos y constante en valores superiores, definida como $\log(a^2 + b^2)$.

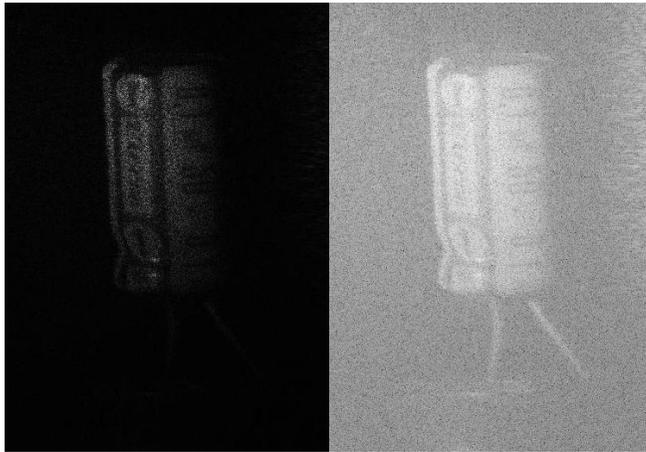


Figura 93. Módulo y Log (intensidad) de una imagen.

2.4.2 Captura de registros. Tal como se ha expuesto en el numeral 5.3.2 *Implementación Del Módulo Para Captura De Registros Holográficos*, el desarrollo presentado hace referencia al módulo de adquisición de señales gráficas (que para este caso son hologramas digitales) mediante la administración de dispositivos externos.

El mismo se presenta en la figura 79, junto a las diferentes utilidades que posee, sumada a la gestión que se puede realizar.

2.4.3 Calcular.

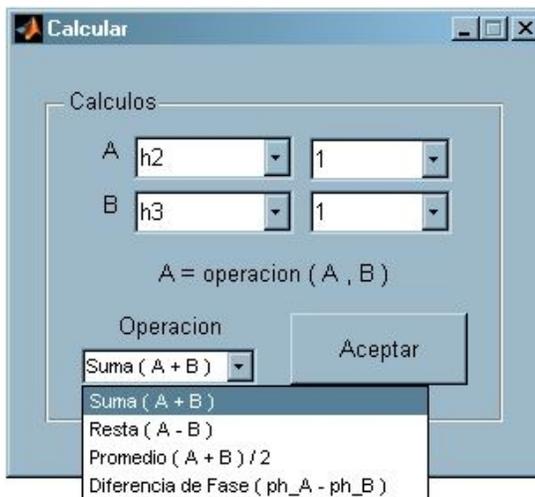


Figura 94. Ventana calcular

En la figura 94, se presenta la ventana *Calcular*, con la que se puede llevar a cabo operaciones básicas relacionadas con el tratamiento de imágenes digitales y otras que se pueden definir como propias de este trabajo.

En la parte superior es posible observar dos menús desplegables denominados *A*, el primero hace referencia al número de archivos abiertos, mientras que el segundo permite acceder a los diferentes subarchivos pertenecientes, como en el caso de archivos formato *.mat. Los menús nombrados *B*, tienen la misma función que los anteriores.

Al pulsar el botón *Aceptar* y dependiendo de los archivos y/o subarchivos seleccionados, se realiza la operación escogida en el menú *Operación*, que presenta la matemática relacionada en cada expresión.

Es preciso señalar que para realizar una de las operaciones presentadas entre imágenes, se hace necesario que las mismas posean dimensiones iguales, caso contrario el sistema determina este agravio a la operación y despliega un mensaje de error detallando lo mencionado.

Finalmente, se especifica que en el lugar del archivo denominado *A* o subarchivo seleccionado se presenta el resultado la operación realizada.

2.4.4 Filtros.

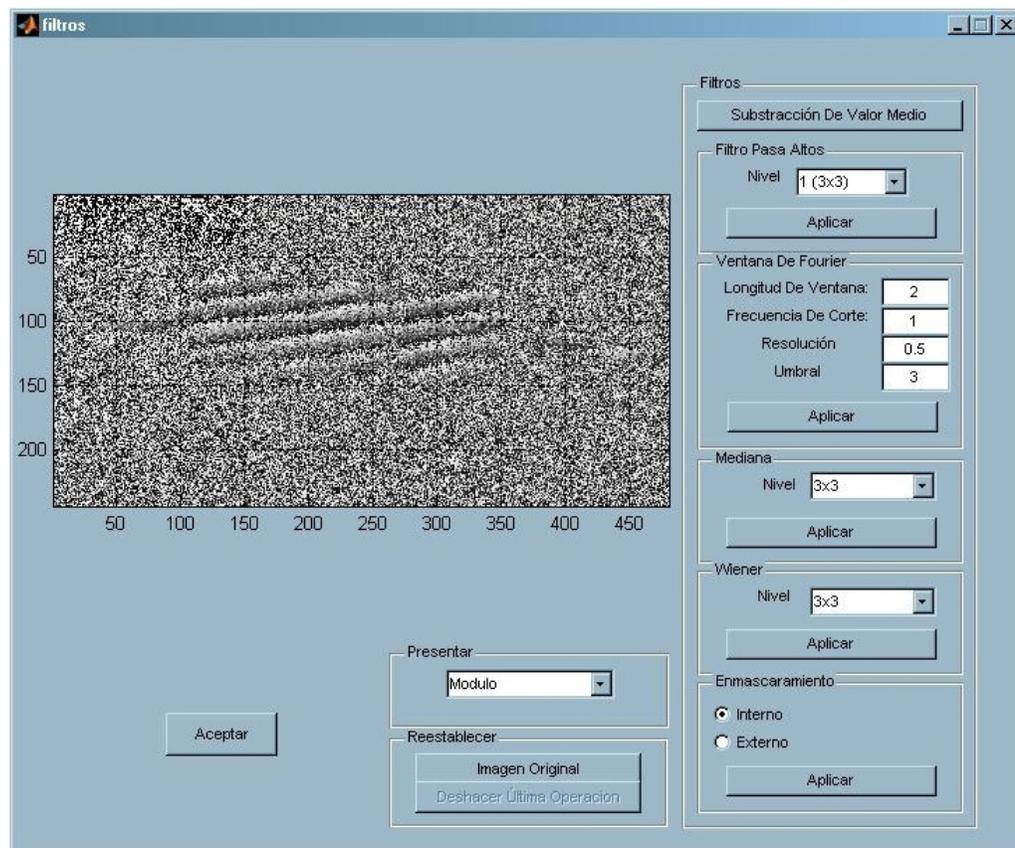


Figura 95. Ventana filtros.

En *Filtros* (figura 95), se ha realizado un compilado completo de todos los filtros desarrollados e implementados para mejora de imagen, al igual que otros que se considera de utilidad para eliminación ruido *Speckle*.

El tratamiento de una imagen inicia por la selección de la característica a la que se le desea realizar un filtraje (módulo, fase, intensidad, logaritmo de la intensidad), haciendo uso del menú *Presentar*.

Con la interfaz presentada en la figura 95, se realizan diferentes tipos de filtraje, entre los que se encuentran:

- *Substracción de Valor Medio*. Operación en la que se realiza una resta del valor medio de la intensidad de la imagen general, haciendo uso de la función *mean* en Matlab.
- *Filtro Pasa Altos*. Se basa en un algoritmo que reduce la intensidad de la componente DC al aplicar una substracción local de cada pixel a un holograma digital antes de realizar el proceso de reconstrucción numérica. Relacionado con el valor de ventaneo o vecindad determinado por el menú *Nivel*.
- *Ventana de Fourier*. Como un mecanismo de estudio más elevado para llevar a cabo adecuados procesos de filtraje inherentes al ruido, se recurre al filtraje mediante *Ventana De Fourier*, donde el proceso de convolución continua resulta poco eficiente en un principio de aplicación, consumiendo gran cantidad de memoria y aumentando el tiempo de procesamiento, por tal razón y haciendo mención a que los lóbulos laterales o armónicos de una función tratada en el espectro deben ser suprimidos, se interpreta un nivel de umbral que los elimine o reduzca, de este modo se consigue un filtraje adecuado reduciendo el consumo de memoria.

Para el caso en que se trabaja el método de la *Ventana de Fourier* para dos dimensiones se debe especificar un ventaneo simultáneo en las direcciones u y v (en el espectro de frecuencias), donde el proceso de convolución se encuentra implícito, siendo capaces de recuperar la señal tratada.

Determinando en esencia el procedimiento mencionado, es posible introducir como sistema de trabajo del filtro el diagrama mostrado en la figura 96.

Al hacer uso de este filtro, se recomienda seleccionar la longitud de ventana mayor e inversamente proporcional a la resolución, al igual que para mejores resultados escoger valores bajos en resolución.²⁸

²⁸ KEMAO, Qian. Windowed Fourier Transform Method For Demodulation Of Carrier Fringes.

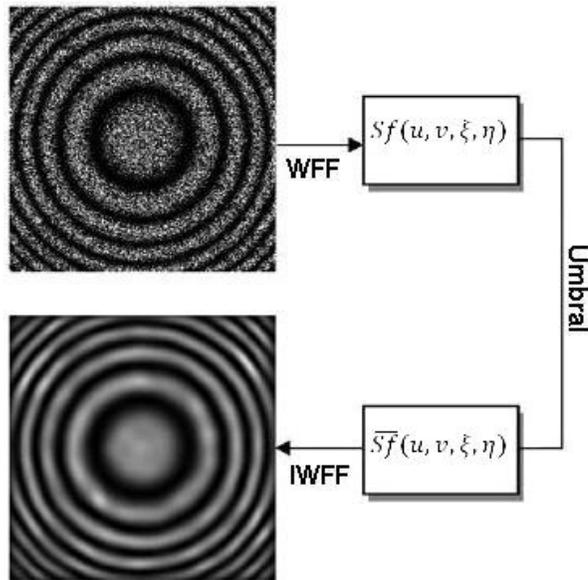


Figura 96. Esquema del filtro WFF (Window Fourier Filter – Filtro De Ventana De Fourier).

- *Mediana*. Implementa un filtro de *Mediana* como una operación no lineal, usando la función *medfilt2*, a menudo empleada en la reducción de ruido, especialmente generado a intensidad extrema (superior e inferior).
- *Wiener*. Filtro pasa bajos para imágenes con ruido aditivo constante, en Matlab *Wiener2*, que usa un método basado en estimaciones estadísticas de la variancia de cada pixel.
- *Enmascaramiento*. Haciendo uso de un recuadro, elimina una porción de la imagen seleccionada en las formas:
 - o Interno: Elimina la fracción que encierra el recuadro de selección.
 - o Externo: Suprime la parte externa del recuadro de selección.

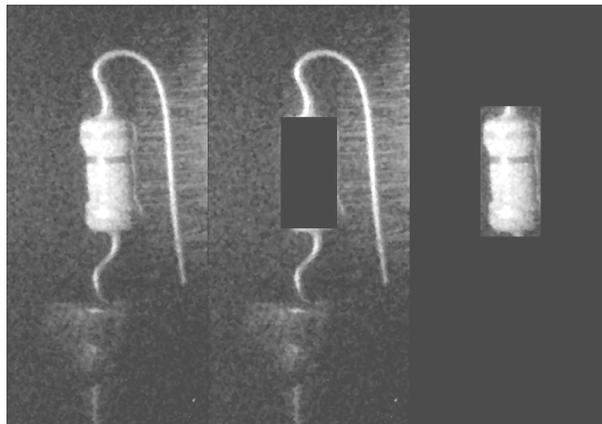


Figura 97. Enmascaramiento de una imagen (izquierda), interno (centro) y externo (derecha).

Finalmente, en el panel *Restablecer* de la ventana presentada en la figura 95, se dan opciones útiles en los casos en los que el usuario no quede satisfecho con las modificaciones realizadas.

- *Imagen Original*. Permite deshacer todos los cambios efectuados sobre una imagen restituyendo la imagen inicial de trabajo.
- *Deshacer Última Operación*. Botón que restaura la imagen previa a la operación efectuada, inhabilitándose una vez sea activado.

El botón denominado *Aceptar* modifica la imagen almacenada cambiándola por la imagen procesada, en donde no es posible deshacer los cambios realizados.

2.4.5 Reconstrucción numérica.

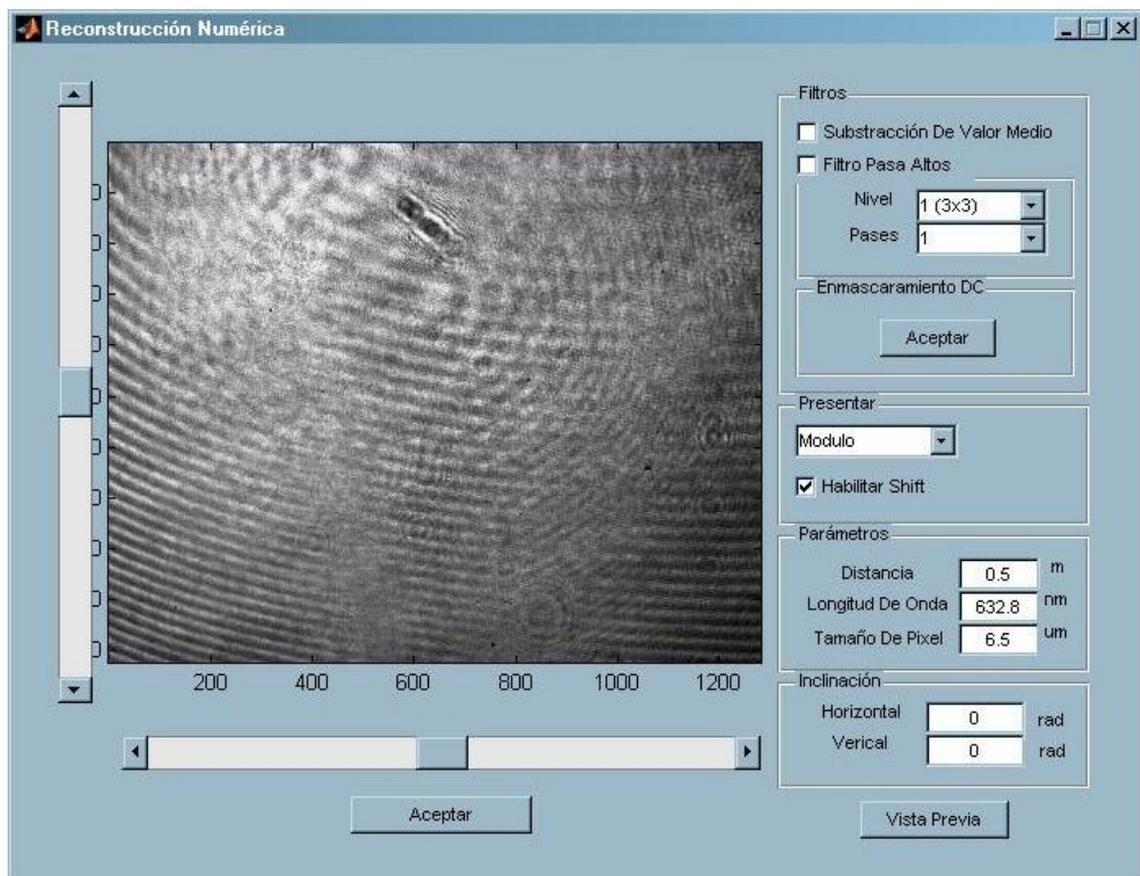


Figura 98. Reconstrucción numérica.

En holografía digital se hace uso de métodos numéricos de propagación que aproximan la onda con que se debe iluminar un holograma para obtener la reconstrucción del campo óptico original captado por el mismo, proceso que se define como *Reconstrucción Numérica*.

Para la ventana mostrada en la figura 98, denominada *Reconstrucción Numérica*, se hizo uso de la *Aproximación Por Fresnel*, con modificaciones menores que permiten un tratamiento de la imagen final.

- *Filtros*. Así como en la sección 5.4.4 se explicaron la serie de filtros integrados y desarrollados para diferentes efectos, en este segmento se integraron los filtros aptos para mejorar la calidad de hologramas reconstruidos, utilizando principalmente *Substracción De valor Medio* y *Filtro Pasa Altos*, descritos anteriormente.
- *Enmascaramiento DC*. Hace referencia a la implementación de un algoritmo de *Filtraje Espacial*, descrito en el diagrama de la figura 99. Para el mismo se utiliza un recuadro con el que manualmente se selecciona el área de la componente DC y se ejecuta *doble clic* para realizar el proceso.

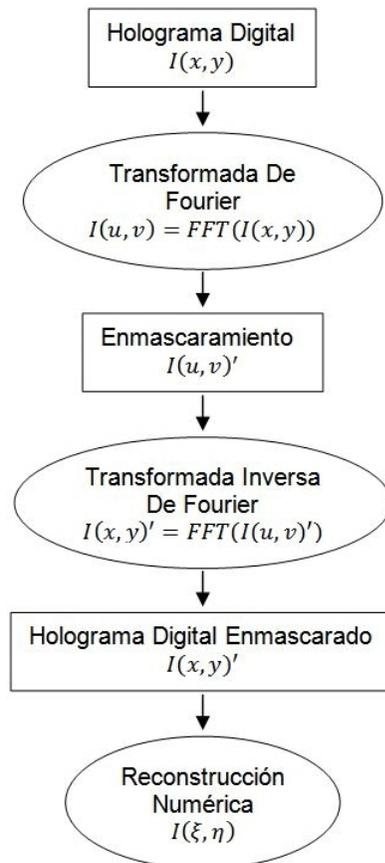


Figura 99. Proceso de filtraje espacial

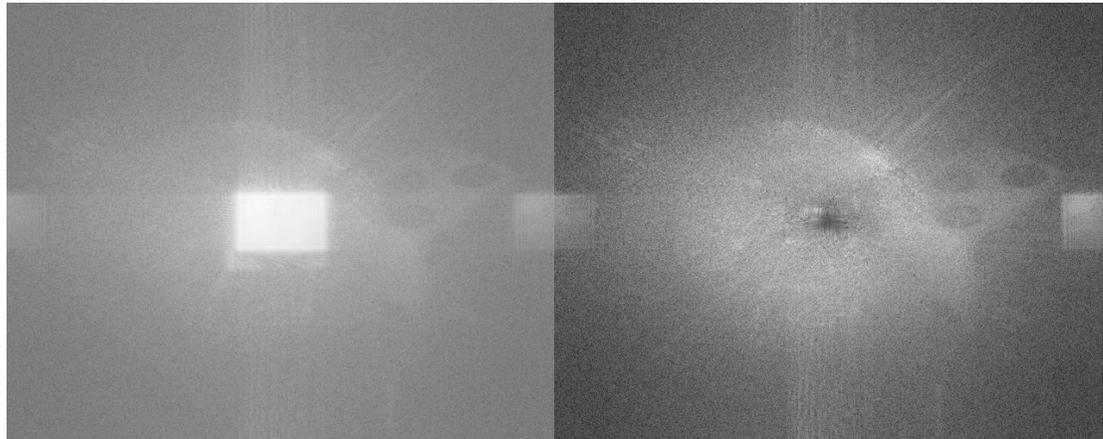


Figura 100. Filtraje espacial de un holograma, sin aplicación (izquierda) y filtrado (derecha).

- *Presentar*. Menú desplegable que deja observar las características de *Módulo*, *Fase*, *Intensidad* y *Logaritmo de Intensidad* del holograma reconstruido.
- *Habilitar Shift*. Como en 5.4.1 *Ventana Principal (HID)*, si este es habilitado, se permite una inversión de los cuadrantes del holograma reconstruido.
- *Parámetros*. Hace referencia a las características con que se llevó a cabo la captura del registro holográfico, necesarias junto con la información contenida en el holograma digital, para realizar la reconstrucción numérica del mismo. Los datos necesarios para la reconstrucción deben ser dados en las unidades especificadas, Distancia m –metros, Longitud de Onda nm –nanómetros y *Tamaño De Pixel* μm –micrómetros.
- *Inclinación*. Proceso vinculado a las barras de deslizamiento ubicadas en la parte lateral izquierda e inferior del espacio de visualización (figura 98), con el cual se consigue trasladar de forma horizontal y/o vertical una sección de la imagen correspondiente al holograma reconstruido, que en algunos casos se presenta como una imagen cortada en una sección y trasladada en forma paralela.

El proceso para realizar esta modificación de manera computacional se basa en una de las propiedades de la transformada de Fourier conocida como *Propiedad De Desplazamiento En El Tiempo*²⁹ y la función *circshift* de Matlab.

La inclinación de un holograma se puede realizar de dos formas. La primera consiste en conocer el grado de inclinación necesaria de forma Horizontal y Vertical entre $-\pi$ y π e introducirla en las cajas de texto, en la que al accionar el botón *Vista Previa* recopila todos los parámetros introducidos, verificando si

²⁹ HSU, Hwei p. “Análisis De Fourier”.

se requiere de alguno de los filtros previos a la reconstrucción realizando el debido proceso. En la segunda se hace necesario mover las barras de deslizamiento hasta encontrar un valor adecuado de inclinación para establecer la reconstrucción numérica tal como en el caso anterior.

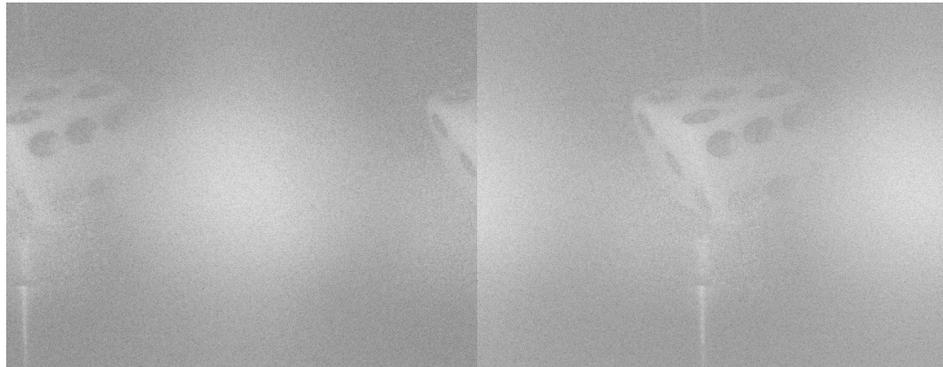


Figura 101. Holograma reconstruido antes (izquierda) y después de una inclinación horizontal (derecha).

Por último, se establece que al accionar el botón *Aceptar*, se realizará el proceso de reconstrucción numérica al holograma con las características y funciones implícitas, tal como filtros e inclinación, llevando el resultado final a la posición en la *Ventana Principal* que ocupaba en un principio el holograma digital.

2.4.6 Desenvolvimiento de fase.

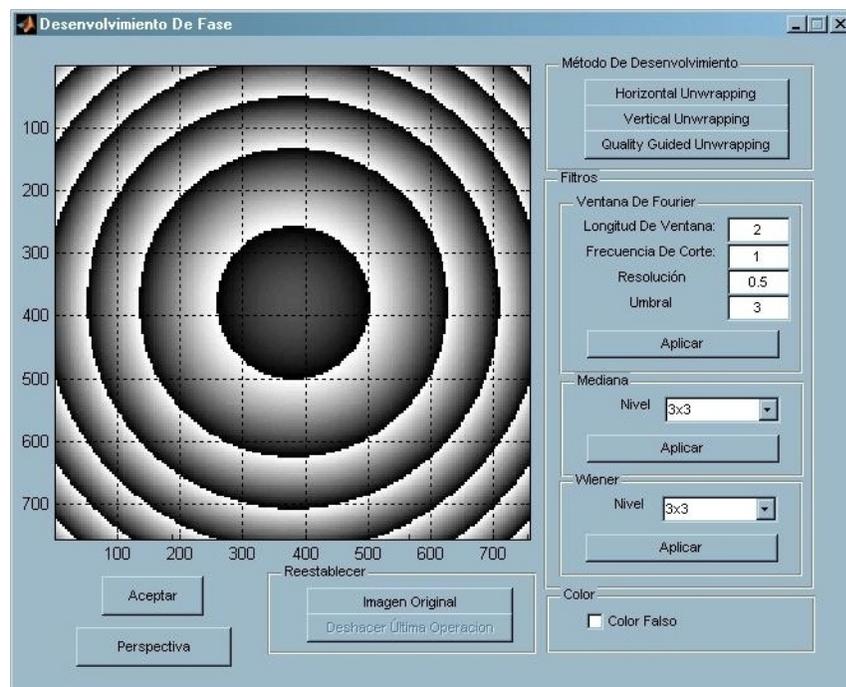


Figura 102. Desenvolvimiento de fase.

El desenvolvimiento trata de una función no lineal, con la que se busca una demodulación de señal limitada entre un rango superior e inferior de amplitud, comúnmente dirigida a la información contenida en la fase de algunas señales.

En la ventana denominada *Desenvolvimiento De Fase* (figura 102), se especifican algunos de los métodos de desenvolvimiento de fase útiles y accesibles para la implementación de esta sección, en la que se pretende hacer uso de la información contenida en la fase de los interferogramas, cuya diferencia mantiene una modulación entre $-\pi$ y π relacionada con la función \arctan , de la cual se hace uso para extraer la fase de una señal compleja.

De igual forma se implementan algunos filtros útiles para eliminación de ruido contenido en las mismas que puede deberse al del patrón de *moteado* o ruido *Speckle*, generado al hacer uso de una fuente de luz coherente.

Cabe señalar que al hacer uso de esta ventana, la imagen contenida se entenderá como modulada entre los niveles de $-\pi$ y π , siendo necesaria una normalización de los valores de intensidad.

- *Método De Desenvolvimiento*. Se presentan tres métodos que permiten obtener un desenvolvimiento o fase continua de una imagen, los cuales pueden ser empleados y cuyo resultado dependerá de la aplicación, complejidad y del nivel de ruido existente en la imagen a tratar.
 - o *Horizontal Unwrapping (Desenvolvimiento Horizontal)*. Método que aplica una dirección lineal de desenvolvimiento en forma horizontal, cuyo seguimiento se basa en tratar una longitud $1 \times M$ de pixeles, siendo M el valor máximo de la longitud horizontal de la imagen, realizando el mismo proceso para cada longitud.
 - o *Vertical Unwrapping (Desenvolvimiento Vertical)*. Sigue el principio descrito anteriormente, con la modificación que se realiza siguiendo una longitud $1 \times N$, siendo N el valor máximo de la longitud vertical de la imagen.
 - o *Quality Guided Unwrapping (Desenvolvimiento Guiado Por Calidad)*. Trata de un método guiado dependiente de una trayectoria determinada por un mapa de calidad realizando una compensación de características distintivas de pixel.

En los métodos anteriores se hizo uso de la función *unwrap* de Matlab.

Tras aplicar alguno de los métodos expuestos, se realiza el proceso de desenvolvimiento seleccionado, cuyo resultado se expondrá en la parte correspondiente a visualización.

- En los paneles *Ventana De Fourier*, *Mediana* y *Wiener* se presenta una integración de los filtros del mismo nombre, presentados en 5.4.4 *Filtros*, usados en la remoción de ruido.
- *Color Falso*. Se aprovecha la propiedad de Matlab *colormap*, para especificar una escala de color que vaya desde una tonalidad que indique profundidad hasta otra que se relacione con altura. En la mayoría de las gráficas presentes en este trabajo se hace uso de una escala de color en grises (*gray*), siendo el negro el de menor nivel llegando al blanco, pero al activar la casilla *Color Falso* se toman las tonalidades desde el azul, pasando por los colores cyan, amarillo y naranja hasta llegar al rojo, cuyo mapa de colores es denominado *jet*.

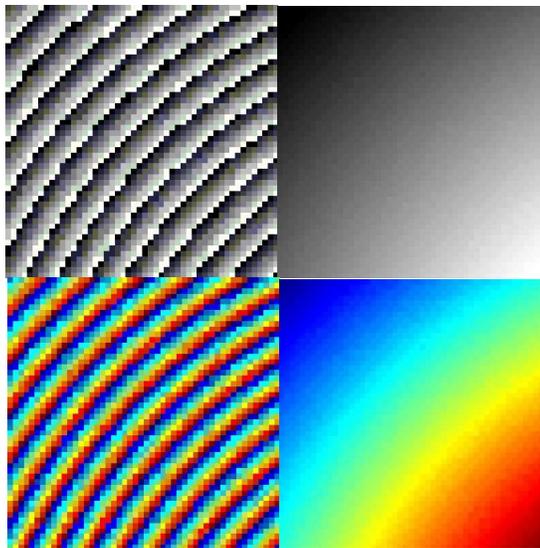


Figura 103. Imagen observada para un mapa de fases envuelto (arriba) y desenvuelto (abajo), sin color falso (izquierda) y con color falso (derecha).

- En el campo *Restablecer*, se permite deshacer los cambios realizados, de forma similar al de la sección 5.4.4 *Filtros*, con las opciones:
 - o *Imagen Original*. Deshacer todos los cambios efectuados sobre una imagen restituyendo la imagen inicial de trabajo.
 - o *Deshacer Última Operación*. Restaura la imagen previa a la operación efectuada, inhabilitándose una vez sea activado.
- *Perspectiva*. Al activar este botón, se presenta una nueva ventana denominada *Perspectiva* (figura 104), en la que se puede observar en un aspecto tridimensional la equivalencia de la imagen seleccionada, mediante la función *surf*, cuya tonalidad de color depende si se ha seleccionado o no la casilla *Color Falso*.

Además de la imagen en una perspectiva tridimensional, se ha adicionado una barra que indica la escala de colores usada, que se presenta mediante la función *colorbar*.

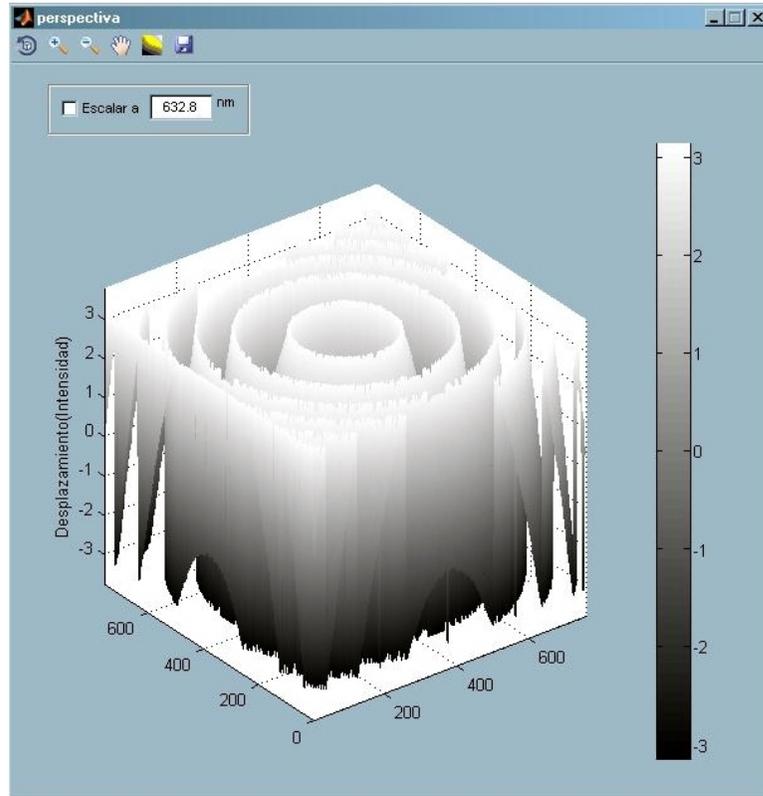


Figura 104. Ventana perspectiva.

La misma ventana goza de diferentes funcionalidades.

- *Rotar*. Herramienta con la que se puede realizar un giro alrededor de la perspectiva, de esta manera es posible observar en diferentes ángulos la imagen.
- *Zoom In*. Herramienta de aumento o acercamiento de imagen.
- *Zoom Out*. De forma contraria a la acción de la herramienta anterior, se permite realizar un alejamiento de la imagen.
- *Pan*. Herramienta con la que se realiza un encajonamiento de la imagen en perspectiva, de modo que se manipule la posición.
- *Habilitar Iluminación*. Presenta la perspectiva con un nivel de iluminación que realzan las características de la superficie.

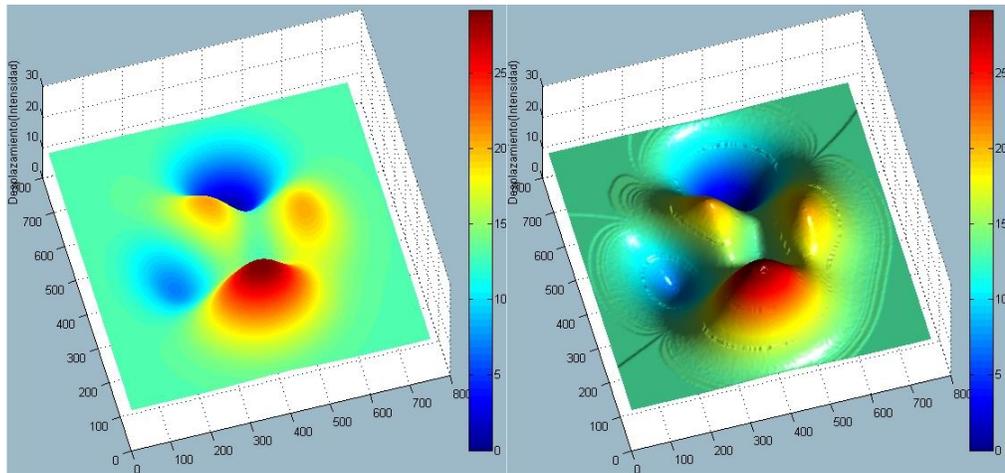


Figura 105. Función Peaks, sin iluminación (izquierda) y con iluminación (derecha).

- *Guardar*. Crea un cuadro de dialogo en el que se permite guardar la imagen visualizada en los formatos jpg, bmp y png.
- Finalmente, se puede escalar la dimensión asociada a la imagen con base a la ecuación 81, mediante la opción *Escalar a*, en donde está implícita la magnitud de la imagen desenvuelta y el valor de la longitud de onda usada en la captura de registros holográficos analizando el nivel de deformación sufrida sobre la superficie, necesario para concretar un proceso de *Interferometría Holográfica De Doble Exposición*.

2.4.7 Perfil de imagen.

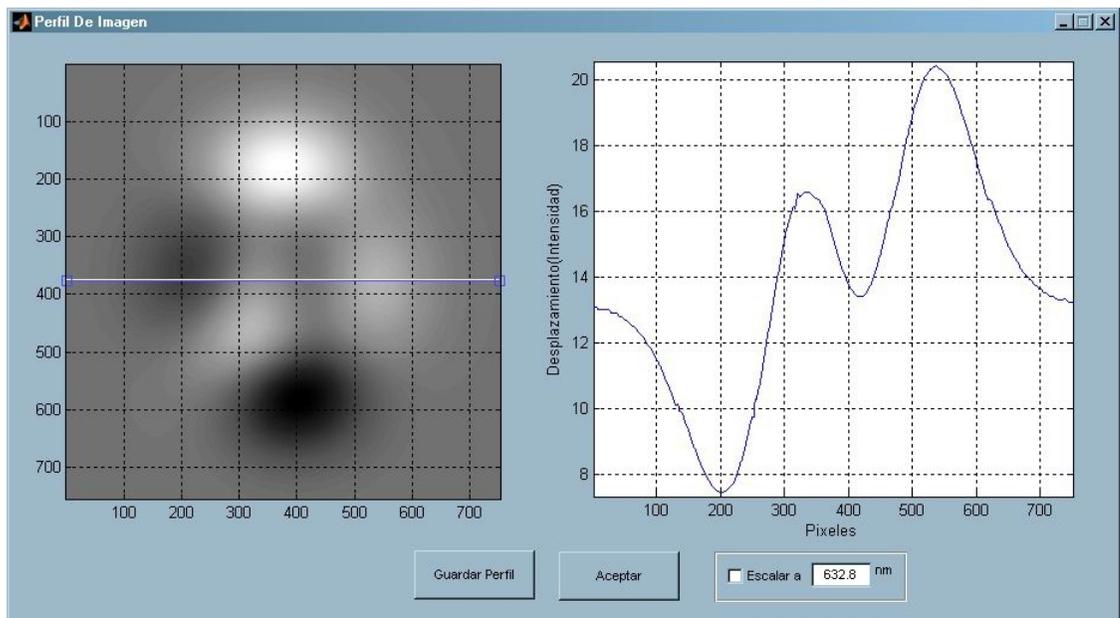


Figura 106. Perfil de imagen.

Perfil De Imagen trata de una ventana de análisis, en la que se evalúa el resultado del proceso de interferometría digital de doble exposición, tras haber realizado el debido seguimiento a las etapas señaladas previamente como ventanas de procesamiento.

En la figura 106, se observa en una forma básica el mecanismo de análisis de la misma, en donde como principal herramienta de trabajo se cuenta con un segmento de línea, creada con ayuda de la función *imline*, la misma se ubica sobre la gráfica a analizar situada a la izquierda de la ventana, con el que se define el perfil que se desea observar, dando lugar a una representación en una dimensión, que equivale a las variaciones en intensidad sufridas por el sector seleccionado, mediante el uso de la función *improfile*.

El proceso interno trabaja en un ciclo continuo, permitiendo que al desplazar el segmento de línea se determine una nueva posición y de forma consecuente un nuevo perfil.

Como una de las utilidades que posee esta ventana se menciona la adición de un menú emergente en la gráfica que presenta el perfil de imagen, el cual se despliega al hacer *clic derecho*, con la que se permite realizar un engrosamiento de la línea que presenta el perfil, al igual que una modificación en el color de la misma, entre azul (valor por defecto), rojo, verde, cyan, magenta, amarillo y negro (figura 107).



Figura 107. Menú emergente en la ventana perfil de imagen.

Finalmente, se señala que en esta sección se agregaron de forma similar a la relacionada con la ventana *Perspectiva*, la utilidad de escalamiento con la activación de *Escalar a*, y de guardar la imagen correspondiente al perfil, mediante el uso del botón *Guardar Perfil*.

2.4.8 Holografía digital.

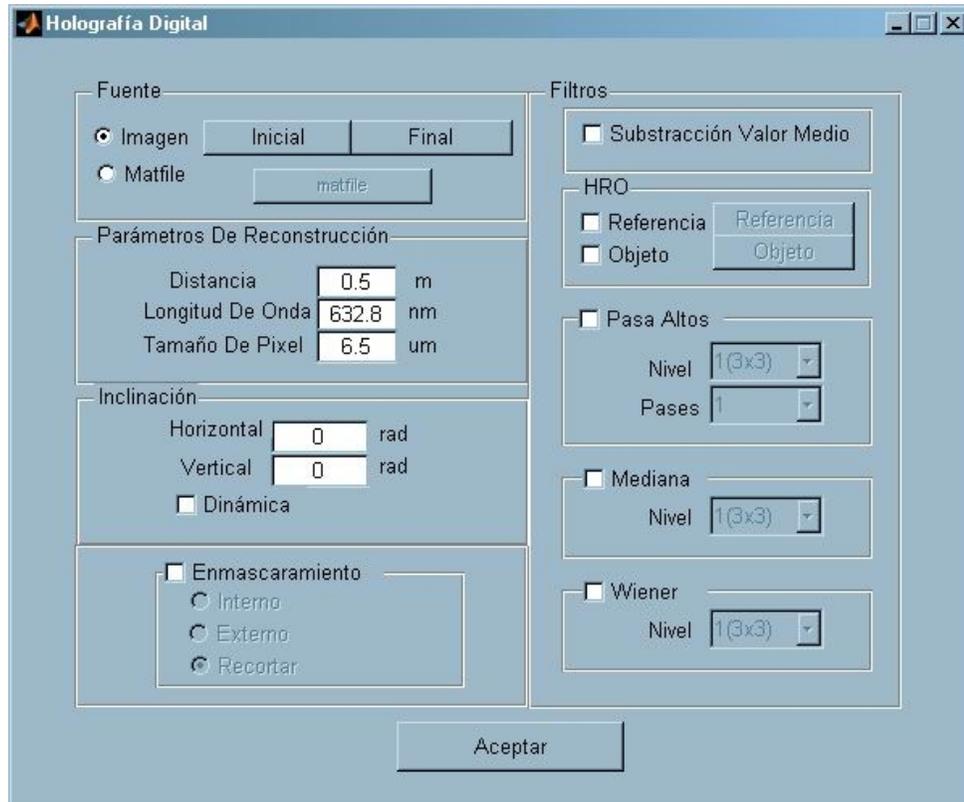


Figura 108. Interfaz para holografía digital.

Uno de los análisis o procesamientos completos que se implementaron es la reconstrucción numérica de hologramas decorrelacionados, de manera que se desarrollan todos los procesos implícitos, implementando la interfaz de usuario mostrada en la figura 108, que permite realizar este proceso con diferentes particularidades en relación a manipulación de hologramas y filtros usados, como los ya explicados en situaciones previas.

En la figura 110, se presenta en un diagrama de flujo el proceso que conlleva de forma interna la reconstrucción numérica de hologramas decorrelacionados, cuyo periodo de tratamiento se presenta mediante una barra de estado que indica en porcentaje la cantidad faltante y el progreso (figura 109).



Figura 109. Barra de estado.

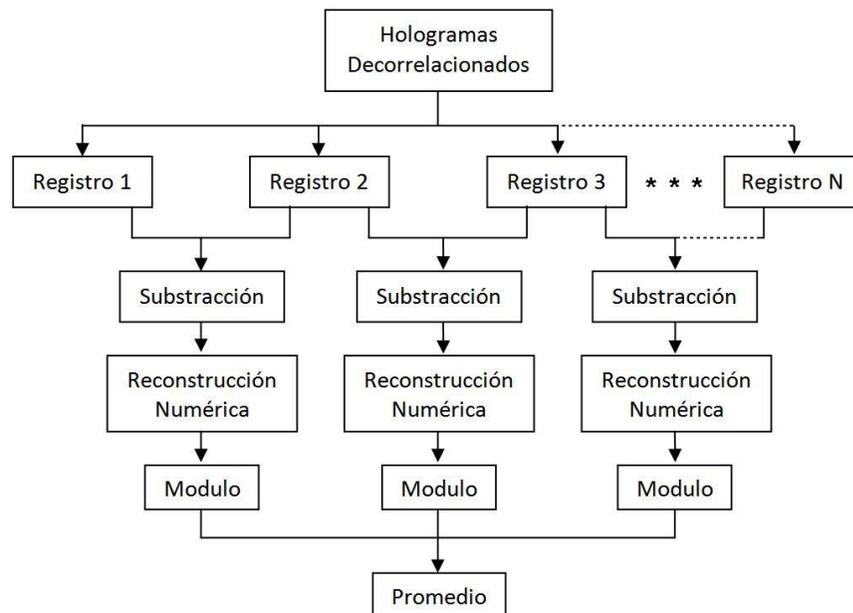


Figura 110. Procesamiento de hologramas decorrelacionados.

Una descripción de operatividad haciendo uso de hologramas decorrelacionados con base a la ventana que se presenta en la figura 108, y el proceso que se sigue en la figura 110, se describe a continuación.

Seleccionar el formato de archivo con el que se almacenaron los hologramas digitales. Los archivos pueden ser de imagen con formato JPG, BMP y PNG o archivos con el formato propio de Matlab con extensión MAT, teniendo en cuenta las características que se presentan en la figura 85. Para ello se debe hacer uso del panel *Fuente*, realizando una selección entre *Imagen* y *Matfile*, los cuales habilitan los botones propios de cada opción.

Al seleccionar la opción *Imagen*, se requiere algunas descripciones prudentes:

- Especificar los archivos inicial y final, con los cuales se realizará el proceso de holografía digital haciendo uso de hologramas decorrelacionados.
- Todos los archivos deben contener el mismo nombre acompañado de una numeración, es decir una notación como $h1, h2, h3, \dots, hn$.
- El valor en numeración del archivo inicial debe ser menor al del final.
- Todos los archivos entre los valores inicial y final deben existir, es decir, no se produzca una nominación como $h1, h2, h3, h5, h6, h7$, en donde es claro que el archivo $h4$ no existe.
- De igual forma se hace necesario que los archivos correspondientes tengan la misma extensión y ubicación.

El proceso continua, se procesa y termina ejecutando el botón aceptar, con el que se verifica si se ha señalado algunas de las opciones en relación a filtros y reconstrucción numérica.

Los filtros incorporados en esta sección son algunos de los previamente expuestos, como son *Substracción De Valor medio*, *Pasa Altos*, *Mediana*, *HRO* y *Enmascaramiento*.

El filtro denominado *HRO*, tiene la particularidad de permitir una selección de los archivos que contienen los haces referencia y objeto de manera individual, tras habilitarlos y así hacer partícipe la substracción de sus valores de intensidad al registro holográfico.

En el caso del filtro denominado *Enmascaramiento*, se hace referencia a un *Filtraje Espacial*, siguiendo el proceso presentado en la figura 99, con la diferencia que se puede además de suprimir lo seleccionado mediante *Interno*, es posible enmascarar la parte externa a la selección realizada mediante *Externo*, o recortar esta sección con *Recortar*.

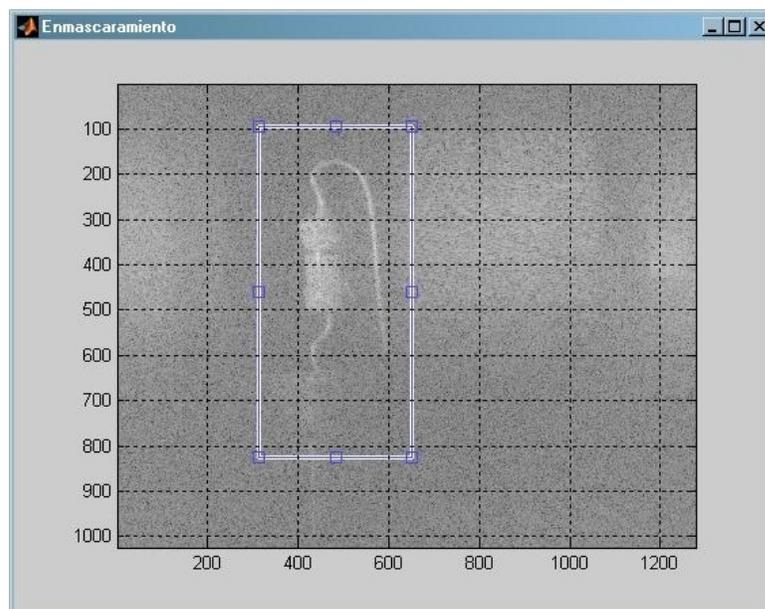


Figura 111. Ventana de enmascaramiento.

En reconstrucción numérica, se incorporan la introducción de los parámetros de reconstrucción e inclinación.

El proceso de inclinación se realiza mediante la ventana denominada *Inclinación* (figura 112) que permite, si se desconoce los valores de desplazamiento, efectuarla en forma dinámica, realizando esta modificación mediante barras de desplazamiento tanto horizontal como vertical, cuya ventana se presenta al activar la casilla *Dinámica* en el panel *Inclinación*.

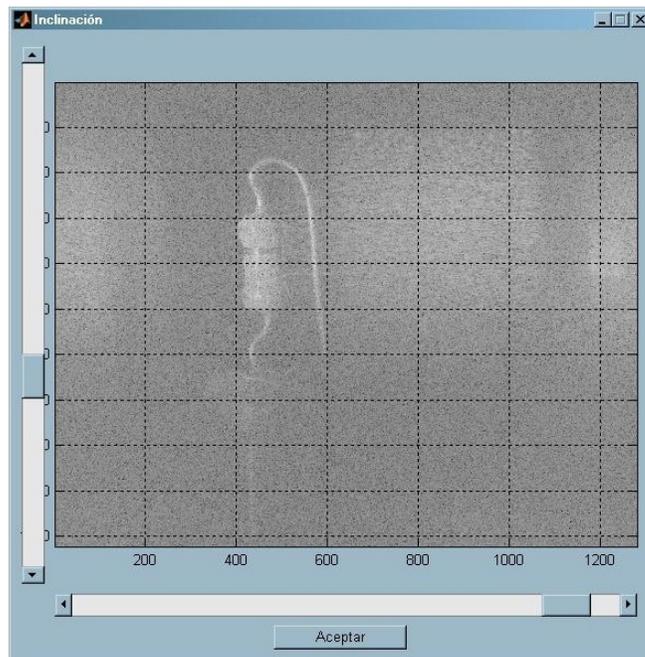


Figura 112. Ventana de inclinación dinámica.

2.4.9 Interferometría digital.

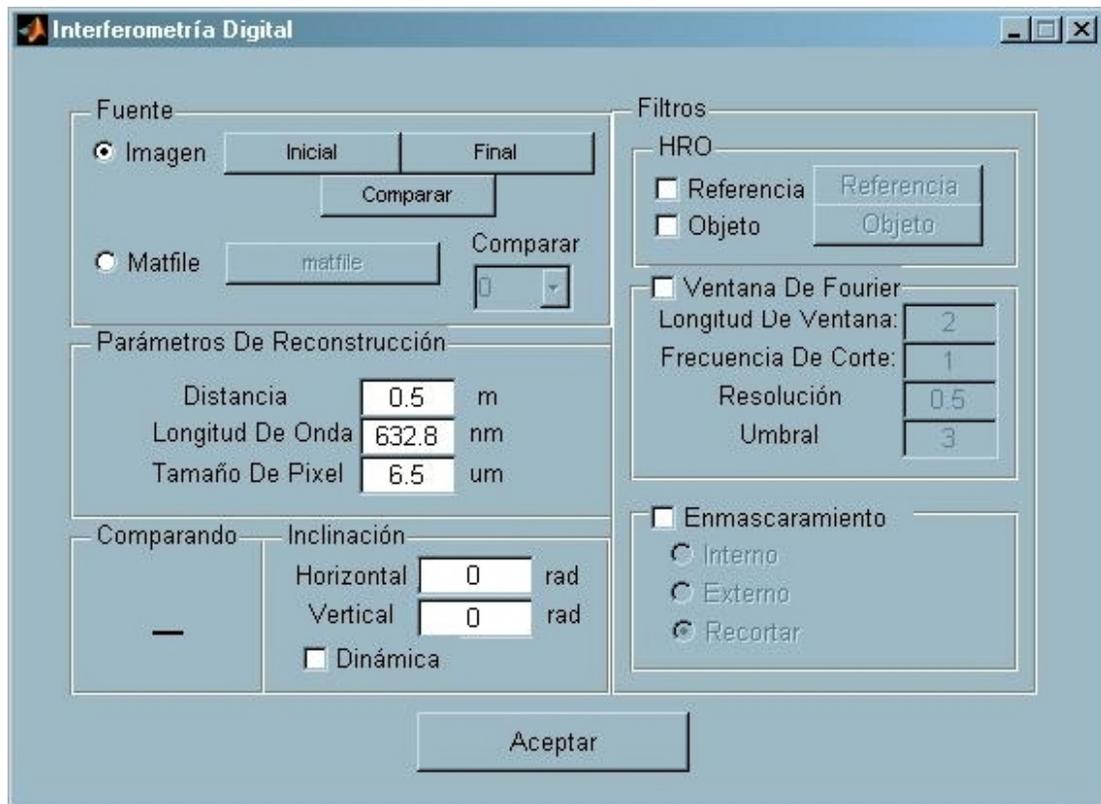


Figura 113. Interfaz para holografía digital.

Se presenta una interfaz gráfica con la cual se apoya el proceso de *Interferometría Holográfica Digital*, realizando una diferencia de amplitud y fase de los hologramas reconstruidos de un objeto, capturados bajo diferentes condiciones físicas, cuyos cambios representados por franjas sobre el objeto implican la dirección de desplazamiento reflejando el nivel de magnitud del mismo, para lo cual se sigue el proceso de la figura 87, hasta el estado previo al desenvolvimiento de fase.

En la figura 113, se observa el aspecto de la ventana, en donde los filtros *HRO*, *Enmascaramiento* y *Ventana De Fourier* han sido incluidos.

Al activar la ejecución del filtro por *Ventana De Fourier*, cabe señalar que solo es dirigido a las imágenes producto de la diferencia de fases, denominados Mapas De Fase.

En el proceso se siguen básicamente los mismos argumentos que en el desarrollo previamente expuesto, con la diferencia del procesamiento interno y que para este caso se selecciona tanto en la opción *Imagen* como en *Matfile* un registro que sirve como referencia sobre el cual comparar los cambios que sufren los registros seleccionados.

En el caso de *Imagen*, existe un botón denominado Comparar, el cual carga el archivo con el cual se desea realizar una comparación. En los archivos denominados *Matfile* se presenta un menú desplegable nombrado *Comparar*, que enumera los archivos internos, permitiendo seleccionar con base en cual se realizará una comparación.

Como método para identificar el progreso de la comparación se ha establecido un espacio que indica las comparaciones que se están realizando, de la forma *referencia_estado*, en donde referencia menciona el archivo que ha sido seleccionado como referencia y estado el archivo con el cual se encuentra comparando, del mismo modo se establecerá la numeración que sigue al nombre del archivo de almacenamiento.

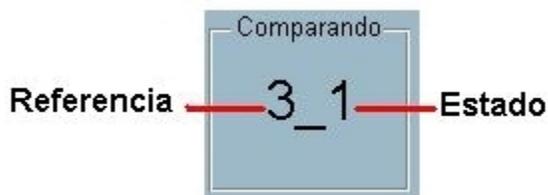


Figura 114. Relación *referencia_estado* en la interfaz de interferometría digital.

Por último se menciona que tras activar el botón aceptar aparecerán tres cuadros de diálogo. En el primero se da opción a guardar y seleccionar el nombre y ubicación que tendrán los interferogramas de las reconstrucciones numéricas

realizadas, en el segundo de los mapas de fase y en el tercero guardar los mismos en un archivo con extensión *.mat.

Requerimientos.

Finalmente, se expone que el software en el que se basó el desarrollo fue en Matlab R2009a versión 7.8.0.347.

El equipo de cómputo sobre el cual fue desarrollado posee las siguientes características básicas y de operación satisfactoria:

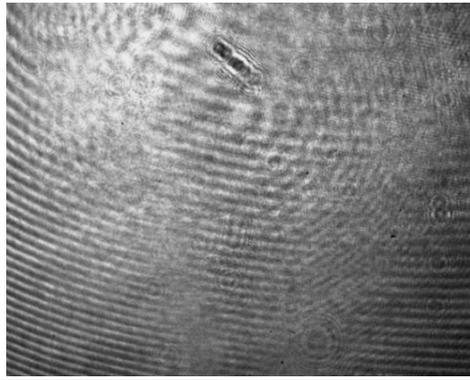
- Sistema operativo: Microsoft Windows XP Service Pack 2
- Equipo Intel® Pentium® 4 CPU 3.00GHz
- 512MB de RAM

2.5 VERIFICAR LOS DATOS OBTENIDOS.

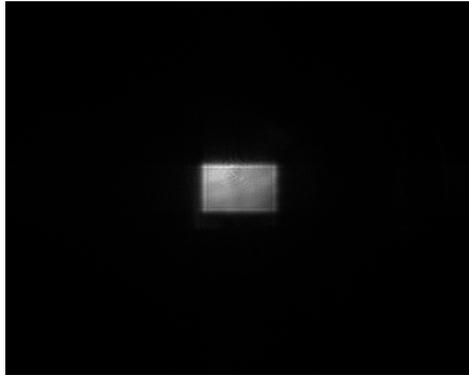
Si bien se ha mencionado en un principio, el trabajo está dirigido a determinar la magnitud de desplazamiento de microdeformaciones mediante metrología óptica haciendo uso de la técnica de *Interferometría Holográfica Digital De Doble Exposición*, es satisfactorio presentar que en la búsqueda de la relación *holograma-medición*, se ha alcanzado un buen desarrollo en el área de la *Holografía* de tipo digital, obteniendo hologramas de algunos elementos con un buen margen de calidad, tras ser tratados y capturados con el software previamente expuesto.

La técnica holográfica, además de ser visualmente satisfactoria, permite disponer de los elementos a registrar de forma previa a un análisis, como método para encontrar el espacio que puede ocupar en el holograma después de la reconstrucción, ya que la mayoría de métodos de filtraje dirigidos a hologramas digitales hacen referencia a una disposición *Out Plane* o fuera del plano, con la que se evita que el objeto y el componente de orden cero de difracción se solapen entre sí.

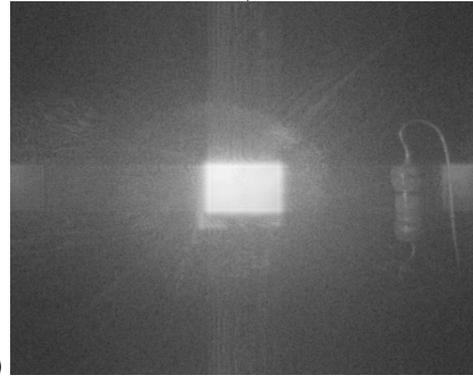
A continuación se presentan hologramas digitales procesados con el software.



a)



b)



c)

Figura 115. a) Holograma digital y su reconstrucción numérica b) Módulo, c) Log (Intensidad).

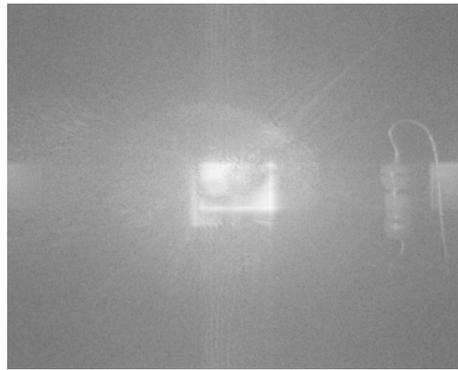
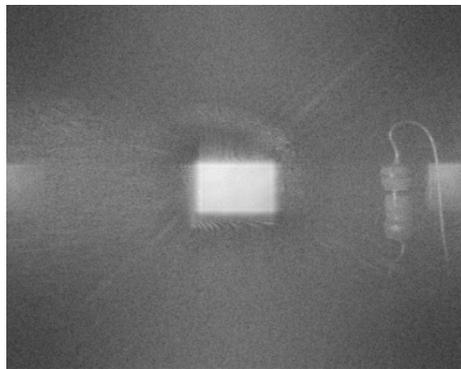
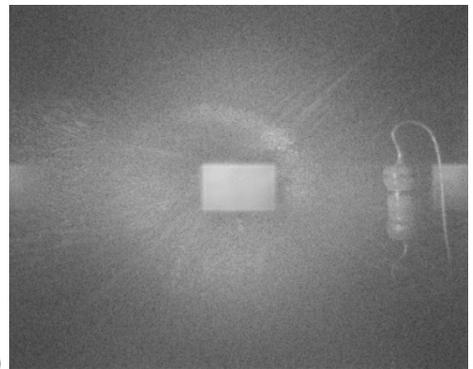


Figura 116. Reconstrucción numérica con substracción de componente DC



a)



b)

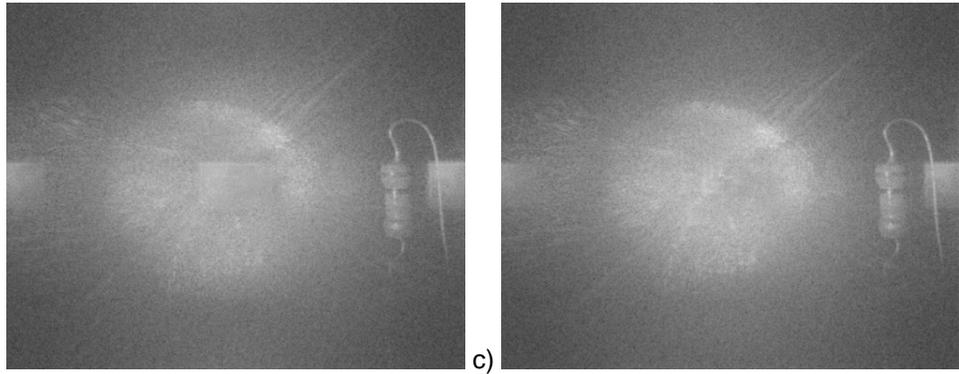


Figura 117. Reconstrucción numérica con filtro pasa altos a) 3×3 , b) 5×5 , c) 7×7 , d) 9×9

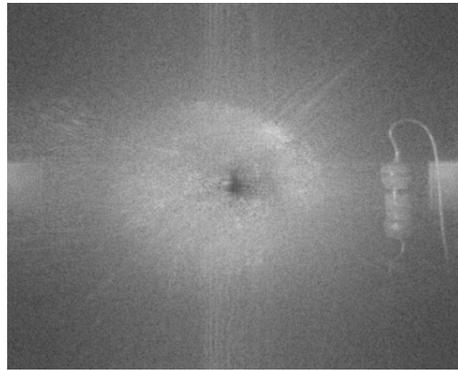
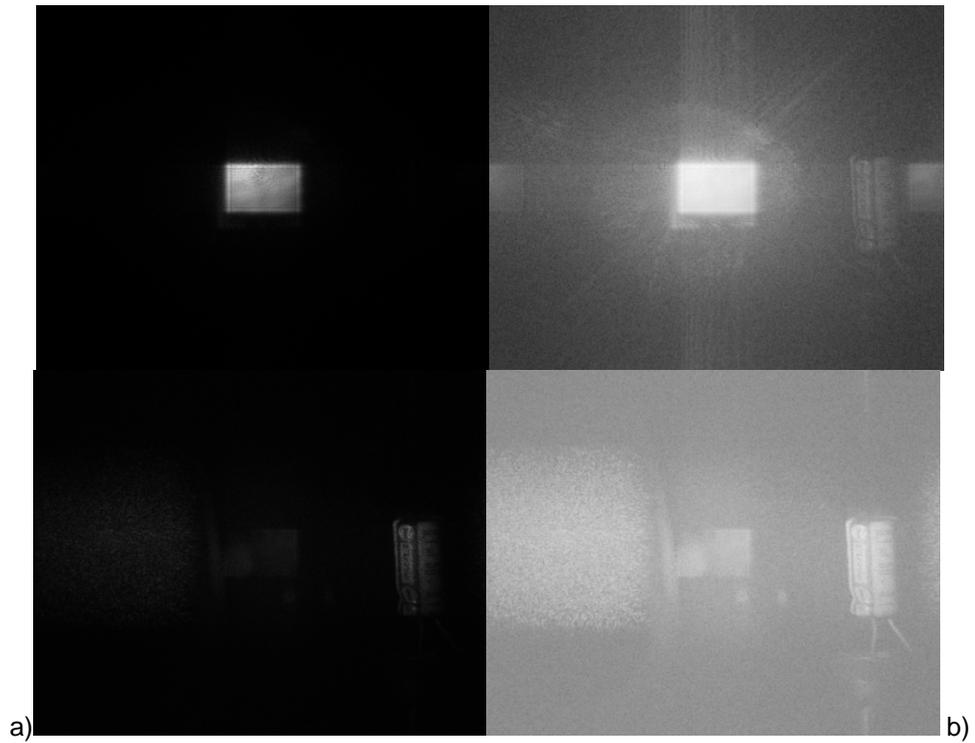


Figura 118. Reconstrucción numérica con filtro espacial



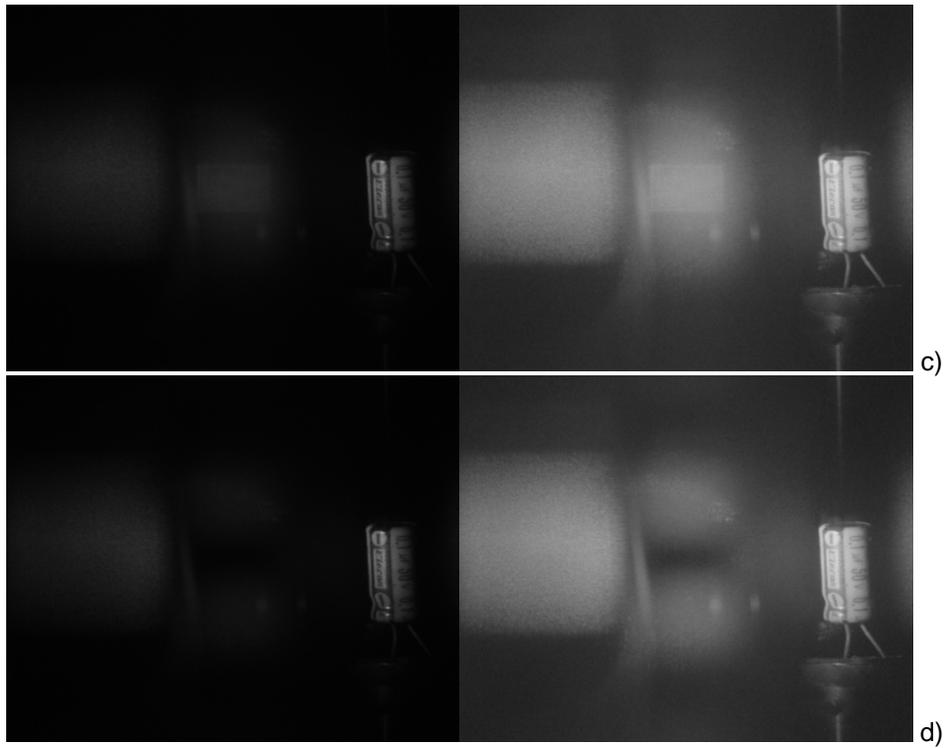
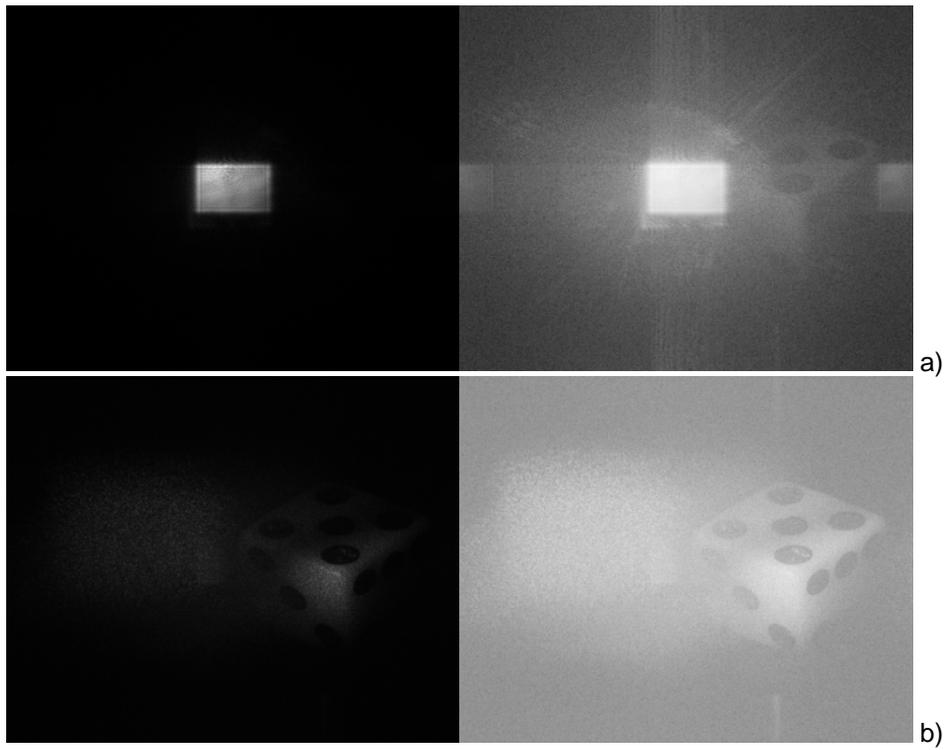


Figura 119. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 2 registros, c) 30 registros y d) 30 registros, substracción de componente DC y filtro pasa altos de 7×7 .



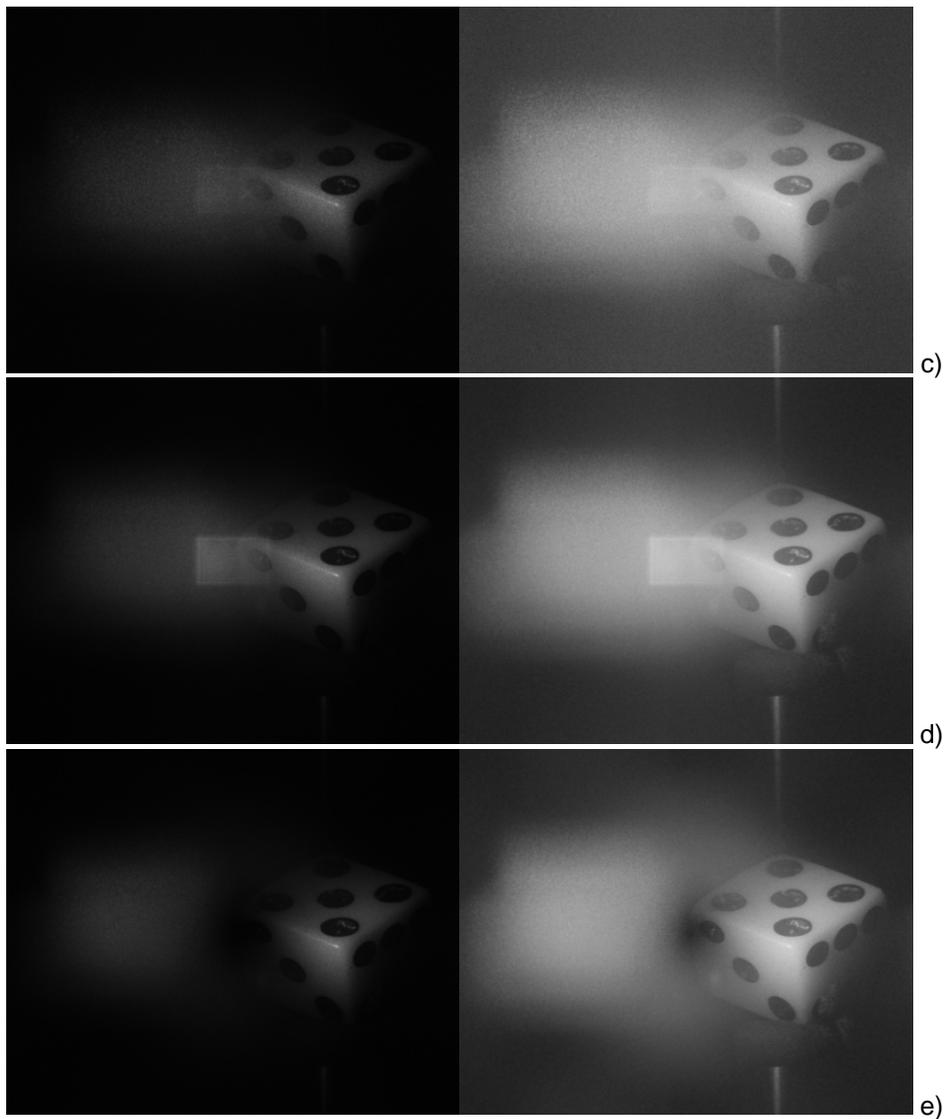
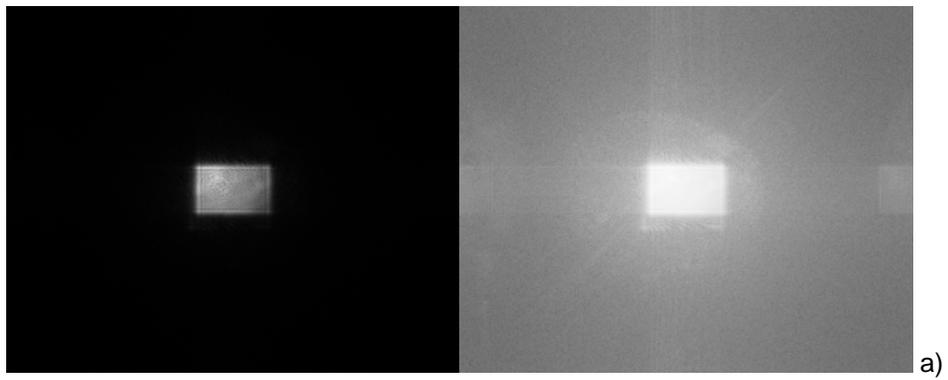


Figura 120. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 2 registros, c) 10 registros, d) 30 registros y e) 30 registros con substracción de componente DC y filtro pasa altos de 5×5 .



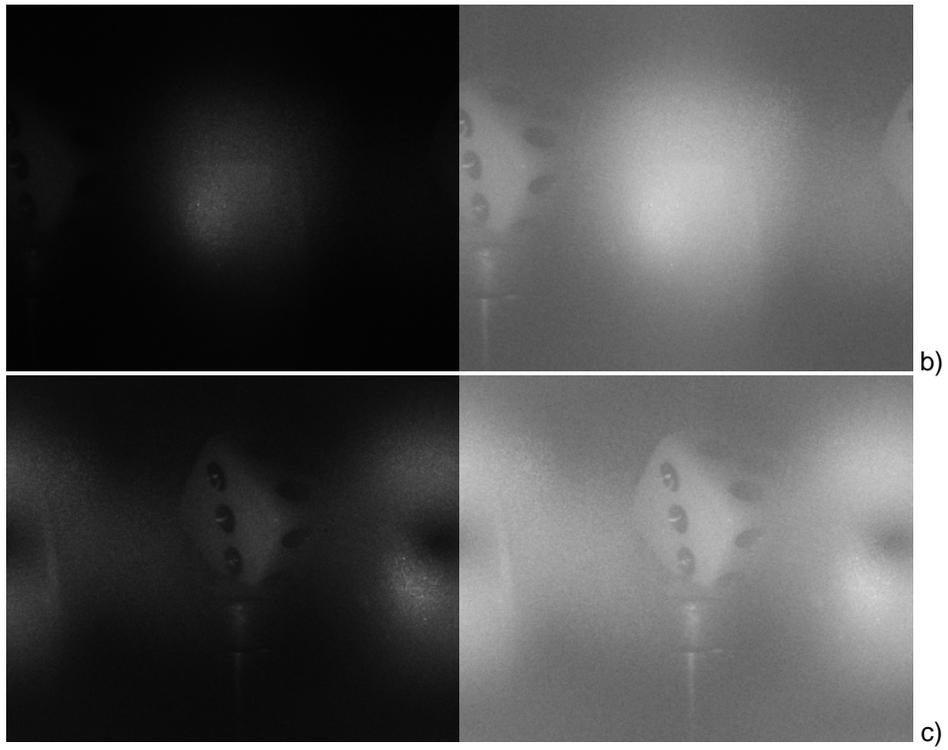
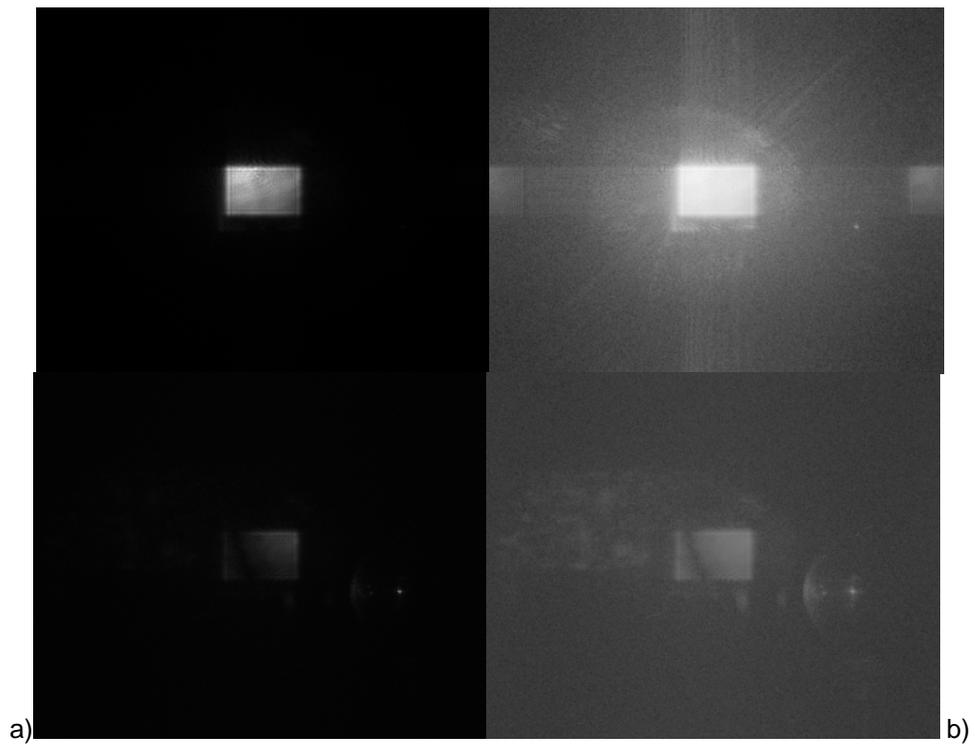


Figura 121. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 5 registros y c) 5 registros con substracción de componente DC, filtro pasa altos de 5×5 e inclinación.



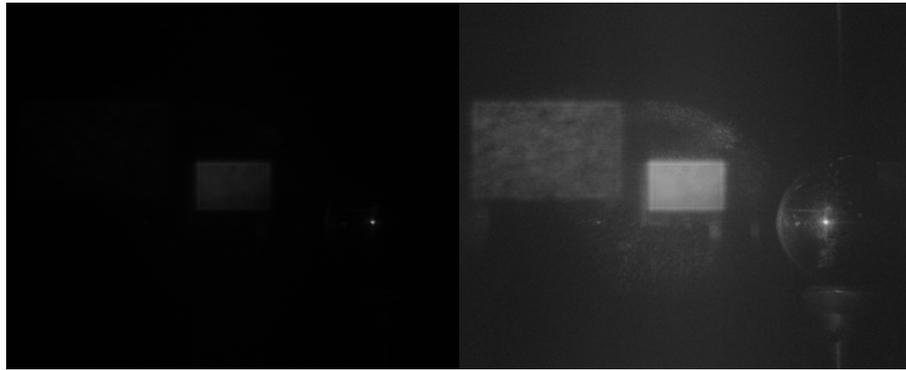


Figura 122. Holograma reconstruido con a) un registro, b) 2 registros Y c) 30 registros.

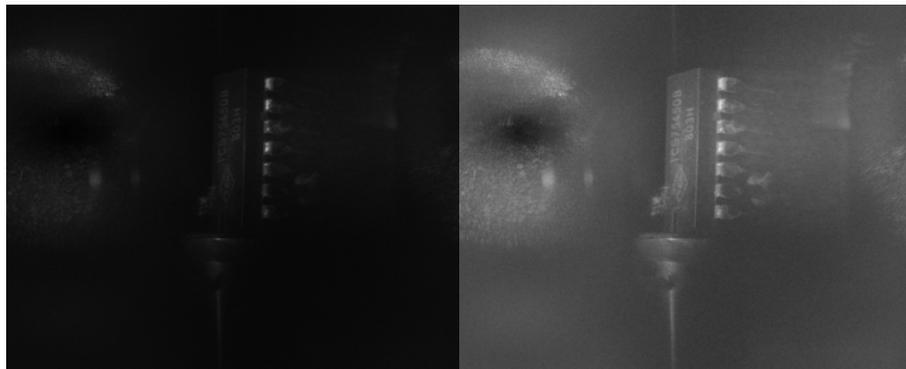
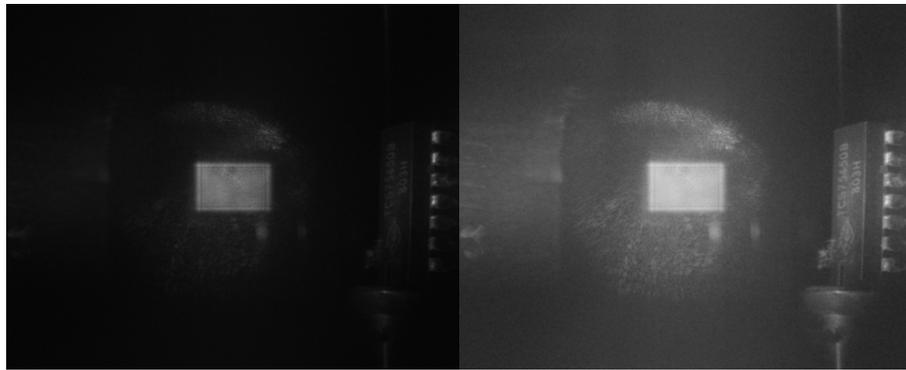
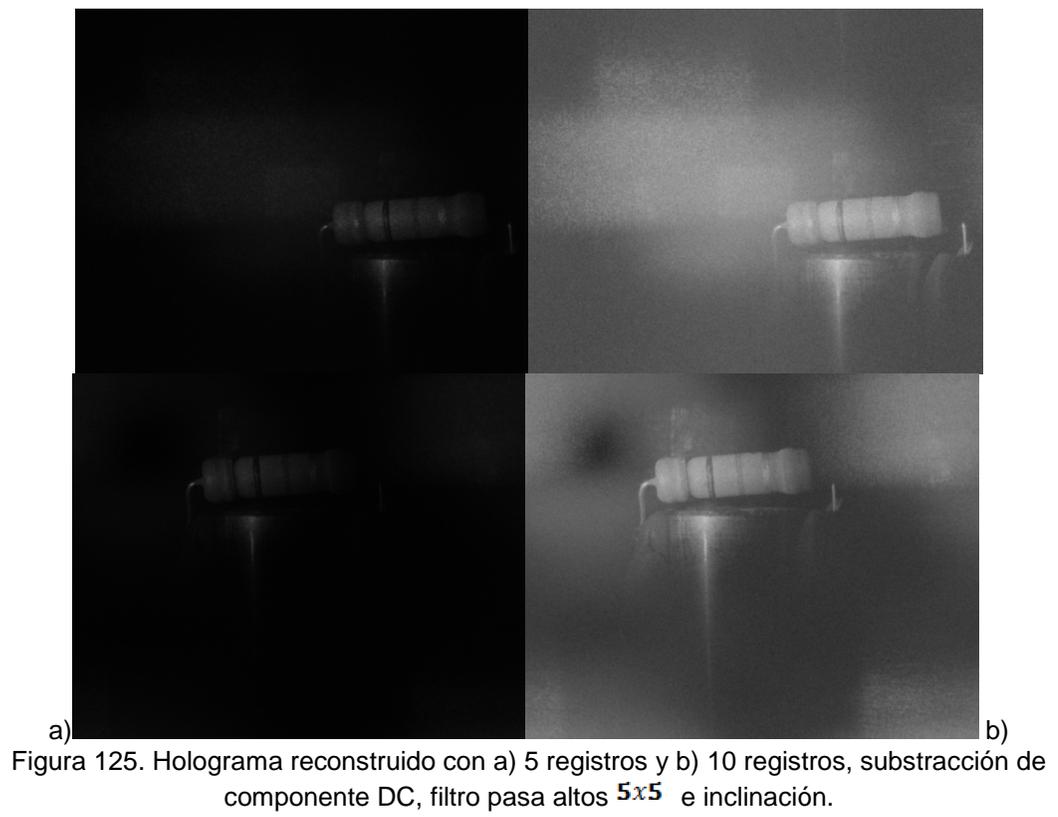
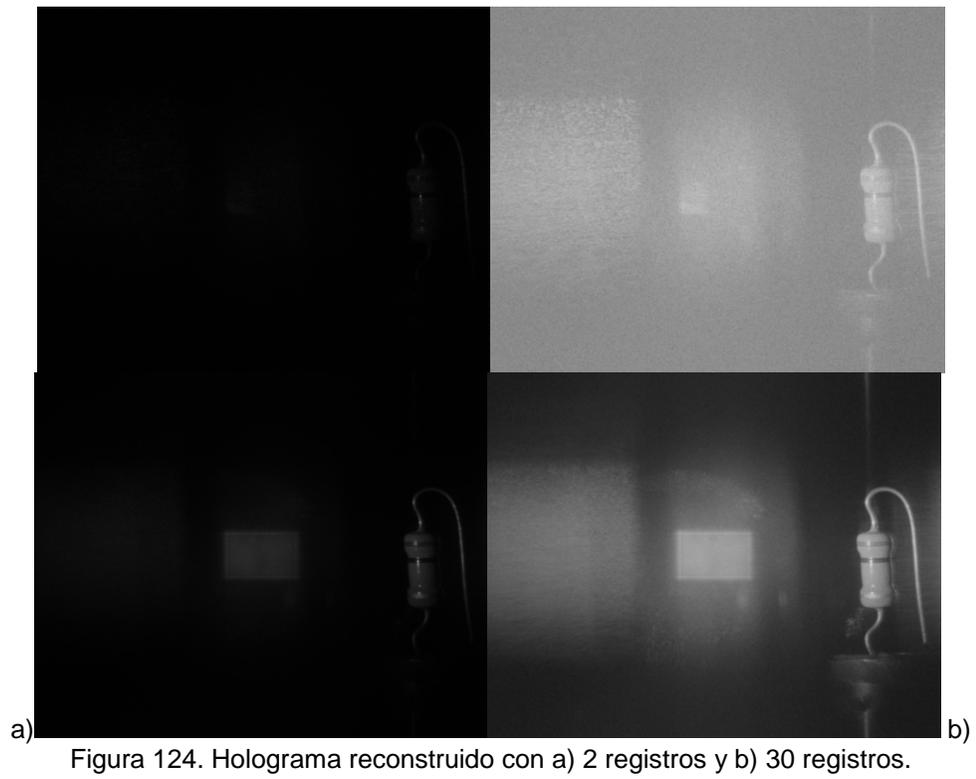


Figura 123. Holograma reconstruido con a) 30 registros Y b) 30 registros, filtro pasa altos 7×7 , substracción de componente DC e inclinación.



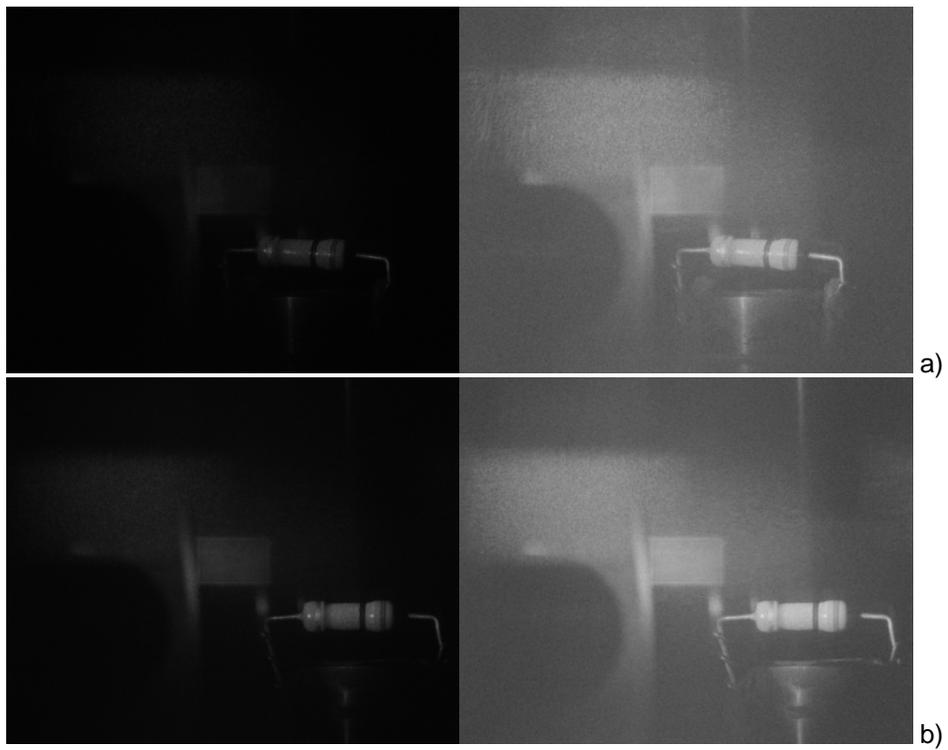
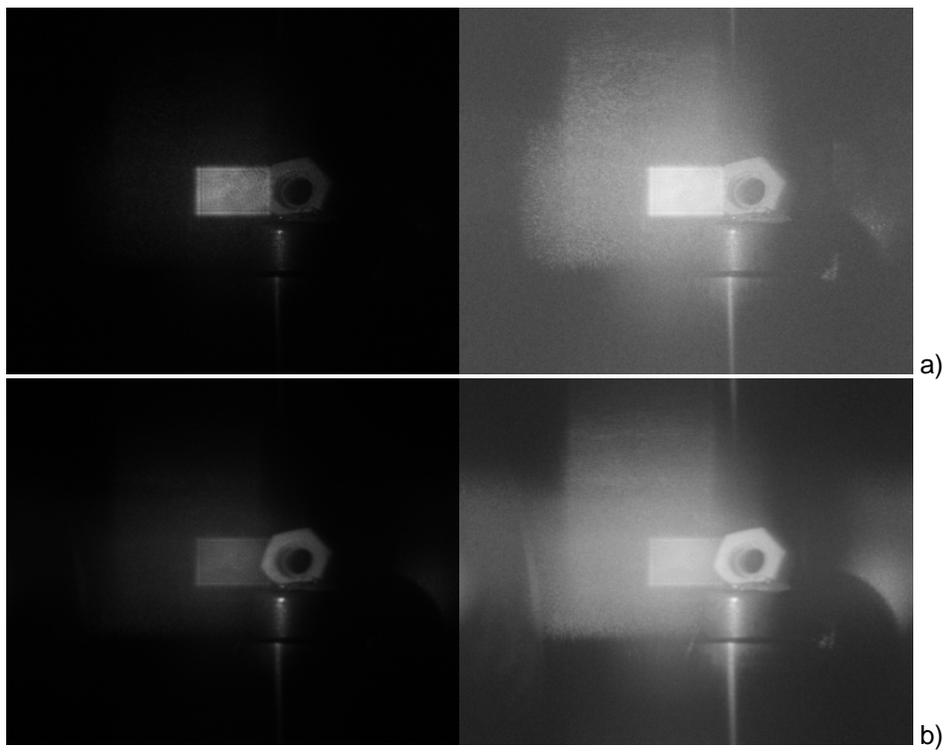


Figura 126. Holograma reconstruido con a) 5 registros y b) 10 registros.



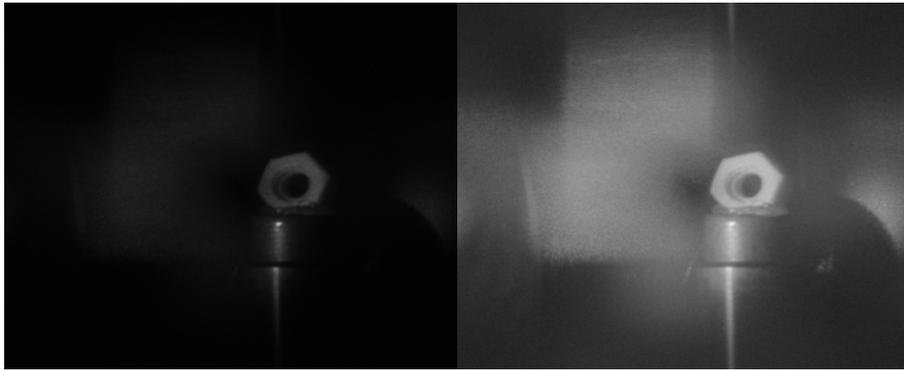


Figura 127. Holograma reconstruido con a) 5 registros, b) 20 registros Y c) 20 registros, substracción de componente DC y filtro pasa altos de 5×5 .

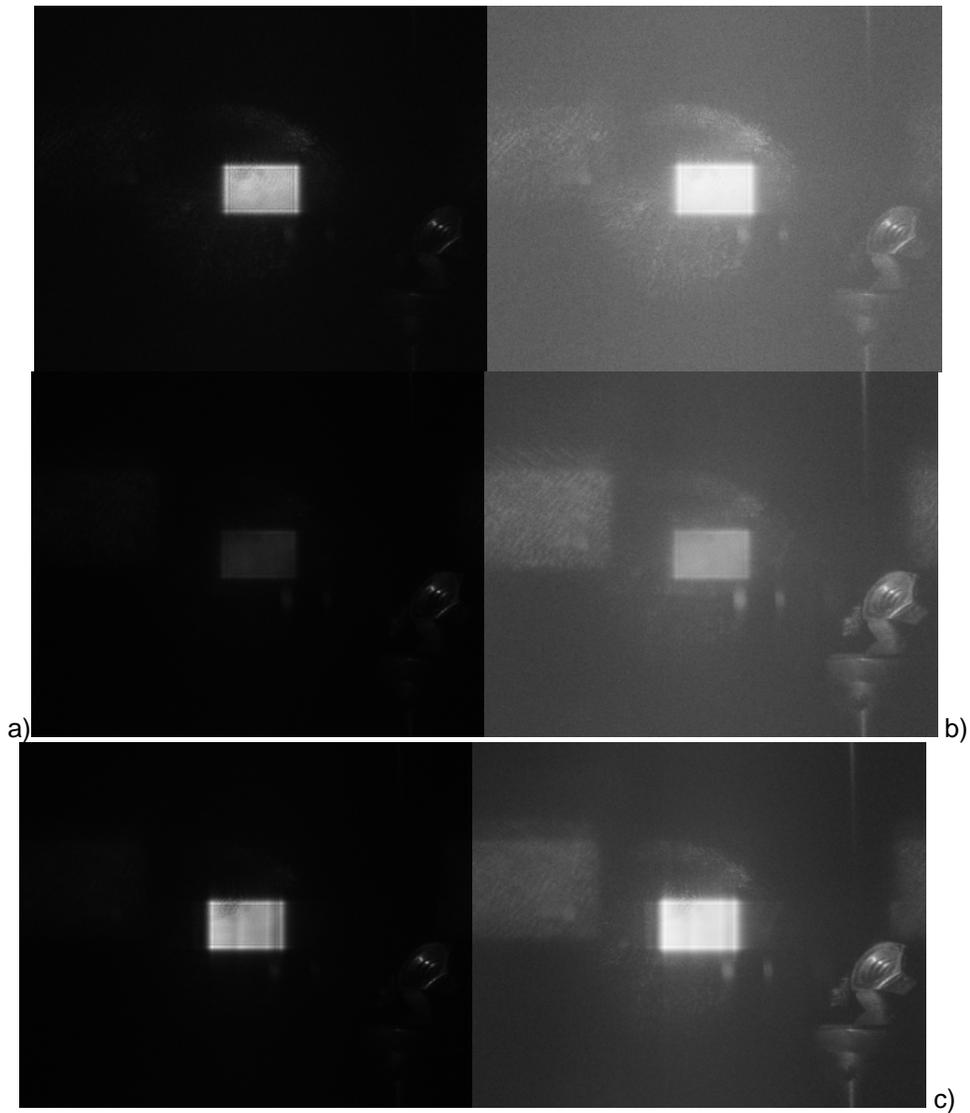


Figura 128. Holograma reconstruido con a) 5 registros, b) 10 registros Y c) 30 registros.

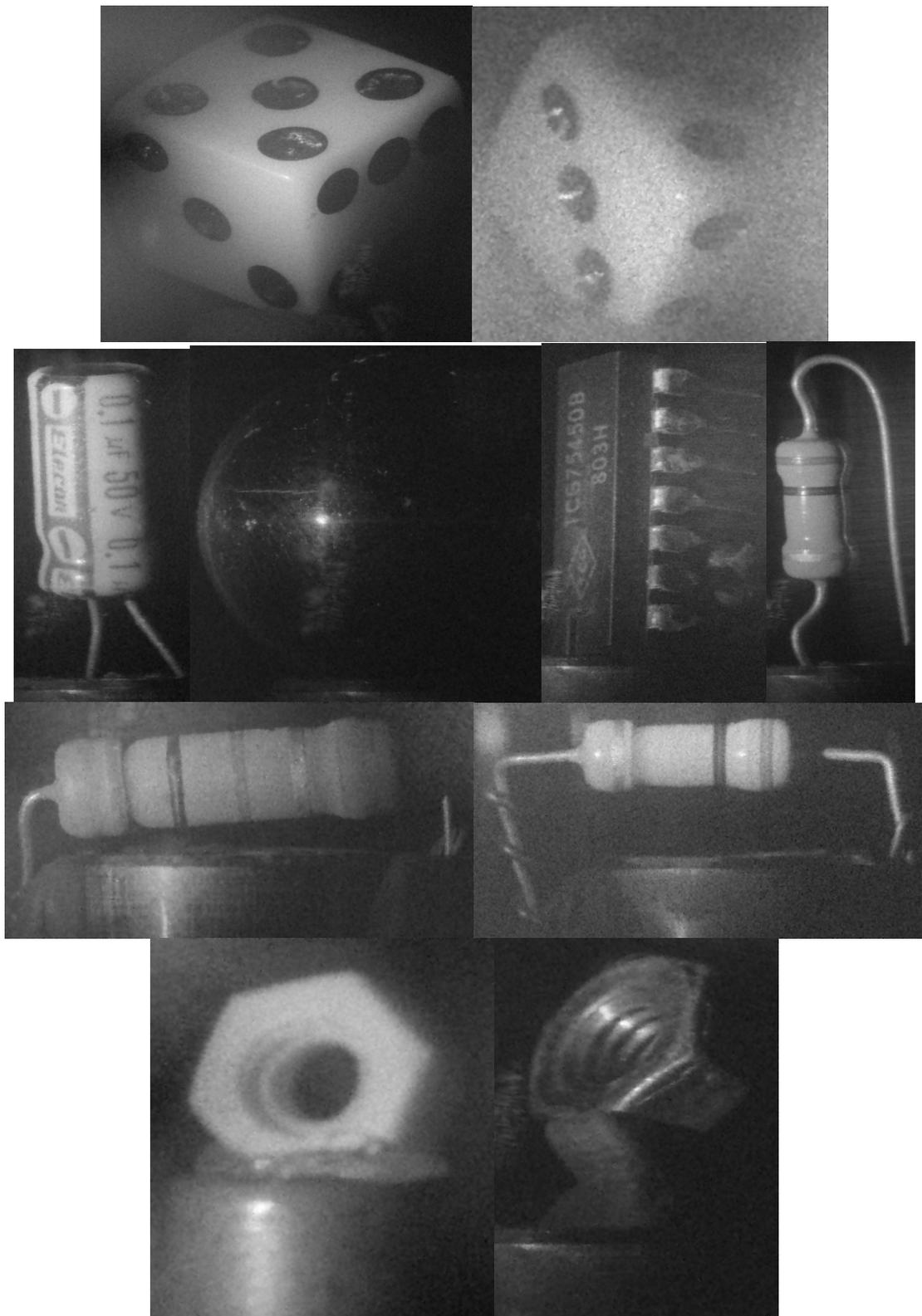


Figura 129. Ampliación de objeto en los hologramas de las figuras 119 a 128.

Haciendo referencia al trabajo dirigido a pruebas mediante interferometría holográfica de doble exposición, se posee registros de tres tipos de experiencias en torno a deformaciones físicas, las cuales se describen en el siguiente literal.

2.5.1 Placa metálica con esfuerzo mecánico. Como se presenta en la figura 71, se recurre a una lámina metálica sobre la cual se realizó presión mediante un tornillo micrométrico, ejecutando pasos variables en escala de micrómetros, con el fin de contrastar las mediciones mediante el método óptico y las longitudes de desplazamiento realizadas, tras cada uno de los cuales se procedió a capturar un registro holográfico y posterior procesamiento.

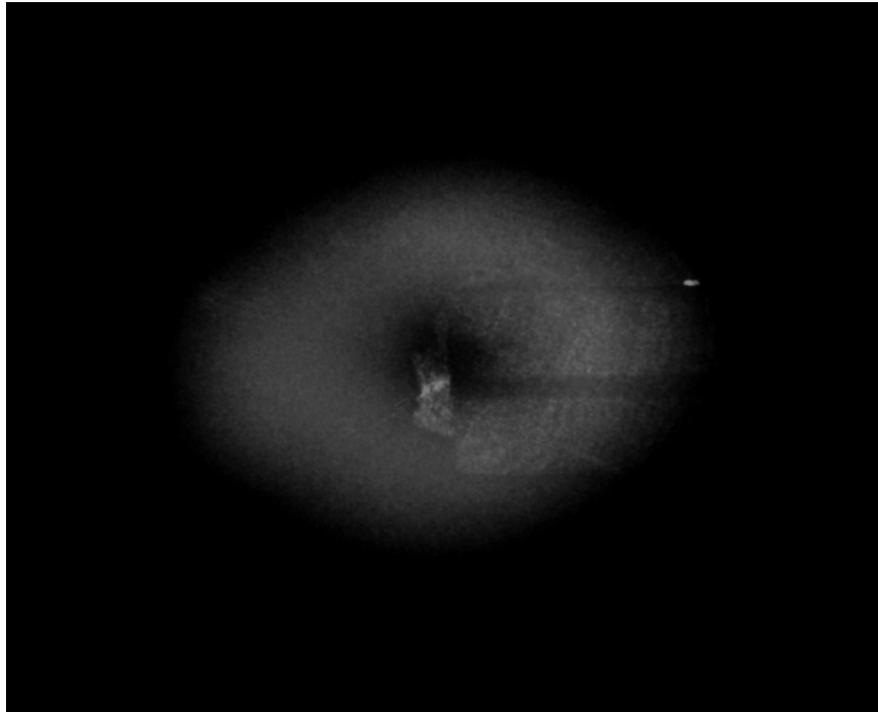


Figura 130. Holograma de la lámina presentada en la figura 71.

Tomando como referencia de los límites de objeto el holograma presentado en la figura 130, en donde se observa la lámina de la figura 71, se realiza una selección de área en los interferogramas y mapas de fase obtenidos, como los que se presenta en la figura 131, de este modo es posible sectorizar los cambios y agilizar el procesamiento y análisis en el software de estudio desarrollado.

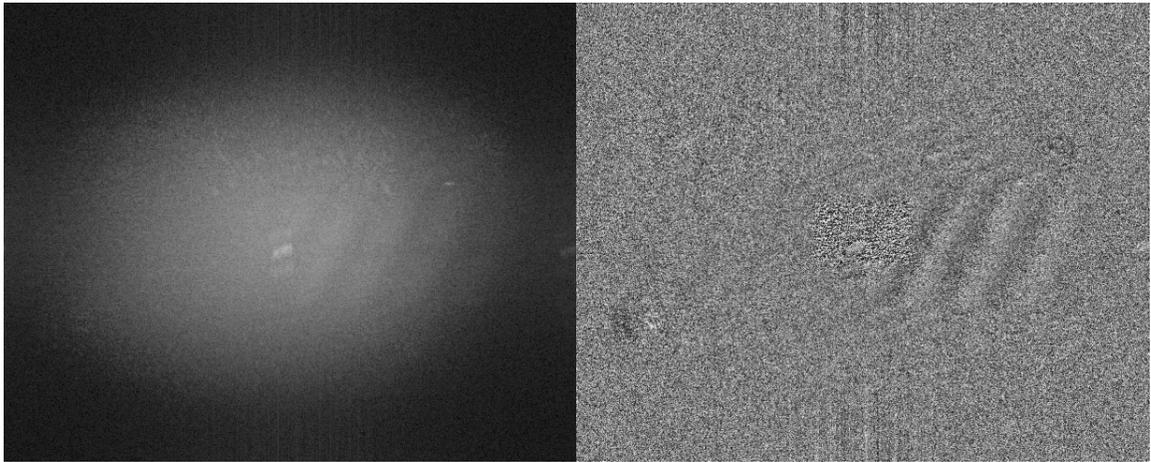
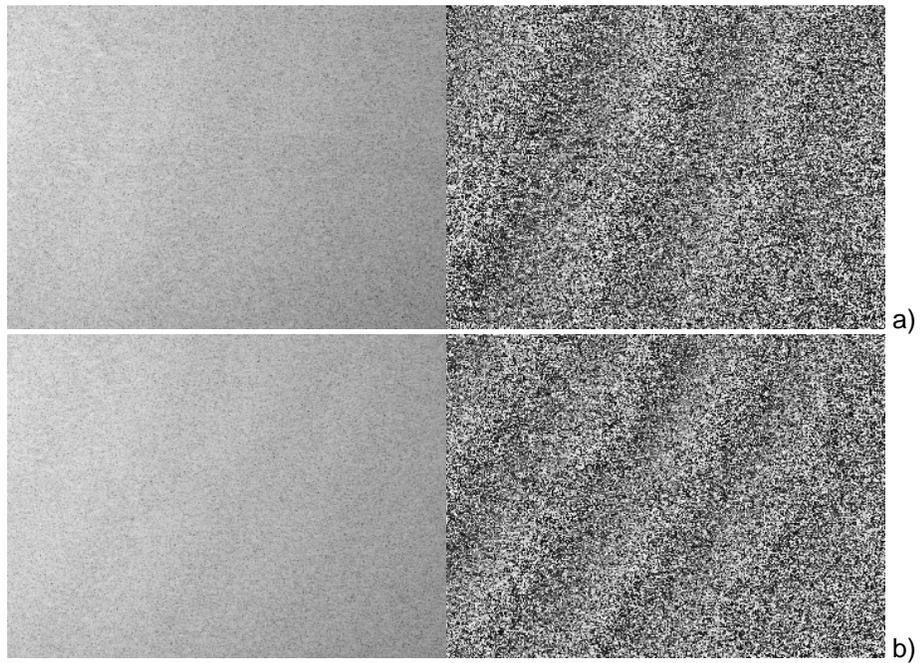


Figura 131. Interferograma y diferencia de fase para un estado de deformación de la lámina.

Tras realizar el proceso de sectorización, se obtiene los interferogramas y diferencias de fase para la lámina sometida a un esfuerzo mecánico mediante el desplazamiento de un tornillo micrométrico, realizando pasos de aproximadamente $0.5\mu m \pm 0,01\mu m$, entre los que se exponen algunos en la figura 132.



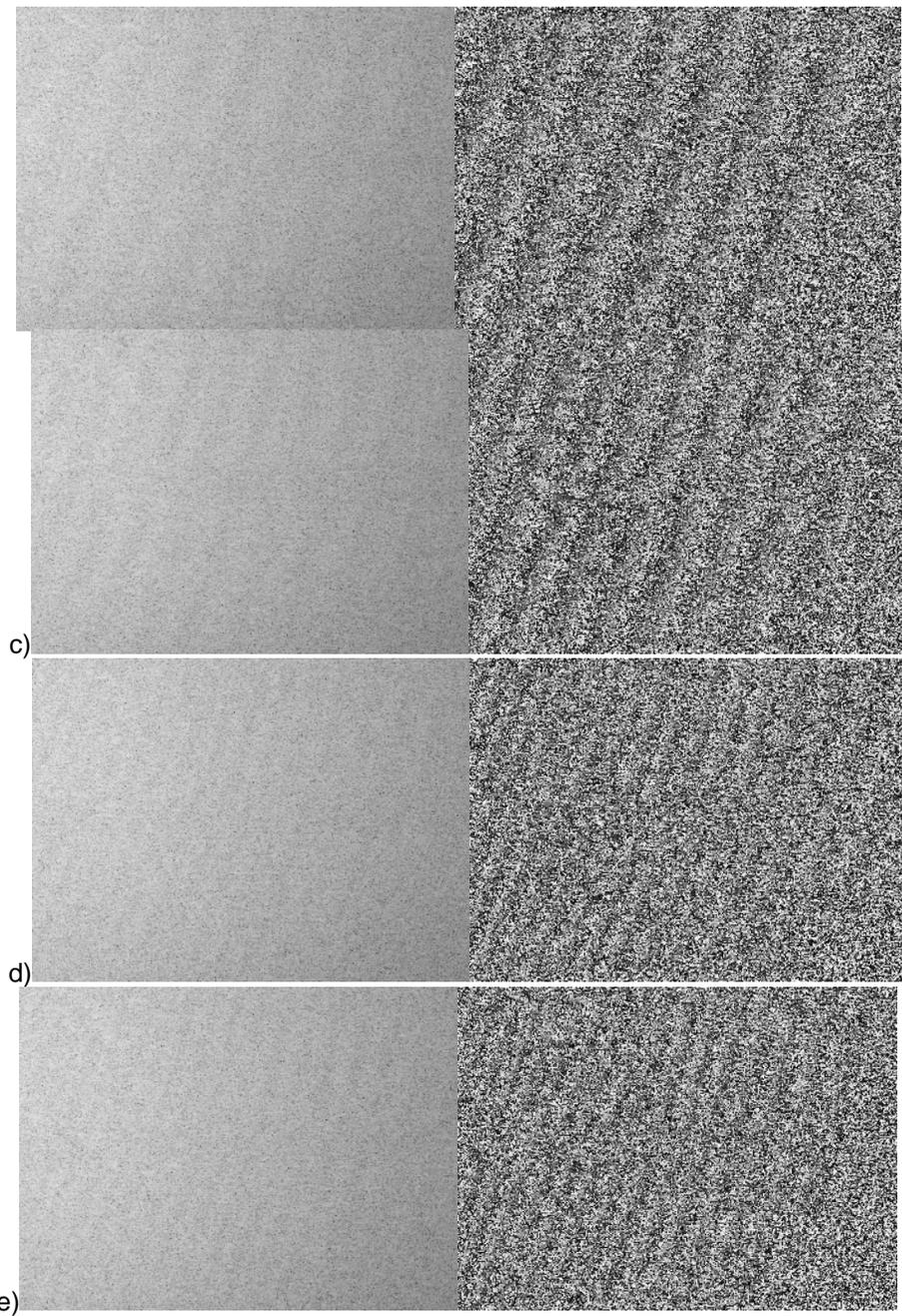
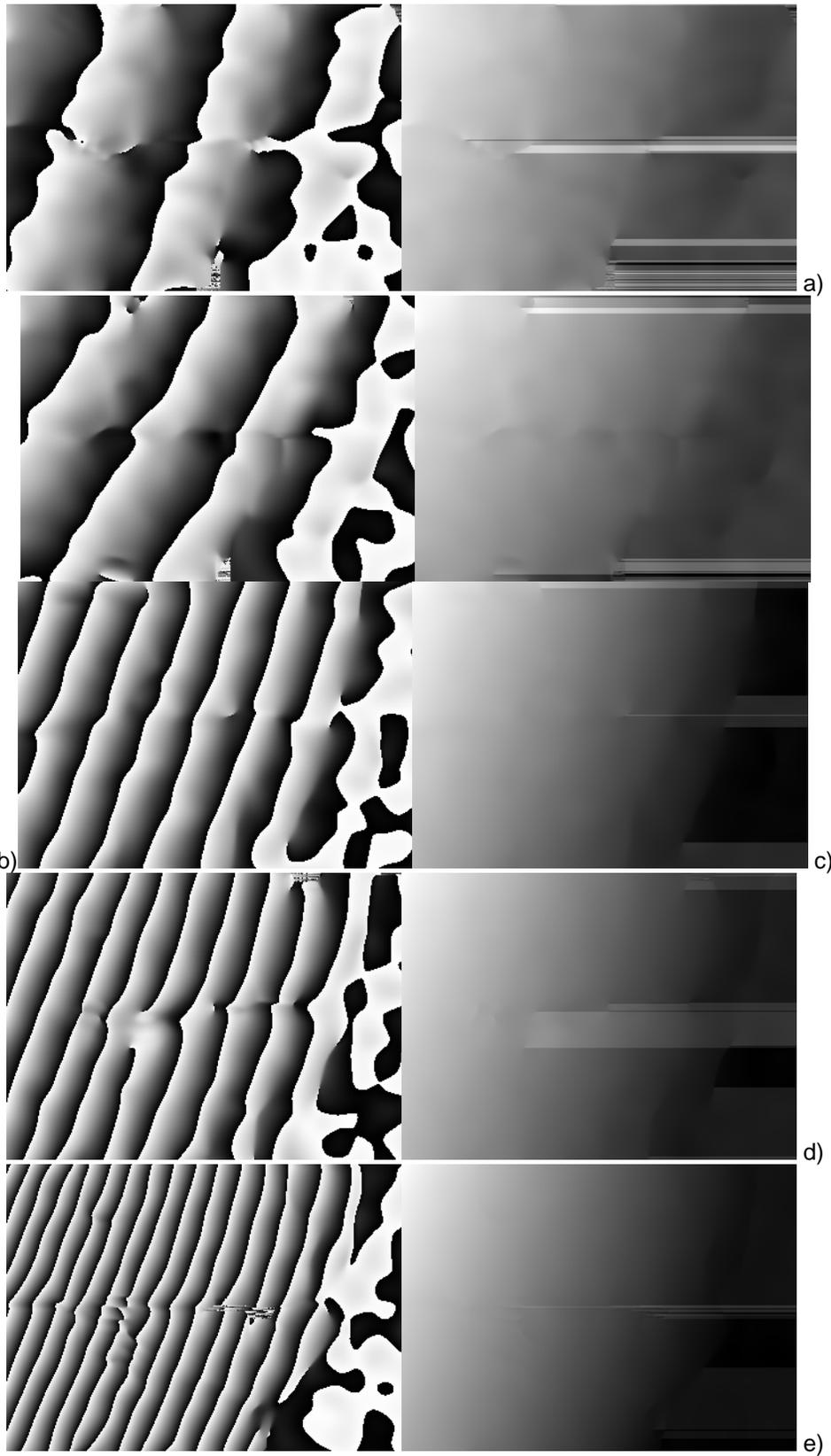


Figura 132. Interferogramas (izquierda) y diferencias de fase (derecha) de la placa.

Como se observa en la figura 132, la fase posee mayor información que la amplitud, de este modo se procede a realizar un filtraje de los mapas de fase obtenidos y posterior desenvolvimiento de fase (figura 133), dando lugar a una variación en intensidad de la magnitud de desplazamiento o deformación captada, la cual es normalizada obteniendo en perfil el grado del desplazamiento sufrido por la lámina bajo prueba.



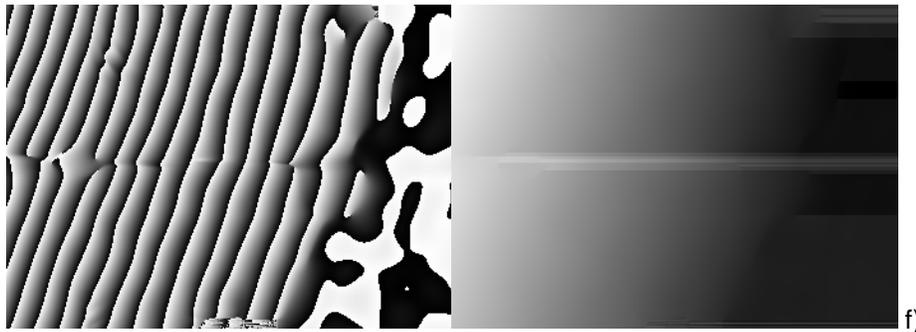
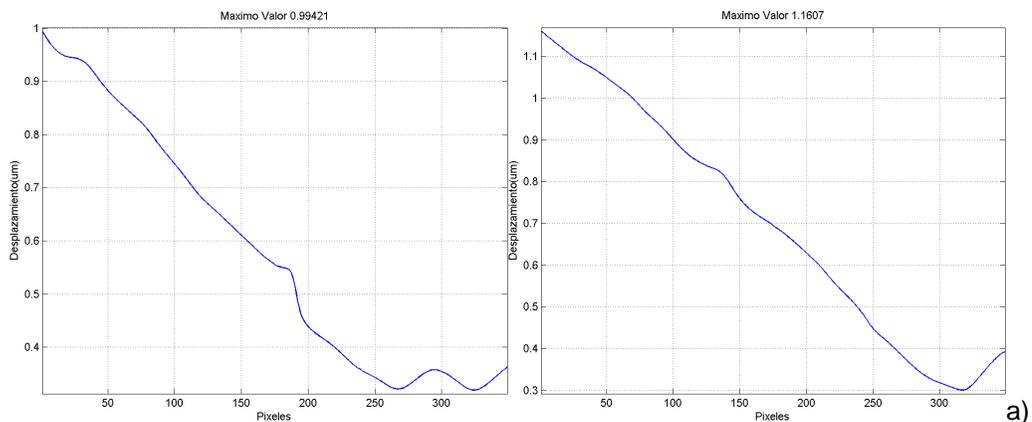
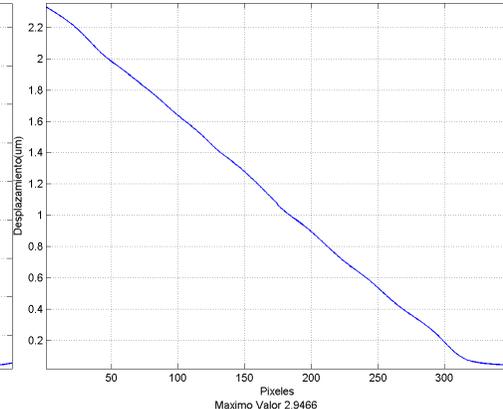
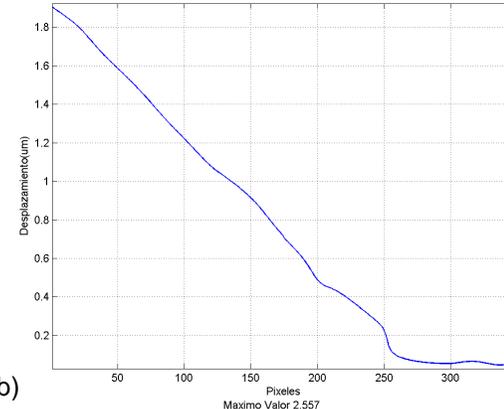
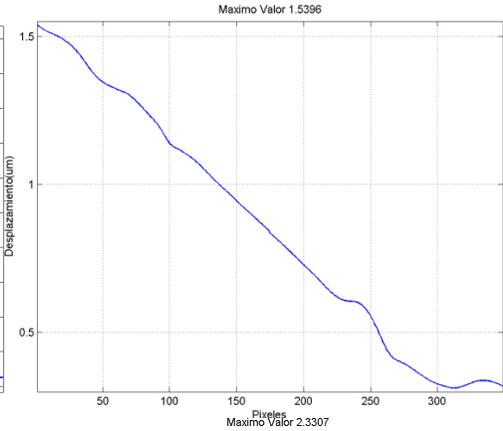
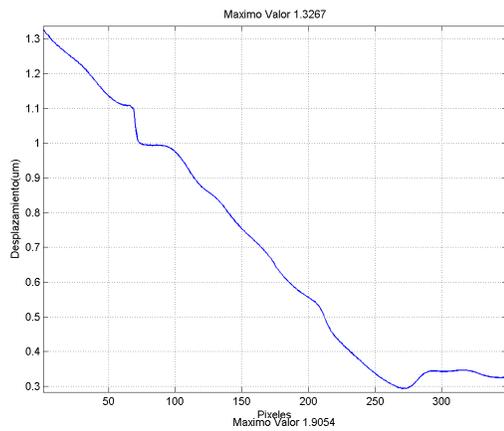


Figura 133. Mapas de fase filtrados (izquierda) y desenvueltos (derecha) para la lámina.

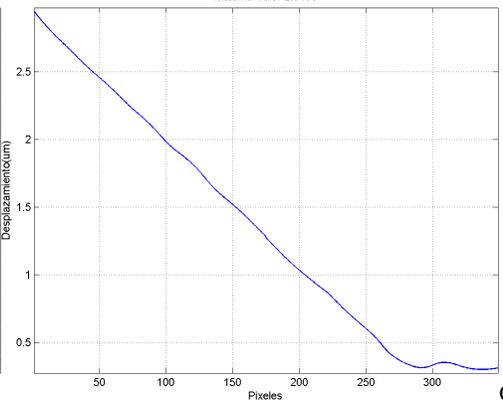
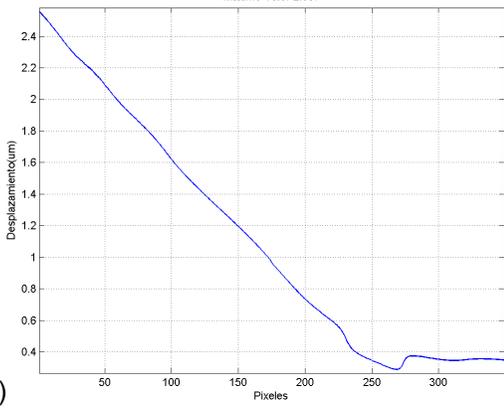
En esta sección se especifica que la magnitud del desplazamiento se presenta en dirección perpendicular al sensor de captura de los diferentes hologramas.

En la figura 134, se presentan dos gráficas de perfil por captura, la primera fila de imágenes corresponde a una selección de la parte baja del desenvolvimiento de fase, mientras que la segunda corresponde a una superior de la misma. En estas gráficas, al igual que las correspondientes en la figura 133, se muestra que la lámina analizada no se modifica de forma uniforme (lo cual se determina mediante la diferencia de intensidad), sino que la parte superior sufre un grado de alteración mayor, como se puede apreciar en la figura 135, en una perspectiva de uno de los desenvolvimientos de fase realizados, empleando la ventana *Perspectiva* del software desarrollado.





b)



c)

d)

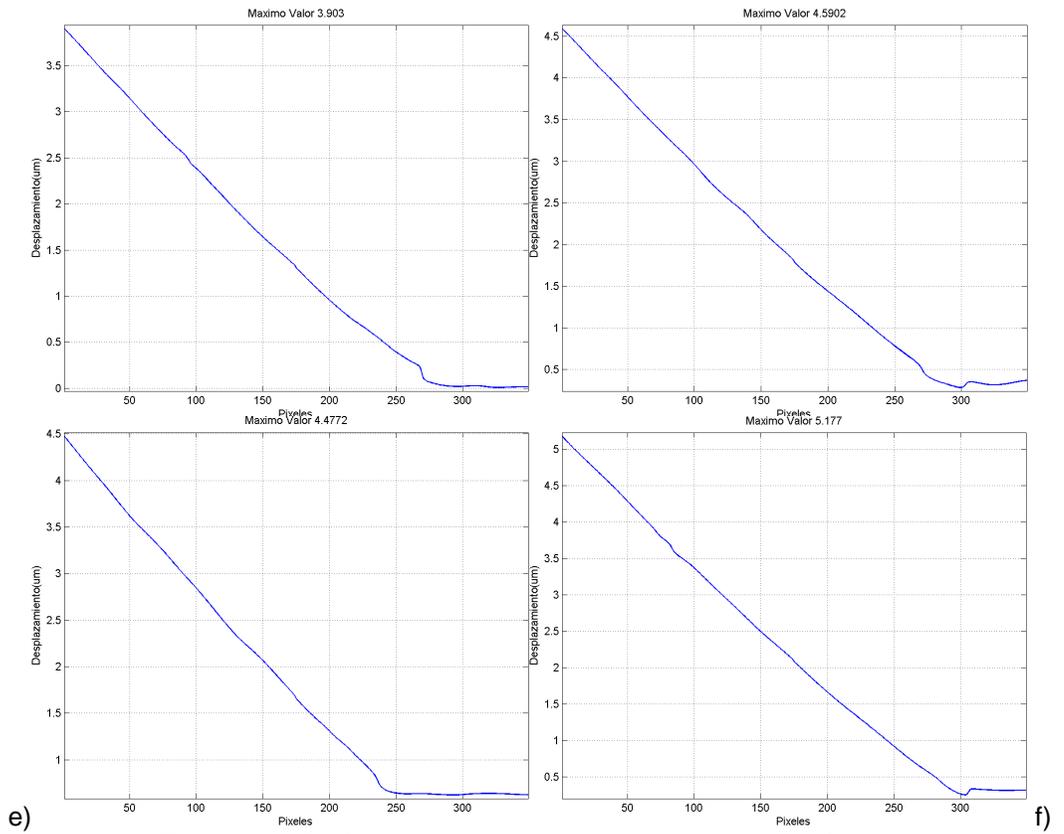


Figura 134. Perfiles de intensidad normalizados para la lámina.

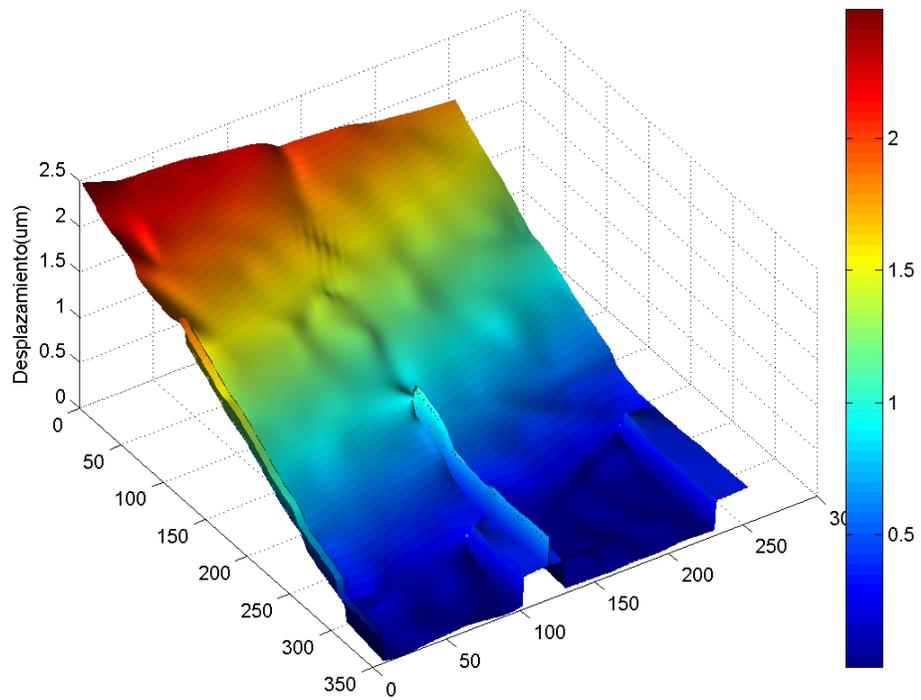


Figura 135. Perspectiva de un desenvolvimiento de fase para la lámina.

En la tabla 1, se presenta una comparación entre los valores esperados y los obtenidos mediante la técnica de Interferometría Digital De Doble Exposición.

Valor Esperado (μm)	Medición (μm)		Error Absoluto (μm)		Error Relativo (%)	
	Inferior	Superior	inferior	superior	Inferior	Superior
1,000	0,994	1,161	-0,006	0,161	0,579	16,070
1,500	1,327	1,540	-0,173	0,040	11,553	2,640
2,000	1,905	2,331	-0,095	0,331	4,730	16,535
2,500	2,557	2,947	0,057	0,447	2,280	17,864
4,000	3,903	4,590	-0,097	0,590	2,425	14,755
4,500	4,477	5,177	-0,023	0,677	0,507	15,044

Tabla 1. Comparación entre los valores esperados y obtenidos.

Cabe señalar que la variación de desplazamiento se realiza mediante movilidad manual, en donde la precisión en los valores esperados depende de la capacidad del ejecutor.

$$s = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L})^2 \quad e = \sigma + s \quad (84)$$

Finalmente, se evalúa la desviación estándar que aplica cuando $N \leq 30$, siendo N el número de datos, que para el caso actual es N=6, siendo necesario aplicar un tratamiento estadístico singular denominado *corrección de Student*, con el cual se busca determinar el error y la desviación estándar, fijados por la probabilidad de ocurrencia y la cantidad de datos existentes, haciendo uso en este caso de los valores obtenidos a partir de la ecuación 84, definiendo las variables presentes s =error estándar, σ^2 =desviación estándar y e =error.

En el caso de la medición inferior se tiene que para una probabilidad $p=0.05$ y $N=6$, se encuentra que $t_p=2.447$ y respectivamente $s = 1.538$, $\sigma^2 = 1.975$ y $e = 2.943$, mientras que para $p=0.01$ y $N=6$, $t_p=3.707$, siendo $s = 2.330$ y $e = 3,735$.

Para la medición superior en $p=0.05$ y $N=6$, se tiene $t_p=2.447$ obteniendo $s = 1.853$, $\sigma^2 = 2.867$ y $e = 3.546$; en tanto que para $p=0.01$ y $N=6$, se encuentra que $t_p=3.707$, correspondiendo a $s = 2.807$ y $e = 4.501$.

En los casos anteriores se observa que los valores correspondientes a la desviación y el error son bastante bajos, por lo que permiten definir una apreciación de instrumento bastante fiable. De igual forma se observa que las mediciones a nivel superior son más apartadas que las inferiores.

2.5.2 Resistencia con variación eléctrica. Siguiendo un procesamiento similar al presentado en la sección anterior, se realizó el análisis de los registros obtenidos de una resistencia de carbón de $1/2W$ con una denominación comercial de 100Ω , a la cual se le aplicó una diferencia de potencial en forma ascendente de $0.01V$ sobre sus terminales, obteniendo la variación térmica debido a la conducción eléctrica y el grado de deformación que sufre la misma.

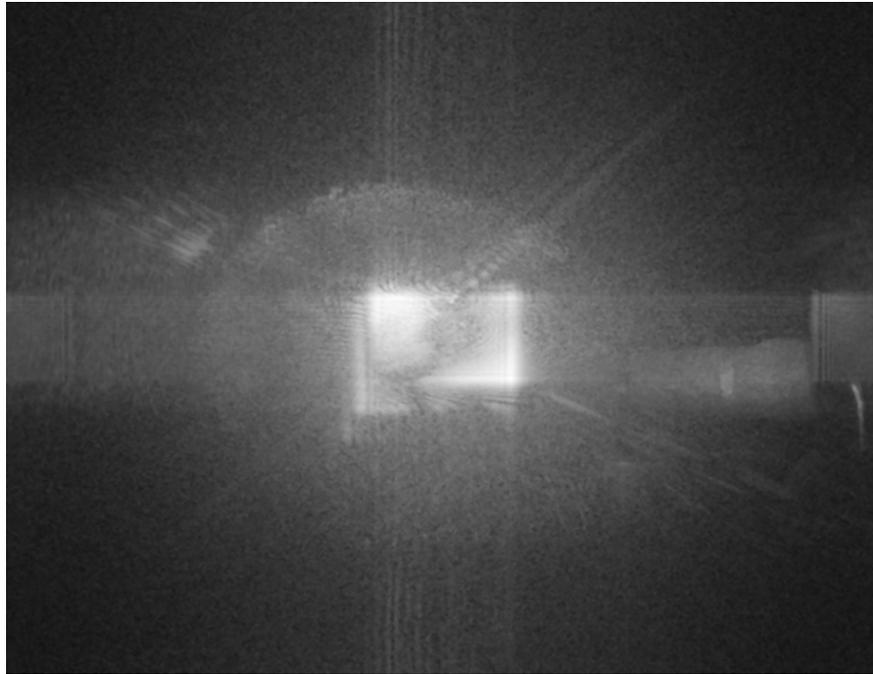


Figura 136. Holograma de una resistencia de carbón de 100Ω a $1/2W$.

Tras realizar el proceso de reconstrucción numérica, diferencia de fase, amplitud y sectorización, se obtienen las imágenes presentadas en la figura 138.

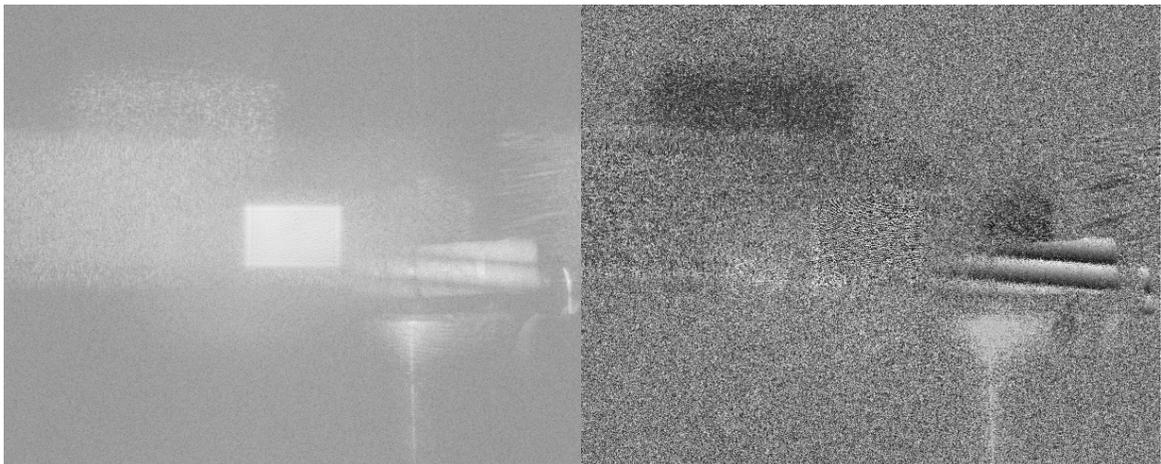
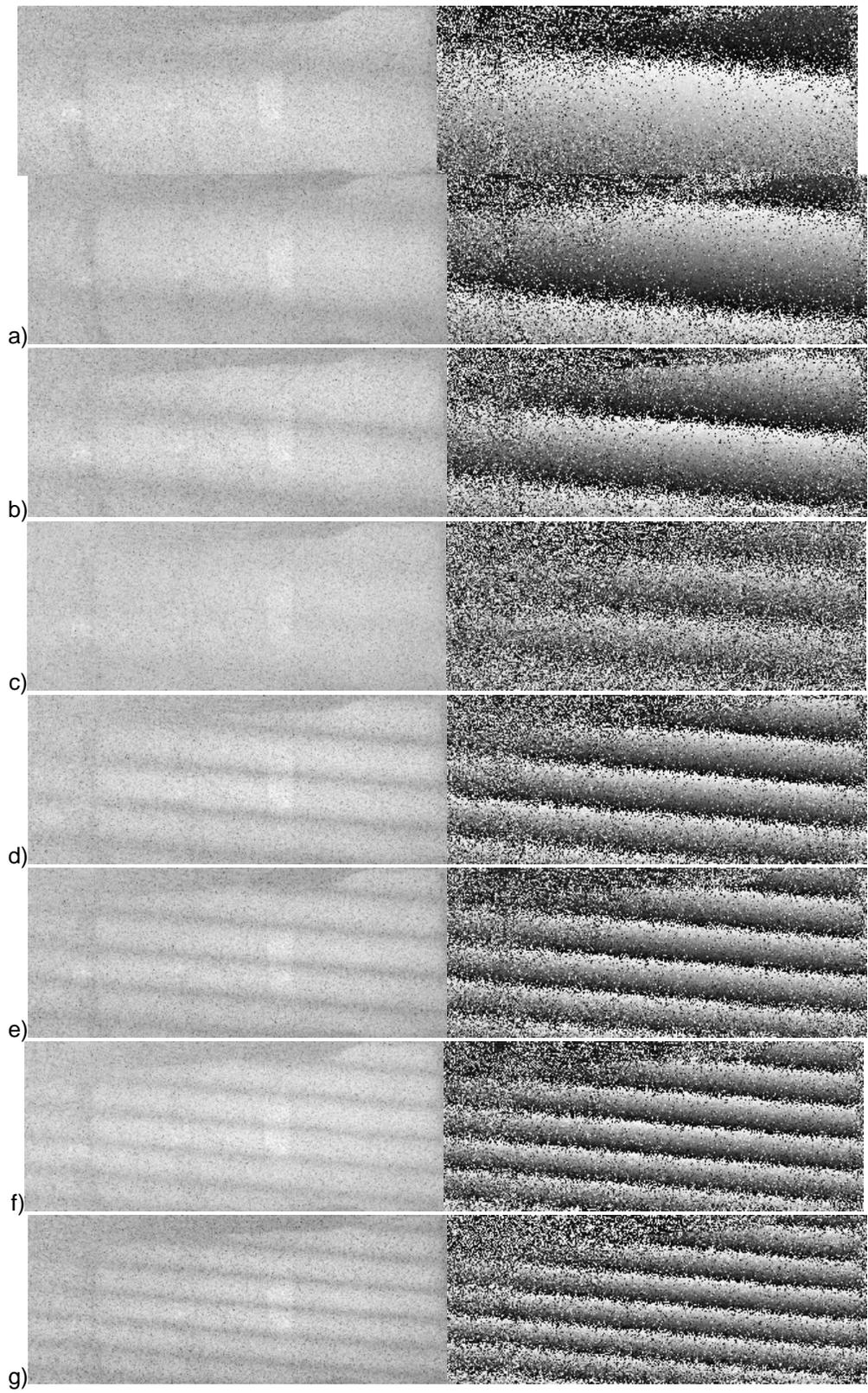


Figura 137. Interferograma y diferencia de fase para un estado de deformación eléctrica.



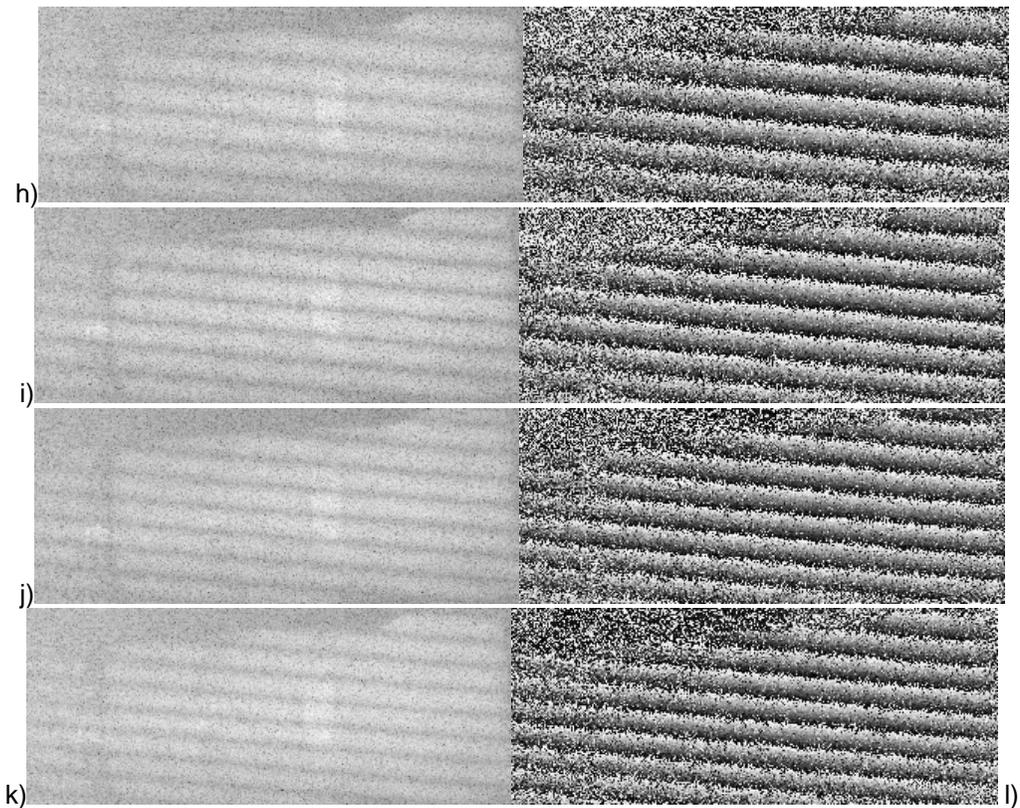
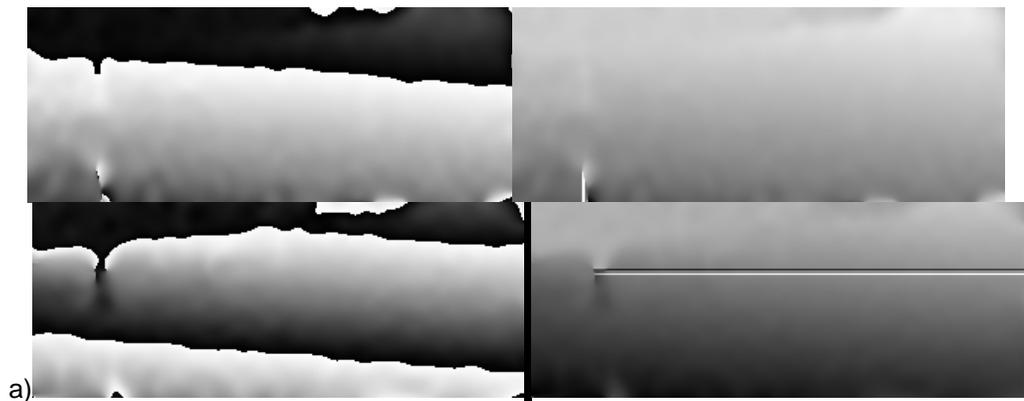
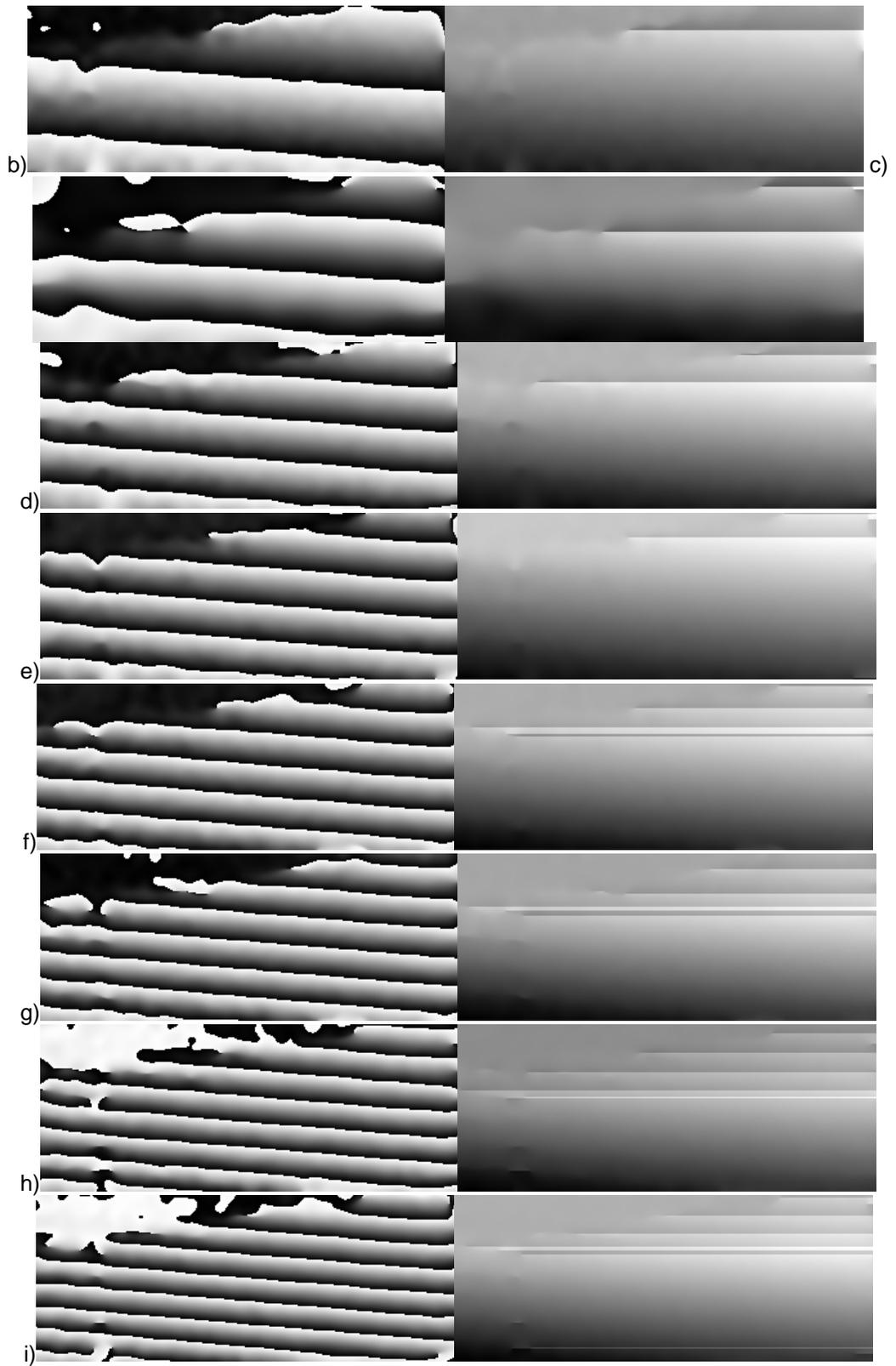


Figura 138. Interferogramas (izquierda) y diferencias de fase (derecha) de la resistencia sometida a una diferencia de potencial.

En la figura 138, se observa que un incremento de $0.01V$ es suficiente para producir una deformación de la resistencia y que a medida que aumenta el nivel de voltaje, el número de franjas sobre la superficie de la resistencia también aumenta, indicando una magnitud de deformación mayor.

Siguiendo el proceso, se realiza el filtraje de los mapas de fase y posterior desenvolvimiento, presentados en la figura 139.





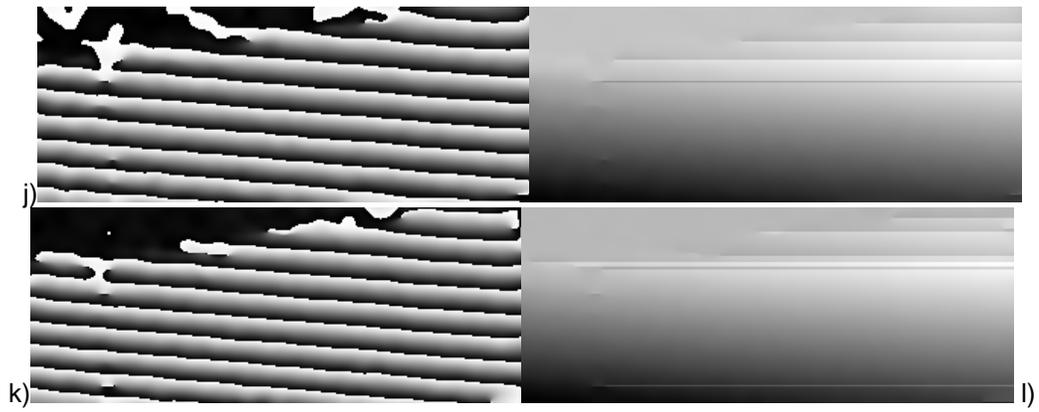
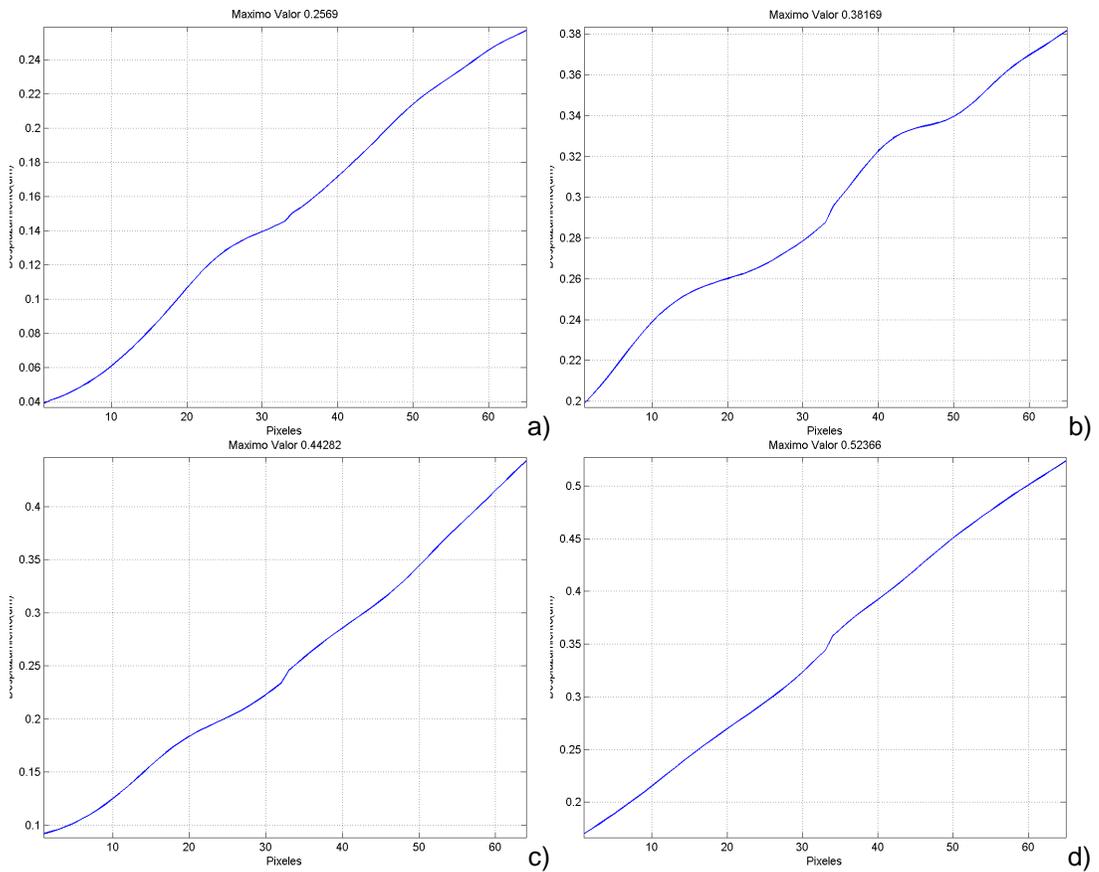
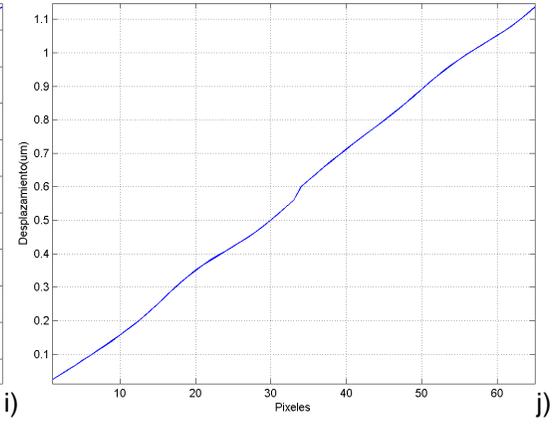
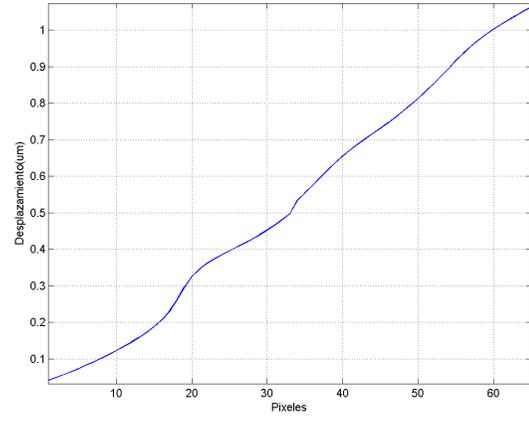
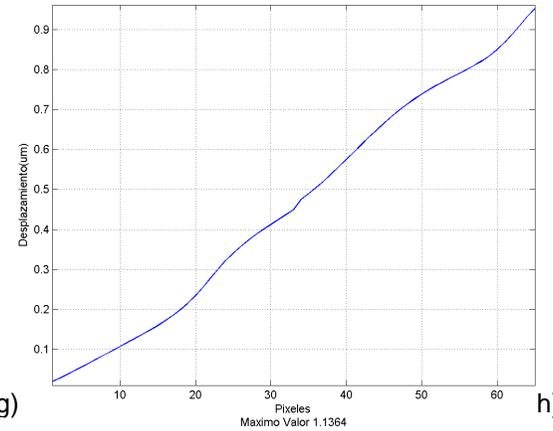
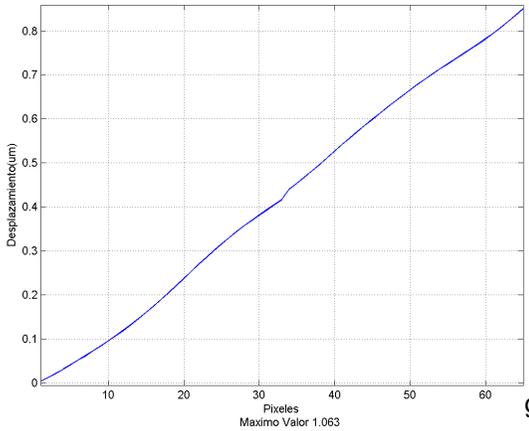
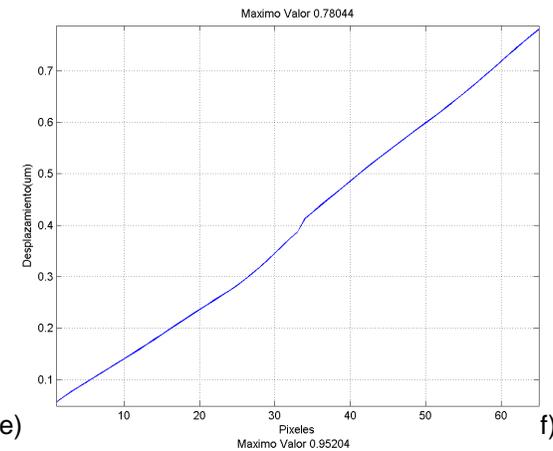
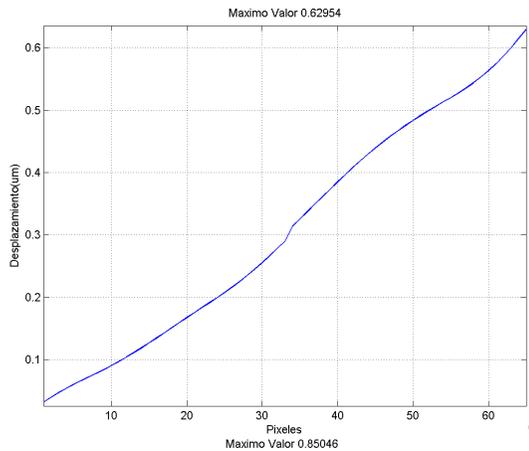


Figura 139. Mapas de fase filtrados (izquierda) y desenvueltos (derecha) de la resistencia.

Finalmente, se presenta el perfil o variación que sufre la resistencia encaminada por el nivel de intensidad y su normalización, cuyas gráficas se pueden apreciar en la figura 140.





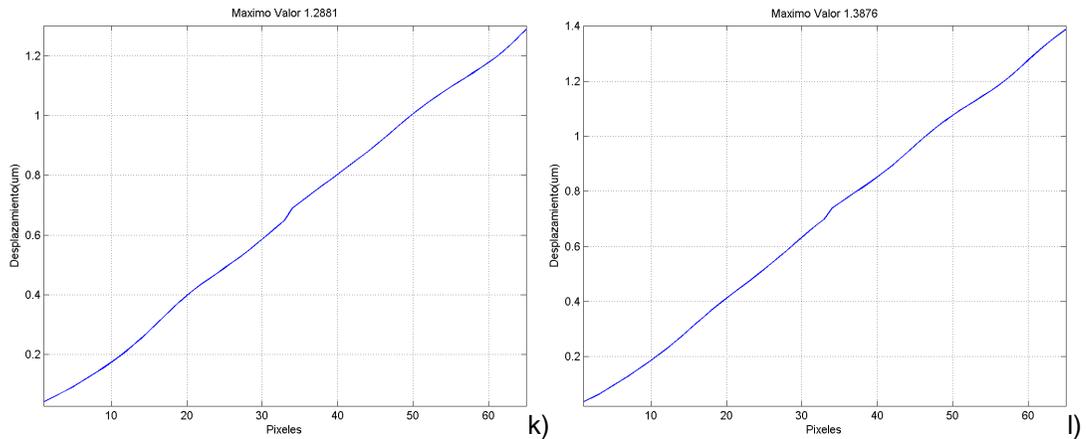


Figura 140. Perfiles de intensidad normalizados.

Los valores obtenidos de la figura 140 se consignan en la tabla 2 y se presentan gráficamente en la figura 141, con los cuales se determinó la ecuación 85, en la que se distingue la variación física que sufre la resistencia frente a diferentes voltajes de aplicación en sus terminales, haciendo uso de *Mínimos Cuadrados*, de este modo se ha podido establecer una prueba útil y no contemplada mediante la técnica expuesta.

$$d = 10,200V \times 10^{-6} + 0,144 \times 10^{-6} \quad (85)$$

Siendo d =Desplazamiento sufrido y V =Voltaje aplicado

El mismo proceso permite obtener el error cuadrático o margen de desviación de la tendencia lineal, con un valor de $r^2 = 0.996$ (Cuando el modelo es bueno r^2 se aproxima a uno), describiendo un muy buen resultado para una tendencia lineal.

Voltaje (V)	Variación (μm)
0,010	0,257
0,020	0,382
0,030	0,443
0,040	0,524
0,050	0,630
0,060	0,780
0,070	0,850
0,080	0,952
0,090	1,063
0,100	1,136
0,110	1,288
0,120	1,388

Tabla 2. Variación en desplazamiento de una resistencia de 100Ω a $1/2W$, frente a un incremento de voltaje.

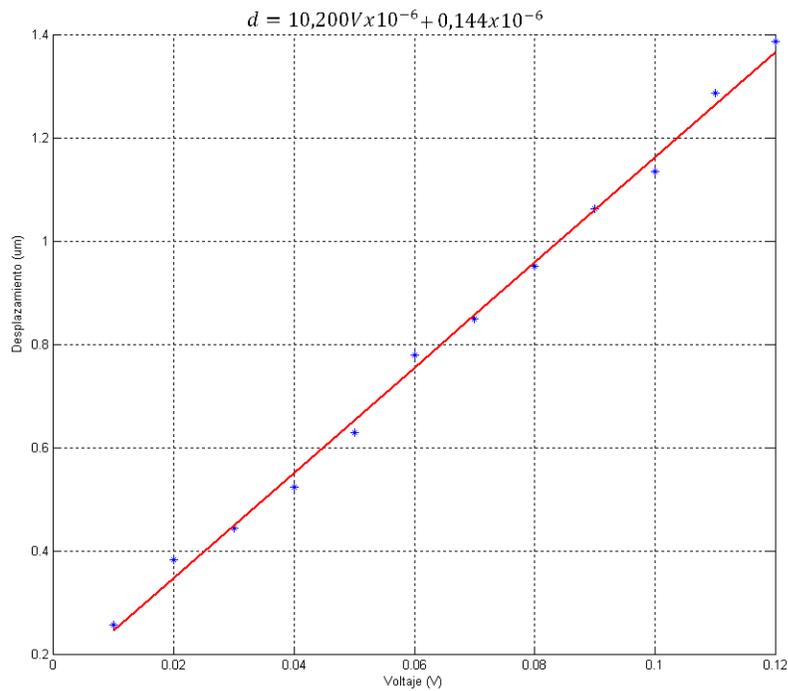


Figura 141. Voltaje vs. Desplazamiento.

En esta prueba se hace necesario señalar que no se posee datos de medición adquiridos con instrumentos de medida diferentes, ya que un contacto físico sobre la muestra analizada, que para este caso es la resistencia de carbón, impediría un correcto análisis perdiéndose el concepto de medición no invasiva, en la cual el acercamiento de un instrumento permite una transferencia de calor de la muestra al dispositivo de medida, alterando la magnitud real del desplazamiento adquirido en grado de la deformación ocasionada.

2.5.3 Resistencia con variación térmica. Se cuenta con registros de una deformación causada sobre la superficie de una resistencia de 100Ω a $1/2W$, debida a la variación en torno a las diferentes temperaturas que se registran por el descenso en el nivel de temperatura de la resistencia, a la cual se le aplica un voltaje de $10.03V$ en un espacio de tiempo en el que se estabiliza en un valor de temperatura, tras lo cual se desconecta la resistencia y se realiza la adquisición de registros y del nivel de la temperatura en el mismo instante de tiempo.

El análisis para esta prueba procede de forma similar que en los ensayos tratados en los literales anteriores.

Se obtiene un holograma con los registros como si se tratara de registros decorrelacionados, en el que sea posible distinguir el objeto en una forma adecuada.



Figura 142. Holograma de una resistencia de 100Ω a $1/2 W$.

Se procede a realizar las diferentes reconstrucciones numéricas, diferencia de amplitud y fase para sectorizar el elemento con base al holograma obtenido.

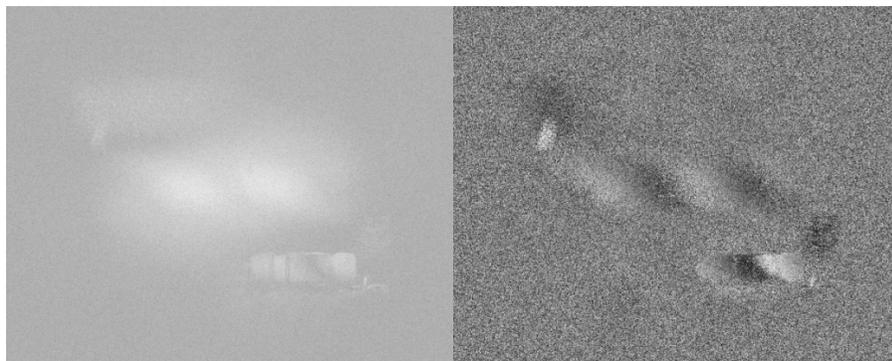
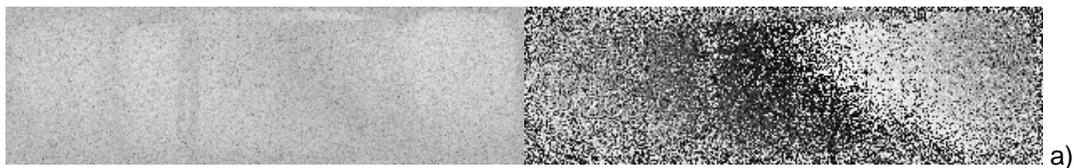


Figura 143. Interferograma y diferencia de fase para en estado de deformación térmica de una resistencia de 100Ω a $1/2 W$

Se selecciona el área de interés en cada interferograma y diferencia de fase, obteniéndose las imágenes presentadas en la figura 144.



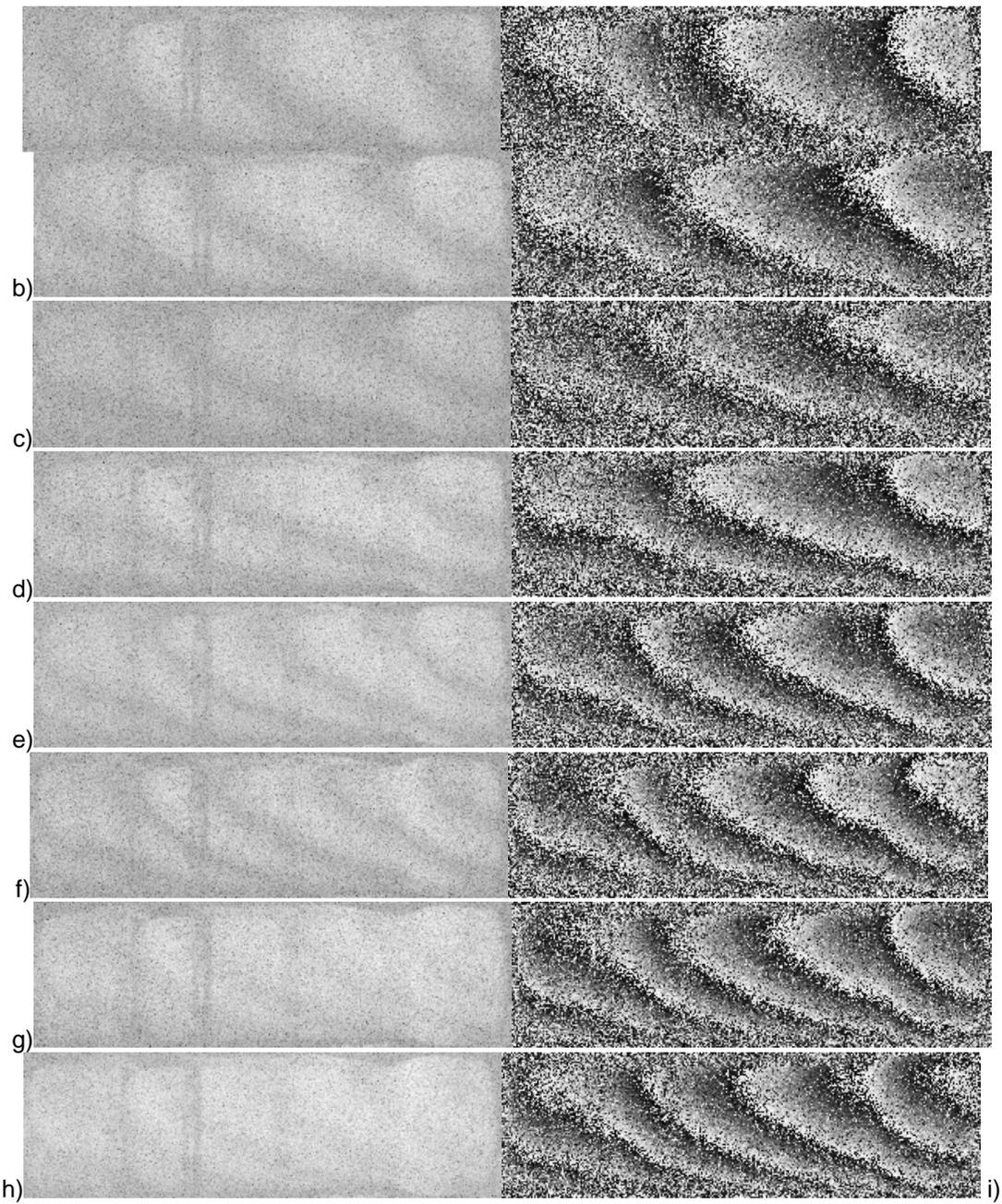


Figura 144. Interferogramas (izquierda) y diferencias de fase (derecha) de la resistencia sometida a una diferencia de potencial.

La información contenida de la fase es filtrada y desenvuelta, presentando los resultados del proceso en la figura 145.

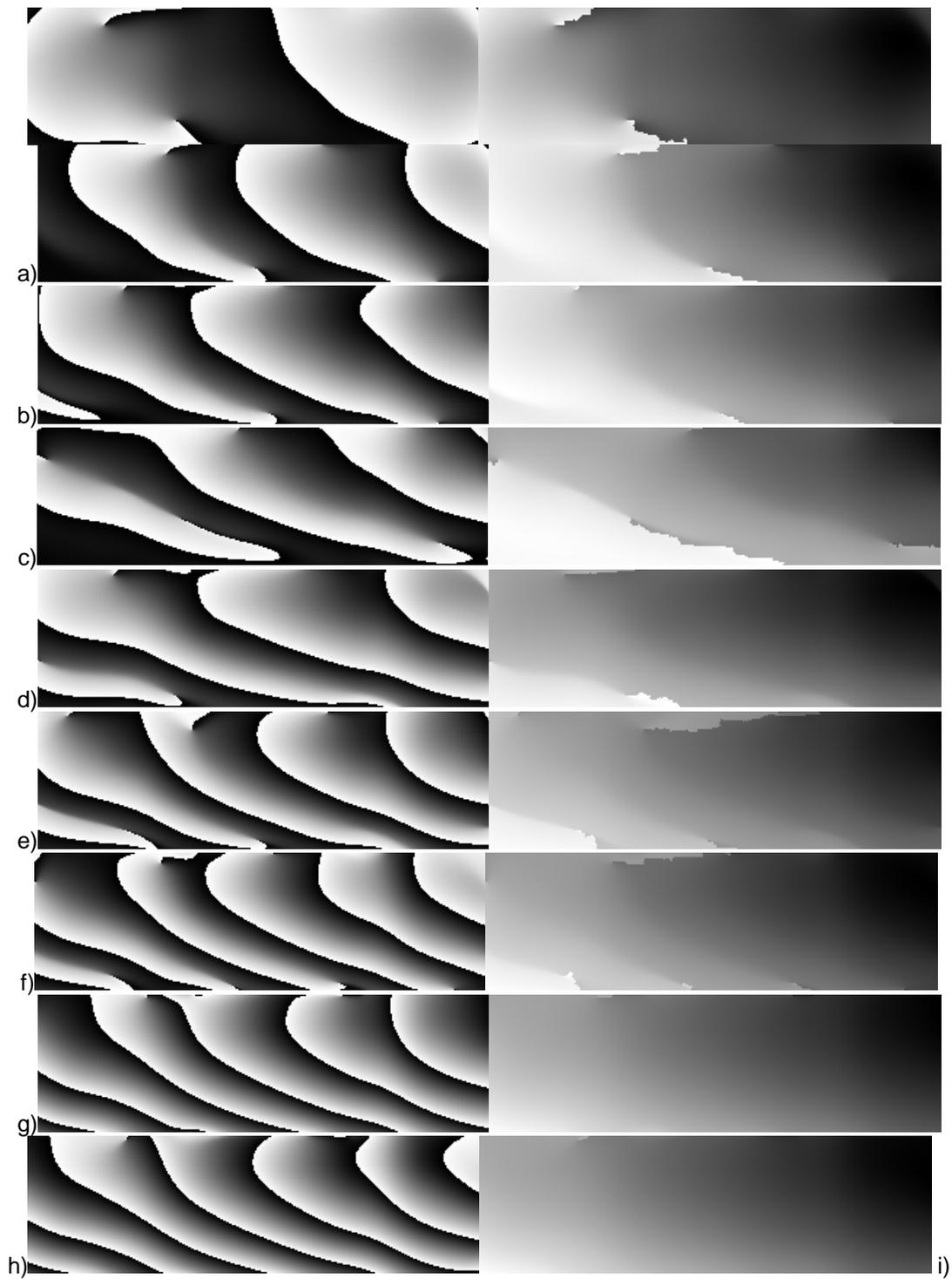
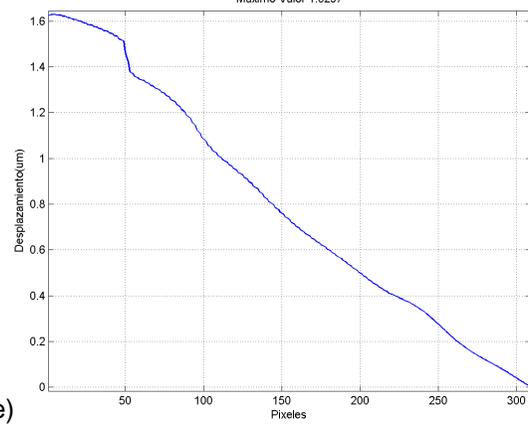
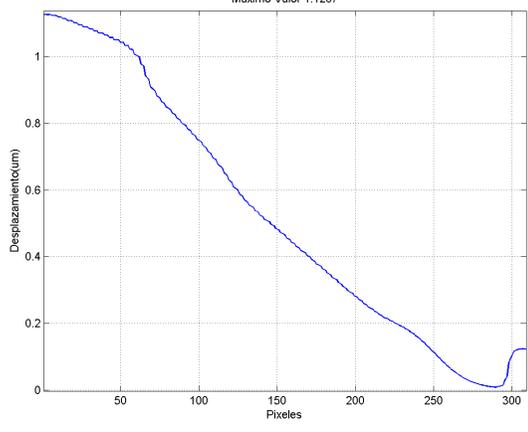
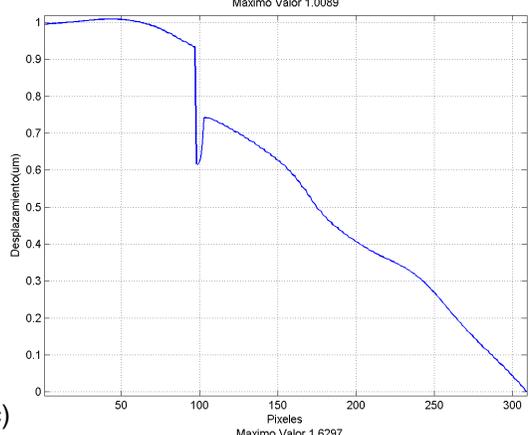
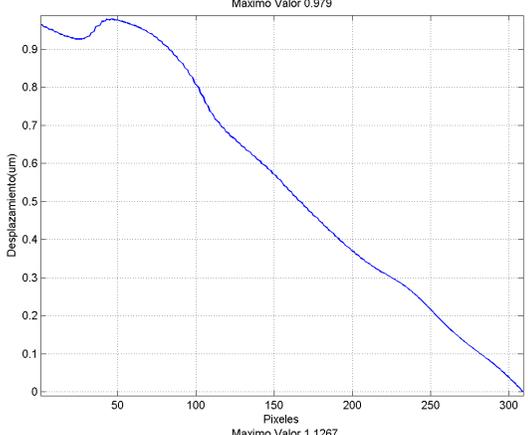
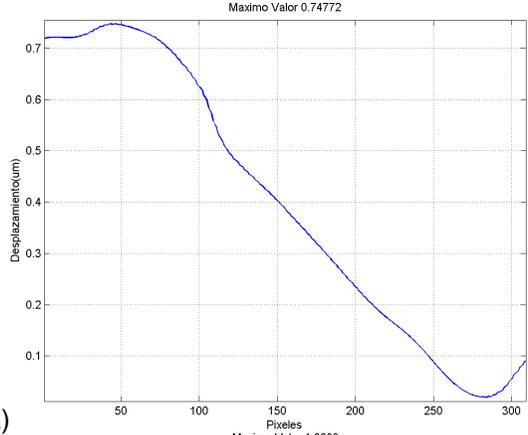
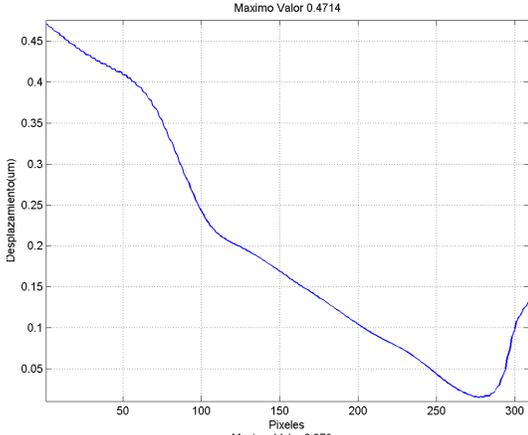


Figura 145. Mapas de fase filtrados (izquierda) y desenvueltos (derecha) de la resistencia.

Y como en los casos anteriores se procede a obtener el valor del perfil (figura 146) o variación que sufre la resistencia debido al cambio de temperatura, haciendo uso del software HID, cuyos valores de deformación son presentados en la tabla 3

junto al valor de temperatura registrado en el momento de capturar el holograma correspondiente.



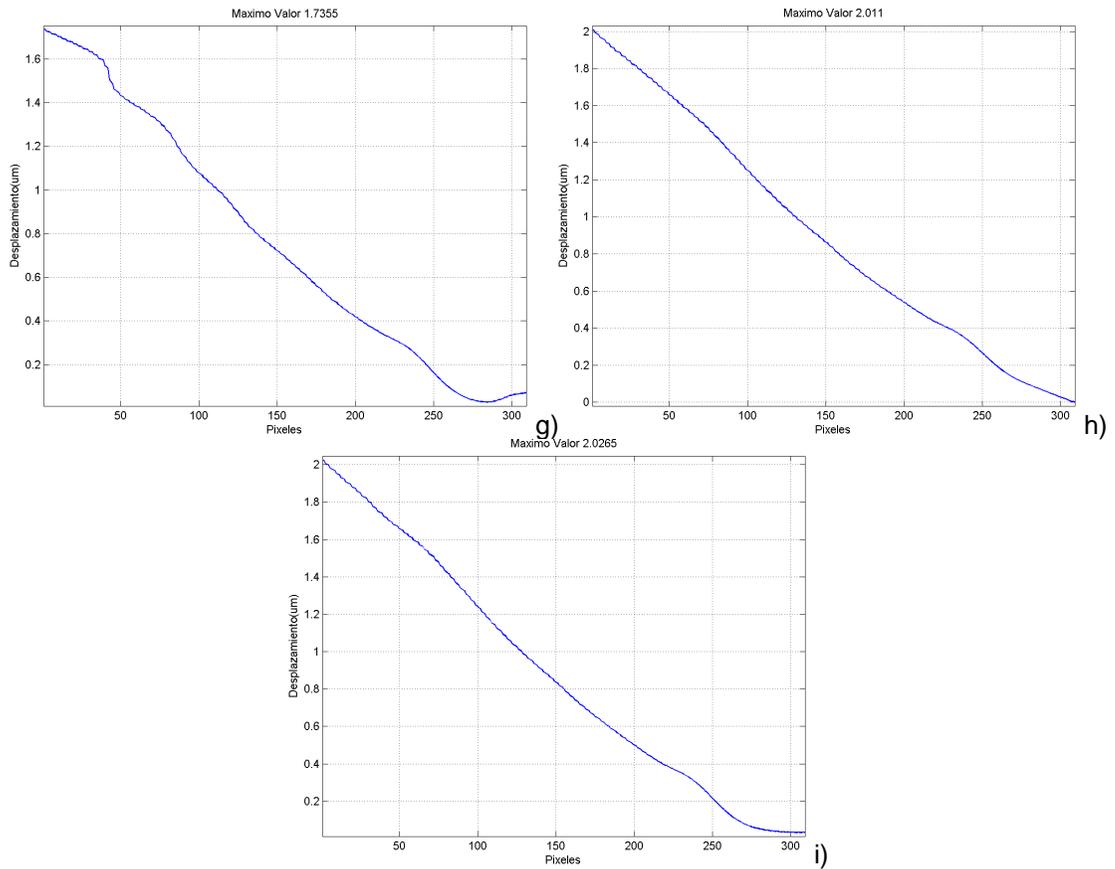


Figura 146. Perfiles de intensidad normalizados para la resistencia.

Se resalta que el valor que se considera como referencia para la diferencia en temperatura que se establece en la tabla 3 es $h1=38^{\circ}C$.

Registro	Temperatura ($^{\circ}C$)	Diferencia ($^{\circ}C$)	Desplazamiento (μm)
h2	37,000	1,000	0,471
h3	36,200	1,800	0,748
h4	35,100	2,900	0,979
h5	34,400	3,600	1,009
h6	33,700	4,300	1,127
h7	32,800	5,200	1,630
h8	32,200	5,800	1,736
h9	31,700	6,300	2,011
h10	31,400	6,600	2,027

Tabla 3. Variación en desplazamiento de una resistencia de 100Ω a $1/2W$, frente a un descenso de temperatura.

Haciendo uso de los valores presentados en la tabla 3, se realiza una gráfica (figura 147) y se determina una relación de tendencia lineal o de mínimos

cuadrados para definir de forma similar que el caso anterior, la ecuación 86, con la que se pretende caracterizar el nivel de deformación en torno a un valor en diferencia de temperatura.

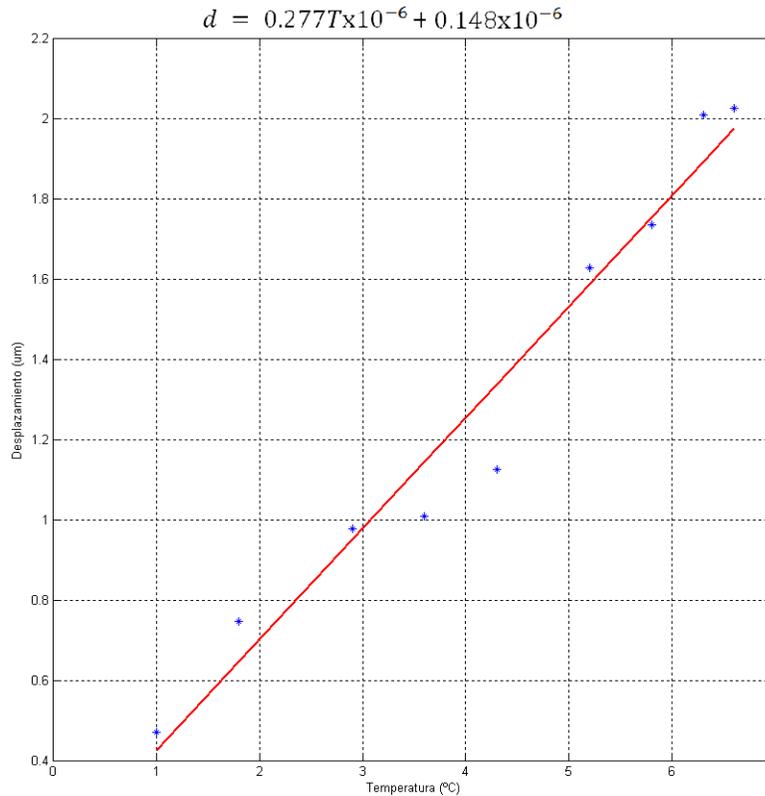


Figura 147. Temperatura vs. Desplazamiento.

$$d = 0.277T \times 10^{-6} + 0.148 \times 10^{-6} \quad (86)$$

Siendo d =Desplazamiento sufrido y T =Temperatura registrada

Del mismo modo se ha obtenido el valor de $r^2 = 0.962$ para el error cuadrático, en el que la mayor proximidad a 1 representa un nivel de desviación bajo, siendo el caso los datos obtenidos con la prueba realizada.

En este ensayo se menciona que los datos si bien son relacionados con un nivel de temperatura descendente, los mismos poseen una diferencia, con la cual es posible realizar el proceso de interferometría holográfica en el que se determina el grado de desplazamiento relacionando un registro holográfico como un punto de referencia, a partir del cual (figura 145) se observa que las variaciones introducidas provocan un aumento de franjas sobre el registro, indicando un nivel de deformación mayor.

3. CONCLUSIONES

Mediante las pruebas realizadas durante esta investigación se logro determinar la efectividad de la técnica empleada para la cuantificación de microdeformaciones en objetos, debidas a diferentes cambios de variables físicas como temperatura, presión o diferencia de potencial. Destacándose el alto grado de resolución en las medidas; precisión que solo es posible alcanzar empleando métodos ópticos, debido a que el instrumento de medida no tiene contacto físico alguno con la muestra, permitiendo así tener un mayor grado de certeza en los resultados obtenidos.

Se establece la técnica de interferometría holográfica de doble exposición como una técnica apta y no invasiva para el análisis de microdeformaciones, contando con la holografía como técnica de alta resolución para registro de las variaciones.

Como subproducto del trabajo realizado se logro implementar un módulo en el software de análisis desarrollado, diseñado especialmente para holografía digital, el cual es capaz de reconstruir el campo óptico característico en el registro de perfiles interferométricos, cabe resaltar que el módulo cuenta con muchas opciones de acondicionamiento digital de imágenes holográficas, lo que permite obtener hologramas de muy alta calidad, logrando solucionar o atenuar los efectos más comunes en holografía, como lo son la presencia del orden cero de difracción y el ruido Speckle en las imágenes.

El software desarrollado solventa muchas de las necesidades, tanto para holografía digital como para interferometría digital y tratamiento digital de imágenes, en donde se provee al usuario de múltiples herramientas para el mejoramiento de la calidad de imágenes, principalmente de origen interferométrico, aunque la parte de filtros se puede aplicar para cualquier imagen convencional; además del uso de módulos como el de perfil de imagen para determinar los niveles de intensidad de una imagen o desenvolvimiento de fase con múltiples aplicaciones en el procesamiento de demodulación en imágenes codificadas en fase 2 .

Por medio de la técnica de interferometría holográfica digital se permitió el desarrollo de un software que aporta en forma general muchos de los conceptos para análisis de deformaciones diversas registradas en hologramas y ampliación del concepto de aplicación holográfica.

Se desarrolló un sistema con el que se puede localizar microdeformaciones debidas a diversos fenómenos físicos que pueden deformar y/o degradar distintos

objetos, al igual que determinar la magnitud y dirección del desplazamiento sufrido.

Se resalta que la calidad de las imágenes depende principalmente de los factores de reconstrucción numérica de imagen de los hologramas adquiridos, en donde juegan un papel importante la distancia, tamaño de registro de pixel de la cámara y la longitud de onda del laser utilizado, información que se suministra en esta etapa.

El uso de la técnica holográfica como una de las mejores técnicas de análisis óptico se debe a que es inherente a factores como iluminación (en bajos niveles), traslucidez, opacidad o rugosidad ya que solo adquiere la información presente en el medio independiente del objeto que se esté analizando.

En lo que respecta al proyecto de investigación es el primero encaminado en el área de la interferometría holográfica digital, que a pesar de ser una técnica con algunos años, solo hasta ahora se encuentra en auge su uso extendido a análisis de tipo óptico, gracias al vertiginoso desarrollo de tecnología en dispositivos de captura o registro de imágenes de muy alta resolución como las cámaras CMOS o CCD, sentando las bases en las que la física es un área que provee muchas utilidades a la ciencia, en donde no solo es tarea de los físicos idear y emplear los conocimientos para análisis de diversos fenómenos, permitiendo que profesionales de distintas disciplinas como la ingeniería electrónica puedan aportar en lo que a desarrollos, diseños y modelación se refiere, destacando que el proyecto es una herramienta innovadora a nivel regional y nacional (no encontrando un software con el mismo nivel de robustez).

Finalmente, es importante mencionar que en cuanto al objetivo general de este proyecto se puede decir que se cumplió a cabalidad, ya que se pudo diseñar y generar un software de análisis e identificación de deformaciones a escala mínima en los que se puede además de distinguir el espacio de deformación incorporarse en un instrumento de alta resolución. El mismo objetivo ha sido logrado paulatinamente mediante el alcance de cada uno de los objetivos específicos relacionados a largo del desarrollo de este trabajo.

4. RECOMENDACIONES

Implementar un montaje experimental propio en la Universidad de Nariño para la realización de este tipo de prácticas experimentales, teniendo en cuenta que ya se poseen algunos elementos importantes como cámara CMOS, divisor de haz cubico y láser.

Realizar un seccionamiento del software para mejorar y optimizar los algoritmos implementados de manera general, como son los afines con el desenvolvimiento de fase como estructura independiente de estudio en múltiples tesis de doctorado.

Diseñar y complementar el sistema con uno que permita la captura de registros en un aspecto axial en torno al objeto, logrando una imagen de alta calidad de las características del objeto en un *stack* (imagen tridimensional).

Trasladar el código a un software de programación libre, ampliando el área de distribución del mismo independizándolo de Matlab.

Realizar estudios que enmarquen un sistema en extenso de la holografía arcoíris que trata de hacer uso de diferentes registros por laser en longitudes de ondas diferentes para reconstruir hologramas a color.

Aplicar la técnica desarrollada en esta investigación al estudio y medición de películas delgadas como las relacionadas con los Laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, optimizando el tiempo de análisis y procesamiento mediante un equipo de cómputo con buenos recursos de máquina.

Continuar con la expansión de este proyecto que aun tiene mucho por ofrecer y desarrollar así como también con la investigación en general, siendo un área, aunque muy escuchada poco explotada, sin la necesidad de esperar nueva tecnología sino con la posibilidad de desarrollo de producto nacional.

BIBLIOGRAFÍA

BELENDEZ, Augusto. Holografía: Ciencia, arte y tecnología. Universidad de Alicante. 2009.

BROOKS, R. E. Interferometry with a holographically reconstructed reference beam. 1965.

CASTILLÓN, Trujillo Juan Carlos. "INTERFERÓMETRO TALBOT DE DESDOBLAMIENTO COMBINADO". Universidad EAFIT. Artículo Científico.

"DIGITAL HOLOGRAPHY". [En línea]. Disponible en: <http://www.ljmu.ac.uk/GERI/79690.htm>

EICHLER, H.J. EPPICH, B. FISCHER, J. GÜTHER, R. GURZADYAN, G. G. HERMERSCHMIDT, A. "LASER PHYSICS AND APPLICATIONS". Springer-Verlag. 2005.

FERNÁNDEZ, Sempere Julio. "LA INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA COMO TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN FASE LIQUIDA". Tesis Doctoral. Universidad de Alicante-España. 1983.

FINN, Edward. ALONSO, Marcelo. "Campos Y Ondas". Volumen II. México. Editorial Pearson. 1998. 1030 págs.

FRANCO, Irene. Metrología.

FRAUEL, Y., TAJAHUERCE, E., CASTRO, M., and JAVIDI, B. Distortion-tolerant three dimensional object recognition with digital holography. 2001.

GABOR, Dennis. Optical image synthesis by holographic Fourier transformation. 1965.

GENS, R. Two-Dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry: Developments and New Challenges. 2003.

GOLDSTEIN, Richard M. ZEBKER, Howard A. "SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY: TWO-DIMENSIONAL PHASE UNWRAPPING". Radio Science, Volume 23. 1988.

GONZÁLEZ, Sandri E. , J. R. “ESTUDIO MEDIANTE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE SPECKLE (DSSPI) DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DENTAL EN EL PROCESO DE LA ENDODONCIA”. Artículo Científico.

GUENTHER, Robert. Modern Optics. Duke University.

HECHT, Eugene. “OPTICS”.Addison Wesley. 2002.

HERRERA, Jorge. “TRATAMIENTO DEL RUIDO EN HOLOGRAFÍA DIGITAL”. 2004.

Hirsh, Sven. “Digital and Analog Hologram Tomography for Medical Applications”. 2006.

HSU, Hwei p. “Análisis De Fourier”.

HUSSEIN, Abdul Rahman. Three Dimensional Fourier Fringe Analysis and Phase Unwrapping. 2007.

JONCS, R. and WYKES, C. Holographic and speckle interferometry. Second edition.Pág 19.

KEMAO, Qian. Windowed Fourier Transform Method For Demodulation Of Carrier Fringes.

KREIS, T. y JÜPTNER W. Suppresion of the dc tem in digital holography.1997.

MONROY, Freddy. RINCÓN, Oscar. “OBTENCIÓN DE FRANJAS DE DEFORMACIÓN POR MEDIO DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL DE DOBLE EXPOSICIÓN”. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. 2006.

POWELL, R. Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction.1965.

ROBINSON, D. and REID, G. Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques. 1993.

RODRÍGUEZ, Vera R. “ALGUNAS APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA INTERFEROMETRÍA ELECTRÓNICA DE PATRONES DE MOTEADO”. Departamento de Metrología Óptica, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. México.

SALCEDO, Pinzón Jaime. “MANUAL DE LABORATORIO DE ÓPTICA FÍSICA”. Universidad Industrial De Santander-Bucaramanga, 1989.134 págs.

SAXBY, Graham. "PRACTICAL HOLOGRAPHY". Institute of Physics Publishing Prentice Hall International. 1994.

SCHNARS, U. and JUEPTNER, W. "DIGITAL HOLOGRAPHY". Springer-Verlag. 2005.

VALIN, Rivera José Luis. PÉREZ, Jorge Ricardo. "HOLOGRAFIA DIGITAL APLICADA NA ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS EM CONDIÇÕES SUBMERSAS". Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Habana, Cuba. Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Amazonas (EST/UEA), Brasil.

VÉLEZ, José Francisco. Visión por computador.

VINCITORIO, Fabio. Aplicación Del Láser De Potencia Y La Interferometría Holográfica Al Corte Y Estudio De Partes E De Núcleos De Balastos Para Equipos Auxiliares De Iluminación. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná.

WEINER, John. "LIGHT-MATTER INTERACTION". Wiley Interscience. 2003.

ZAMBRANO, Pedro. Metrología y normalización en Interferometría.

ZHANG, YG Lu. "MINIMUM L₀-NORM TWO-DIMENSIONAL PHASE UNWRAPPING ALGORITHM BASED ON THE DERIVATIVE VARIANCE CORRELATION MAP". Institute of Optical Communication Engineering, School of Engineering & Management, Nanjing University, Nanjing, China.

ANEXOS

ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DEL MICROCONTROLADOR

```
#include <16F877A.h> // PIC
#fuses XT,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#use delay(clock=4000000) // Cristal
#use rs232(baud=2400, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7,bits=8)
//#use standard_io(B)
#BYTE TRISA = 0x85
#BYTE PORTA = 0x05
#BYTE TRISB = 0x86
#BYTE PORTB = 0x06
#BYTE TRISD = 0x88
#BYTE PORTD = 0x08
#BYTE TRISE = 0x89
#BYTE PORTE = 0x09
INT8 valor; // variable de recepcion serial
INT8 pasos=12;
INT8 mA,mB,mH;
INT8 n;
INT16 t=100;
INT8 estado;
INT8 laser;

void der() // giro derecha
{
    switch (estado)
    {
        case 3:estado=6;break;
        case 6:estado=12;break;
        case 12:estado=9;break;
        case 9:estado=3;break;
        return;
    }
}

void izq() // giro izquierda
{
    switch (estado)
    {
        case 3:estado=9;break;
        case 9:estado=12;break;
        case 12:estado=6;break;
        case 6:estado=3;break;
        return;
    }
}

void main()
{
    TRISA = 0x00;
    TRISB = 0x00;
    TRISD = 0x00;
    TRISE = 0x00;
    mH=0x09;
    PORTA = mH;
    mA=0x09;
    PORTB = mA;
    mB=0x09;
    PORTD = mB;
```

```

PORTE=0x00;
laser=0;

while(true)
{
  valor = getc(); // valor del serial
  switch (valor)
  {
    case 'r': // motor r
      estado=mA;
      for (n=1;n<=pasos;n++)
      {
        der();
        mA=estado;
        portB=mA;
        delay_ms(t);
      }
      putc('r');
      break;

    case 'o':
      for (n=1;n<=pasos;n++)
      {
        izq();
        mA=estado;
        portB=mA;
        delay_ms(t);
      }
      estado=mB;
      for (n=1;n<=pasos;n++)
      {
        der();
        mB=estado;
        portD=mB;
        delay_ms(t);
      }
      putc('o');
      break;

    case 'i':
      for (n=1;n<=pasos;n++)
      {
        izq();
        mB=estado;
        portD=mB;
        delay_ms(t);
      }
      putc('i');
      break;

    case 'h': // giro disco
      estado=mH;
      for (n=1;n<=pasos/2;n++)
      {
        der();
        mH=estado;
        portA=mH;
        delay_ms(t);
      }
      putc('h');
  }
}

```

```
break;

case '!': // giro de disco
if (laser==1)
{
    laser=0;
}
else
{
    laser=1;
}
portE=laser;
putc('!');
break;
}
}
}
```

ANEXO B. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA INTERFEROMETRIA

```
function varargout = interferometria(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @interferometria_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @interferometria_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

function interferometria_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
movegui(hObject,'center')
% Choose default command line output for interferometria
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

function varargout = interferometria_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function pushbutton_aceptar_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext1 pathname1 filename1 ext2 pathname2 filename2 pathname3 filename3...
    pathname_r filename_r pathname_o filename_o ext_c pathname_c filename_c...
    des_h des_v distancia lw px holograma direccion pos

posicion=0;

[file1,path1,Index1] = uiputfile( ...
    {'*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
    '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
    '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
    'Interferogramas',[direccion,'Interferograma']);

if isequal(file1,0)
else
    direccion=path1;
end

[file2,path2,Index2] = uiputfile( ...
    {'*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
    '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
    '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
    'Mapas de Fase',[direccion,'Mapa de Fase']);

if isequal(file2,0)
else
```

```

    direccion=path2;
end

[file3,path3] = uiputfile( ...
    {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}, ...
    'Archivos en Matfile',[direccion,'Archivos']);

distancia=str2double(get(handles.edit_distancia,'String'))*1e6;
lw=str2double(get(handles.edit_lw,'String'))/1e3;
px=str2double(get(handles.edit_px,'String'));
horizontal=str2double(get(handles.edit_horizontal,'String'));
vertical=str2double(get(handles.edit_vertical,'String'));

if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
    if ~isempty(filename1) && ~isequal(filename1,0) && ~isempty(filename2) && ~isequal(filename2,0)...
        && ~isempty(filename_c) && ~isequal(filename_c,0)
        if strcmp(pathname1,pathname2) && strcmp(pathname1,pathname_c) &&
            strcmp(pathname2,pathname_c)% compara direcciones
            if strcmp(ext1,ext2) && strcmp(ext1,ext_c) && strcmp(ext2,ext_c)% compara extensiones
                [a1,b1]=separacion(filename1);
                [a2,b2]=separacion(filename2);
                [ac,bc]=separacion(filename_c);
            if strcmp(a1,a2) && strcmp(a1,ac) && strcmp(a2,ac) % compra nombres
                if b1<b2 % determina si valor inicial es menor a final
                    hol=imread([pathname_c,filename_c]); % lee el primer archivo
                    hol=im2double(hol(:,:,1));
                    [M,N]=size(hol); % determina la dimension de la imagen

                    if get(handles.checkbox_referencia,'Value')==1 % referencia
                        r=imread([pathname_r,filename_r]);r=im2double(r(:,:,1));
                    else
                        r=zeros(M,N);
                    end
                    if get(handles.checkbox_objeto,'Value')==1 % objeto
                        o=imread([pathname_o,filename_o]);o=im2double(o(:,:,1));
                    else
                        o=zeros(M,N);
                    end

                    hol=hol-r-o;
                    hola=hol-mean(mean(hol));

                try
                    if get(handles.checkbox_dinamica,'Value')==1 % inclinacion
                        holograma=hola;
                        waitfor(inclinacion)
                        if isempty(des_h) || isempty(des_v)
                            horizontal=0;vertical=0;
                            set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(0));
                            set(handles.edit_vertical,'String',num2str(0));
                        else
                            horizontal=des_h;vertical=des_v;
                            set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(des_h));
                            set(handles.edit_vertical,'String',num2str(des_v));
                        end
                    end
                end

                if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
                    rec=fresnel_trans(hola,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
                    rec=fftshift(rec);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

figura=figure('Name','Enmascaramiento','NumberTitle','Off','Toolbar','none','Menubar','none');
rec=wiener2(abs(rec),[3 3]);
imagesc(log(rec)),axis image,colormap gray;grid on

hol=fftshift(fft2(hol));
hol=circshift(hol,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
    [hol,c]=mascara(hol,'Interno');
else
    [hol,c]=mascara(hol,'Externo');
end
hol=circshift(hol,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
hol=ifft2(ifftshift(hol));

if isempty(c)
    c=[1 1 N-1 M-1];
else
    close(figura)
end
end

rec1=fresnel_trans(hol,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
rec1=fftshift(rec1); % amplitud base
fase1=angle(rec1); % fase base

for k=b1:b2
    if k~=bc;
        set(handles.text_proceso,'String',[num2str(bc),'_',num2str(k)]; % comparando
        pause(1)
        holc=imread([pathname1,a1,num2str(k),ext1]);holc=im2double(holc(:,:,1));
        holc=holc-r-o;

        if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
            holc=fftshift(fft2(holc));
            holc=circshift(holc,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
            if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
                holc=mascara(holc,'Interno',c);
            else
                holc=mascara(holc,'Externo',c);
            end
            holc=circshift(holc,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
            holc=ifft2(ifftshift(holc));
        end
        rec2=fresnel_trans(holc,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
        rec2=fftshift(rec2); % amplitud a comparar
        fase2=angle(rec2); % fase a comparar

        %diferencias
        rec=rec1-rec2;
        fase=fase1-fase2;
        fase=fase+2*pi*(fase<0);

        if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
            if get(handles.radiobutton_recortar,'Value')==1
                rec=rec(c(2):c(2)+c(4),c(1):c(1)+c(3));
                fase=fase(c(2):c(2)+c(4),c(1):c(1)+c(3));
            end
        end
    end
end

```

```

if get(handles.checkbox_wff,'Value')==1 % filtro
    sigma=str2double(get(handles.edit_sigma,'String'));
    fxy=str2double(get(handles.edit_fxy,'String'));
    resolucion=str2double(get(handles.edit_r,'String'));
    thr=str2double(get(handles.edit_thr,'String'));

    fase=exp(1i*fase);
    fase=wff2(fase,sigma,fxy,resolucion,thr);
    fase=-angle(fase);
end

rec=abs(rec);

% guarda amplitud
if isequal(file1,0) % si no se a guardado nada
else % de lo contrario
    switch Index1 % segun formato seleccionado asigna extension
        case 1
            ftm='jpg';
        case 2
            ftm='bmp';
        case 3
            ftm='png';
    end
    holo=log(abs(rec));
    vmin=min(min(holo));vmax=max(max(holo)); % regula nivel
    holo=(holo-vmin)*255/(vmax-vmin);
    imwrite(uint8(holo),[path1,file1(1:end-4),' ',num2str(bc),'_',num2str(k),' ',ftm],ftm); %
guarda archivo
end
% guarda fase
if isequal(file2,0) % si no se a guardado nada
else % de lo contrario
    switch Index2 % segun formato seleccionado asigna extension
        case 1
            ftm='jpg';
        case 2
            ftm='bmp';
        case 3
            ftm='png';
    end
    holo=fase;
    vmin=min(min(holo));vmax=max(max(holo));
    holo=(holo-vmin)*255/(vmax-vmin);
    imwrite(uint8(holo),[path2,file2(1:end-4),' ',num2str(bc),'_',num2str(k),' ',ftm],ftm); %
guarda archivo
end
% guarda en matfile
if b1==bc
    if k==b1+1;
        pos={hol*0};
    end
else
    if k==b1;
        pos={hol*0};
    end
end
posicion=posicion+1;
pos(posicion)=(rec);
posicion=posicion+1;

```



```

else
    horizontal=des_h;vertical=des_v;
    set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(des_h));
    set(handles.edit_vertical,'String',num2str(des_v));
end
end

if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
    rec=fresnel_trans(hola,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
    rec=fftshift(rec);
    figura=figure('Name','Enmascaramiento','NumberTitle','Off','ToolBar','none','MenuBar','none');
    rec=wiener2(abs(rec),[3 3]);
    imagesc(log(rec)),axis image,colormap gray;grid on

    hol=fftshift(fft2(hol));
    hol=circshift(hol,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
    if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
        [hol,c]=mascara(hol,'Interno');
    else
        [hol,c]=mascara(hol,'Externo');
    end
    hol=circshift(hol,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
    hol=ifft2(ifftshift(hol));

    if isempty(c)
        c=[1 1 N-1 M-1];
    else
        close(figura)
    end
end

rec1=fresnel_trans(hol,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
rec1=fftshift(rec1); % amplitud base
fase1=angle(rec1); % fase base

if length(holo)>1
    for k=1:length(holo)
        if k~=val;
            set(handles.text_proceso,'String',[num2str(val),'_',num2str(k)]); % comparando
            pause(1)
            holc=holo{k};holc=im2double(holc(:, :, 1));
            holc=holc-r-o;
            if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
                holc=fftshift(fft2(holc));
                holc=circshift(holc,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
                if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
                    holc=mascara(holc,'Interno',c);
                else
                    holc=mascara(holc,'Externo',c);
                end
            end
            holc=circshift(holc,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
            holc=ifft2(ifftshift(holc));
        end
        rec2=fresnel_trans(holc,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
        rec2=fftshift(rec2); % amplitud a comparar
        fase2=angle(rec2); % fase a comparar

        %diferencias
        rec=rec1-rec2;
        fase=fase1-fase2;
    end
end

```

```

fase=fase+2*pi*(fase<0);

if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
    if get(handles.radiobutton_recortar,'Value')==1
        rec=rec(c(2):c(2)+c(4),c(1):c(1)+c(3));
        fase=fase(c(2):c(2)+c(4),c(1):c(1)+c(3));
    end
end
if get(handles.checkbox_wff,'Value')==1 % filtro
    sigma=str2double(get(handles.edit_sigma,'String'));
    fxy=str2double(get(handles.edit_fxy,'String'));
    resolucio=str2double(get(handles.edit_r,'String'));
    thr=str2double(get(handles.edit_thr,'String'));

    fase=exp(1i*fase);
    fase=wff2(fase,sigma,fxy,resolucio,thr);
    fase=-angle(fase);
end

rec=abs(rec);

% guarda amplitud
if isequal(file1,0) % si no se a guardado nada
else % de lo contrario
    switch Index1 % segun formato seleccionado asigna extension
        case 1
            ftm='jpg';
        case 2
            ftm='bmp';
        case 3
            ftm='png';
    end
    hg=log(abs(rec));
    vmin=min(min(hg));vmax=max(max(hg));
    hg=(hg-vmin)*255/(vmax-vmin);
    imwrite(uint8(hg),[path1,file1(1:end-4)'],'_','num2str(val),'_',num2str(k),'_',ftm],ftm); % guarda
archivo

end
% guarda fase
if isequal(file2,0) % si no se a guardado nada
else % de lo contrario
    switch Index2 % segun formato seleccionado asigna extension
        case 1
            ftm='jpg';
        case 2
            ftm='bmp';
        case 3
            ftm='png';
    end
    hg=fase;
    vmin=min(min(hg));vmax=max(max(hg));
    hg=(hg-vmin)*255/(vmax-vmin);
    imwrite(uint8(hg),[path2,file2(1:end-4)'],'_','num2str(val),'_',num2str(k),'_',ftm],ftm); % guarda
archivo

end
% guarda en matfile
if 1==val
    if k==2;
        pos={hol*0};
    end
end

```

```

        else
            if k==1;
                pos={hol*0};
            end
        end
        posicion=posicion+1;
        pos(posicion)={rec};
        posicion=posicion+1;
        pos(posicion)={fase};
    end
end
if isequal(file3,0) % si no se a guardado nada
else % de lo contrario
    clear holo
    holo=pos;
    save([path3,file3],'holo'); % guarda
end
else
    waitfor(msgbox('No es posible realizar un análisis con un solo subarchivo','HID','Error','Modal'))
end
else
    msgbox('Archivo de datos no válido','HID','Error','Modal')
end
else
    msgbox('No ha seleccionado un archivo','HID','Error','Modal')
end
end
end

```

```

filename1=[];
filename2=[];
filename3=[];
filename_c=[];
filename_r=[];
filename_o=[];

```

```
close(gcf)
```

```

function pushbutton_matfile_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname3 filename3 direccion
[filename3,pathname3] = uigetfile( ...
    {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}, ...
    'Matfile',direccion);
if isequal(filename3,0) % si no se a cargado nada
    set(handles.pushbutton_referencia,'String','Matfile')
    set(handles.popupmenu_comparar,'Enable','Off')
else
    load([pathname3,filename3]); % carga archivo
    p=whos('holo');
    if ~isempty(p)
        set(handles.popupmenu_comparar,'String',num2str((1:length(holo))))
    end
    direccion=pathname3;
    set(handles.pushbutton_matfile,'String',filename3)
    set(handles.popupmenu_comparar,'Enable','On')
end
end

```

```

function radiobutton_matfile_Callback(hObject, eventdata, handles)
global filename_r filename_o
filename_r=[];
filename_o=[];

```

```

set(handles.checkbox_referencia,'Value',0)
set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_referencia,'String','Referencia')
set(handles.checkbox_objeto,'Value',0)
set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_objeto,'String','Objeto')

set(handles.radiobutton_matfile,'Value',1)
set(handles.radiobutton_imagen,'Value',0)
set(handles.pushbutton_inicial,'Enable','off')
set(handles.pushbutton_final,'Enable','off')
set(handles.pushbutton_comparar,'Enable','off')
set(handles.pushbutton_matfile,'Enable','on')
set(handles.popupmenu_comparar,'Enable','on')

function radiobutton_imagen_Callback(hObject, eventdata, handles)
global filename_r filename_o
filename_r=[];
filename_o=[];

set(handles.checkbox_referencia,'Value',0)
set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_referencia,'String','Referencia')
set(handles.checkbox_objeto,'Value',0)
set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_objeto,'String','Objeto')

set(handles.radiobutton_imagen,'Value',1)
set(handles.radiobutton_matfile,'Value',0)
set(handles.pushbutton_inicial,'Enable','on')
set(handles.pushbutton_final,'Enable','on')
set(handles.pushbutton_comparar,'Enable','on')
set(handles.pushbutton_matfile,'Enable','off')
set(handles.popupmenu_comparar,'Enable','off')

function pushbutton_final_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext2 pathname2 direccion filename2
[filename2,pathname2] = uigetfile( ...
{ '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
  '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
  '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}, ...
'Archivo Final',direccion);
if isequal(filename2,0) % si no se a cargado nada
set(handles.pushbutton_final,'String','Final')
else
direccion=pathname2;
ext2=filename2(end-3:end);
set(handles.pushbutton_final,'String',filename2)
end

function pushbutton_inicial_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext1 pathname1 direccion filename1
[filename1,pathname1] = uigetfile( ...
{ '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
  '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
  '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}, ...
'Archivo Inicial',direccion);
if isequal(filename1,0)
set(handles.pushbutton_inicial,'String','Inicial')
else
direccion=pathname1;

```

```

    ext1=filename1(end-3:end);
    set(handles.pushbutton_inicial,'String',filename1)
end

function pushbutton_comparar_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext_c pathname_c direccion filename_c
[filename_c,pathname_c] = uigetfile( ...
{ '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg); ...
  '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp); ...
  '*.png','Portable Network Graphics (*.png)', ...
  'Archivo de Comparación',direccion);
if isequal(filename_c,0) % si no se a cargado nada
set(handles.pushbutton_comparar,'String','Comparar')
else
    direccion=pathname_c;
    ext_c=filename_c(end-3:end);
    set(handles.pushbutton_comparar,'String',filename_c)
end

function edit_horizontal_Callback(hObject, eventdata, handles)
horizontal=str2double(get(handles.edit_horizontal,'String'));
if horizontal<-3*pi || horizontal>3*pi || ~isnumeric(horizontal) || isnan(horizontal)
    set(handles.edit_horizontal,'String','0')
end

function edit_vertical_Callback(hObject, eventdata, handles)
vertical=str2double(get(handles.edit_vertical,'String'));
if vertical<-3*pi || vertical>3*pi || ~isnumeric(vertical) || isnan(vertical)
    set(handles.edit_vertical,'String','0')
end

function checkbox_dinamica_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_dinamica,'value')==1
    set(handles.edit_horizontal,'Enable','off')
    set(handles.edit_vertical,'Enable','off')
else
    set(handles.edit_horizontal,'Enable','on')
    set(handles.edit_vertical,'Enable','on')
end

function checkbox_enmascaramiento_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1
    set(handles.radiobutton_interno,'Enable','on')
    set(handles.radiobutton_externo,'Enable','on')
    set(handles.radiobutton_recortar,'Enable','on')
else
    set(handles.radiobutton_interno,'Enable','off')
    set(handles.radiobutton_externo,'Enable','off')
    set(handles.radiobutton_recortar,'Enable','off')
end

function edit_distancia_Callback(hObject, eventdata, handles)
distancia=str2double(get(handles.edit_distancia,'String'));
if ~isnumeric(distancia) || isnan(distancia)
    set(handles.edit_distancia,'String',num2str(0.5));
end

function edit_lw_Callback(hObject, eventdata, handles)
lw=str2double(get(handles.edit_lw,'String'));
if ~isnumeric(lw) || isnan(lw)

```

```

    set(handles.edit_lw,'String',num2str(632.8));
end

function edit_px_Callback(hObject, eventdata, handles)
px=str2double(get(handles.edit_px,'String'));
if ~isnumeric(px) || isnan(px)
    set(handles.edit_px,'String',num2str(6.5));
end

function edit_sigma_Callback(hObject, eventdata, handles)
sigma=str2double(get(handles.edit_sigma,'String'));
if ~isnumeric(sigma) || isnan(sigma)
    set(handles.edit_sigma,'String',num2str(2));
end

function edit_fxy_Callback(hObject, eventdata, handles)
fxy=str2double(get(handles.edit_fxy,'String'));
if ~isnumeric(fxy) || isnan(fxy)
    set(handles.edit_fxy,'String',num2str(1));
end

function edit_r_Callback(hObject, eventdata, handles)
r=str2double(get(handles.edit_r,'String'));
if ~isnumeric(r) || isnan(r)
    set(handles.edit_r,'String',num2str(0.5));
end

function edit_thr_Callback(hObject, eventdata, handles)
thr=str2double(get(handles.edit_thr,'String'));
if ~isnumeric(thr) || isnan(thr)
    set(handles.edit_thr,'String',num2str(3));
end

function checkbox_referencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_r direccion filename_r
if isempty(filename_r);
    if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
        [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
            { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg); ...
              '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp); ...
              '*.png','Portable Network Graphics (*.png)', ...
              'Referencia',direccion);
    else
        [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
            {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)', ...
            'Referencia',direccion);
    end
    if isequal(filename_r,0) % si no se a cargado nada
        set(handles.checkbox_referencia,'Value',0)
        filename_r=[];
    else
        direccion=pathname_r;
        set(handles.pushbutton_referencia,'String',filename_r)
        set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','On')
    end
else
    if get(handles.checkbox_referencia,'Value')==1
        set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','On')
    else
        set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','Off')
    end
end

```

```

end
end

function checkbox_objeto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_o direccion filename_o
if isempty(filename_o);
    if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
        [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
            { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
              '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
              '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}, ...
            'Objeto',direccion);
    else
        [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
            {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}, ...
            'Objeto',direccion);
    end
    if isequal(filename_o,0) % si no se a cargado nada
        set(handles.checkbox_objeto,'Value',0)
        filename_o=[];
    else
        direccion=pathname_o;
        set(handles.pushbutton_objeto,'String',filename_o)
        set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','On')
    end
else
    if get(handles.checkbox_objeto,'Value')==1
        set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','On')
    else
        set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','Off')
    end
end
end

function pushbutton_referencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_r direccion filename_r
name_r=filename_r;
path_r=pathname_r;
if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
    [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
        { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
          '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
          '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}, ...
        'Referencia',direccion);
else
    [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
        {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}, ...
        'Referencia',direccion);
end
if isequal(filename_r,0) % si no se a cargado nada
    filename_r=name_r;
    pathname_r=path_r;
else
    direccion=pathname_r;
    set(handles.pushbutton_referencia,'String',filename_r)
end
end

function pushbutton_objeto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_o direccion filename_o
name_o=filename_o;
path_o=pathname_o;

```

```

if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
    [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
    { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
      '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
      '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
      'Objeto',direccion);
else
    [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
    {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}; ...
      'Objeto',direccion);
end
if isequal(filename_o,0) % si no se a cargado nada
    filename_o=name_o;
    pathname_o=path_o;
else
    direccion=pathname_o;
    set(handles.pushbutton_objeto,'String',filename_o)
end

function checkbox_wff_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_wff,'Value')==1
    set(handles.edit_sigma,'Enable','on')
    set(handles.edit_fxy,'Enable','on')
    set(handles.edit_r,'Enable','on')
    set(handles.edit_thr,'Enable','on')
else
    set(handles.edit_sigma,'Enable','off')
    set(handles.edit_fxy,'Enable','off')
    set(handles.edit_r,'Enable','off')
    set(handles.edit_thr,'Enable','off')
end

function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
global filename1 filename2 filename3 filename_c filename_r filename_o pos
filename1=[];
filename2=[];
filename3=[];
filename_c=[];
filename_r=[];
filename_o=[];

delete(hObject);

```

ANEXO C. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA HOLOGRAFIA

```
function varargout = holografia(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @holografia_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @holografia_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

function holografia_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
movegui(hObject,'center')
% Choose default command line output for holografia
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

function varargout = holografia_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function edit_horizontal_Callback(hObject, eventdata, handles)
horizontal=str2double(get(handles.edit_horizontal,'String'));
if horizontal<-3*pi || horizontal>3*pi || ~isnumeric(horizontal) || isnan(horizontal)
    set(handles.edit_horizontal,'String','0')
end

function edit_vertical_Callback(hObject, eventdata, handles)
vertical=str2double(get(handles.edit_vertical,'String'));
if vertical<-3*pi || vertical>3*pi || ~isnumeric(vertical) || isnan(vertical)
    set(handles.edit_vertical,'String','0')
end

function checkbox_dinamica_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_dinamica,'value')==1
    set(handles.edit_horizontal,'Enable','off')
    set(handles.edit_vertical,'Enable','off')
else
    set(handles.edit_horizontal,'Enable','on')
    set(handles.edit_vertical,'Enable','on')
end

function edit_distancia_Callback(hObject, eventdata, handles)
distancia=str2double(get(handles.edit_distancia,'String'));
if ~isnumeric(distancia) || isnan(distancia)
    set(handles.edit_distancia,'String',num2str(0.5));
end
```

```

function edit_lw_Callback(hObject, eventdata, handles)
lw=str2double(get(handles.edit_lw,'String'));
if ~isnumeric(lw) || isnan(lw)
    set(handles.edit_lw,'String',num2str(632.8));
end

function edit_px_Callback(hObject, eventdata, handles)
px=str2double(get(handles.edit_px,'String'));
if ~isnumeric(px) || isnan(px)
    set(handles.edit_px,'String',num2str(6.5));
end

function checkbox_referencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_r direccion filename_r
if isempty(filename_r);
    if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
        [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
            { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
              '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
              '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}, ...
            'Referencia',direccion);
    else
        [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
            {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}, ...
            'Referencia',direccion);
    end
    if isequal(filename_r,0) % si no se a cargado nada
        set(handles.checkbox_referencia,'Value',0)
        filename_r=[];
    else
        direccion=pathname_r;
        set(handles.pushbutton_referencia,'String',filename_r)
        set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','On')
    end
else
    if get(handles.checkbox_referencia,'Value')==1
        set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','On')
    else
        set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','Off')
    end
end

function checkbox_objeto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_o direccion filename_o
if isempty(filename_o);
    if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
        [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
            { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
              '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
              '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}, ...
            'Objeto',direccion);
    else
        [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
            {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}, ...
            'Objeto',direccion);
    end
    if isequal(filename_o,0) % si no se a cargado nada
        set(handles.checkbox_objeto,'Value',0)
        filename_o=[];
    else

```

```

        direccion=pathname_o;
        set(handles.pushbutton_objeto,'String',filename_o)
        set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','On')
    end
else
    if get(handles.checkbox_objeto,'Value')==1
        set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','On')
    else
        set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','Off')
    end
end
end

function pushbutton_inicial_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext1 pathname1 direccion filename1
[filename1,pathname1] = uigetfile( ...
{ '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg); ...
  '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp); ...
  '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
'Archivo Inicial',direccion);
if isequal(filename1,0) % si no se a cargado nada
    set(handles.pushbutton_inicial,'String','Inicial')
else
    direccion=pathname1;
    ext1=filename1(end-3:end);
    set(handles.pushbutton_inicial,'String',filename1)
end

function pushbutton_final_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext2 pathname2 direccion filename2
[filename2,pathname2] = uigetfile( ...
{ '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg); ...
  '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp); ...
  '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
'Archivo Final',direccion);
if isequal(filename2,0) % si no se a cargado nada
    set(handles.pushbutton_final,'String','Final')
else
    direccion=pathname2;
    ext2=filename2(end-3:end);
    set(handles.pushbutton_final,'String',filename2)
end

function checkbox_enmascaramiento_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1
    set(handles.radiobutton_interno,'Enable','on')
    set(handles.radiobutton_externo,'Enable','on')
    set(handles.radiobutton_recortar,'Enable','on')
else
    set(handles.radiobutton_interno,'Enable','off')
    set(handles.radiobutton_externo,'Enable','off')
    set(handles.radiobutton_recortar,'Enable','off')
end

function checkbox_pasaltos_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_pasaltos,'Value')==1
    set(handles.popupmenu_pasaltos,'Enable','on')
    set(handles.popupmenu_pases,'Enable','on')
else
    set(handles.popupmenu_pasaltos,'Enable','off')
    set(handles.popupmenu_pases,'Enable','off')
end

```

```

end

function checkbox_mediana_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_mediana,'Value')==1
    set(handles.popupmenu_mediana,'Enable','on')
else
    set(handles.popupmenu_mediana,'Enable','off')
end

function pushbutton_aceptar_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ext1 pathname1 filename1 ext2 pathname2 filename2 pathname3 filename3...
    pathname_r filename_r pathname_o filename_o...
    des_h des_v distancia lw px holograma...
    suma

error=0;

distancia=str2double(get(handles.edit_distancia,'String'))*1e6;
lw=str2double(get(handles.edit_lw,'String'))/1e3;
px=str2double(get(handles.edit_px,'String'));
horizontal=str2double(get(handles.edit_horizontal,'String'));
vertical=str2double(get(handles.edit_vertical,'String'));

if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
    if ~isempty(filename1) && ~isequal(filename1,0) && ~isempty(filename2) && ~isequal(filename2,0)
        if strcmp(pathname1,pathname2) % compara direcciones
            if strcmp(ext1,ext2) % compara extensiones
                [a1,b1]=separacion(filename1);
                [a2,b2]=separacion(filename2);
                if strcmp(a1,a2) % compra nombres
                    if b1<b2 % determina si valor inicial es menor a final
                        hol=imread([pathname1,filename1]); % lee el primer archivo
                        [M,N]=size(hol(:,:,1)); % determina la dimension de la imagen
                        suma=zeros(M,N); % crea una matriz de almacenamiento

                        if get(handles.checkbox_referencia,'Value')==1 % referencia
                            r=imread([pathname_r,filename_r]);r=im2double(r(:,:,1));
                        else
                            r=suma;
                        end

                        if get(handles.checkbox_objeto,'Value')==1 % objeto
                            o=imread([pathname_o,filename_o]);o=im2double(o(:,:,1));
                        else
                            o=suma;
                        end

                        try
                            for l=b1:b2-1
                                h1=imread([pathname1,a1,num2str(l),ext1]);h1=im2double(h1(:,:,1));
                                h2=imread([pathname1,a1,num2str(l+1),ext1]);h2=im2double(h2(:,:,1));
                                resta=(h2-h1)-(r+o);
                                if get(handles.checkbox_dc,'Value')==1 % substraccion de componente dc
                                    resta=resta-mean(mean(resta));
                                end
                                if get(handles.checkbox_pasaltos,'Value')==1 % filtro pasaltos
                                    nivel=get(handles.popupmenu_pasaltos,'Value');
                                    pases=get(handles.popupmenu_pases,'Value');
                                    resta=filtro(resta,nivel,pases);
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

if l==1 % inclinacion
    if get(handles.checkbox_dinamica,'Value')==1
        holograma=resta;
        waitfor(inclinacion)
        if isempty(des_h) || isempty(des_v)
            horizontal=0;vertical=0;
            set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(0));
            set(handles.edit_vertical,'String',num2str(0));
        else
            horizontal=des_h;vertical=des_v;
            set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(des_h));
            set(handles.edit_vertical,'String',num2str(des_v));
        end
    end
end

if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
    if l==b1;
        rec=fresnel_trans(resta,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
        rec=fftshift(rec);

figura=figure('Name','Enmascaramiento','NumberTitle','Off','ToolBar','none','Menubar','none');
    imagesc(log(abs(rec))),axis image,colormap gray;grid on

        resta=fftshift(fft2(resta));
        resta=circshift(resta,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
        if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
            [resta,c]=mascara(resta,'Interno');
        else
            [resta,c]=mascara(resta,'Externo');
        end
        resta=circshift(resta,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
        resta=ifft2(ifftshift(resta));

        if isempty(c)
            c=[1 1 N-1 M-1];
        else
            close(figura)
        end
        barra = waitbar(0,'espere','Name','Progreso');
    else
        resta=fftshift(fft2(resta));
        resta=circshift(resta,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
        if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
            resta=mascara(resta,'Interno',c);
        else
            resta=mascara(resta,'Externo',c);
        end
        resta=circshift(resta,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
        resta=ifft2(ifftshift(resta));
    end
end
if l==b1
    barra = waitbar(0,'espere','Name','Progreso');
end
end
rec=fresnel_trans(resta,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
rec=fftshift(rec);
suma=suma+abs(rec);

```

```

        waitbar(l/(b2-1),barra);
    end
catch
    waitfor(msgbox(['No se encontró el archivo ',a1,num2str(l+1)],'HID','Error','Modal'))
    error=1;
end
if isequal(error,0)
    delete(barra);
end
else
    msgbox('La numeración inicial debe ser menor a la final','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
else
    msgbox('Los archivos no poseen el mismo nombre','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
else
    msgbox('La extensión de los archivos debe ser la misma','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
else
    msgbox('La ubicación de los archivos debe ser la misma','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
else
    msgbox('No ha seleccionado alguno de los archivos','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
else
    if ~isempty(filename3) && ~isequal(filename3,0)
        load([pathname3,filename3]); % carga archivo
        k=whos('holo');
        if ~isempty(k)
            [M,N]=size(holo{1}); % determina dimensiones
            suma=zeros(M,N);

            if get(handles.checkbox_referencia,'Value')==1 % referencia
                r=struct2cell(load([pathname_r,filename_r]));
                r=r{1};r=r{1};r=im2double(r(:, :, 1));
            else
                r=suma;
            end

            if get(handles.checkbox_objeto,'Value')==1 % objeto
                o=struct2cell(load([pathname_o,filename_o]));
                o=o{1};o=o{1};o=im2double(o(:, :, 1));
            else
                o=suma;
            end

            if length(holo)>1
                for l=1:length(holo)-1;
                    h1=holo{l};h2=holo{l+1};
                    resta=(h2-h1)-(r+o);
                    if get(handles.checkbox_dc,'Value')==1
                        resta=resta-mean(mean(resta));
                    end
                    if get(handles.checkbox_pasaltos,'Value')==1
                        nivel=get(handles.popupmenu_pasaltos,'Value');
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

    pases=get(handles.popupmenu_pases,'Value');
    resta=filtro(resta,nivel,pases);
end

if l==1 % inclinacion
    if get(handles.checkbox_dinamica,'Value')==1
        holograma=resta;
        waitfor(inclinacion)
        if isempty(des_h) || isempty(des_v)
            horizontal=0;vertical=0;
            set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(0));
            set(handles.edit_vertical,'String',num2str(0));
        else
            horizontal=des_h;vertical=des_v;
            set(handles.edit_horizontal,'String',num2str(des_h));
            set(handles.edit_vertical,'String',num2str(des_v));
        end
    end
end

if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1 % Enmascaramiento
    if l==1;
        rec=fresnel_trans(resta,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);
        rec=fftshift(rec);
        figura=figure('Name','Enmascaramiento','NumberTitle','Off','ToolBar','none','MenuBar','none');
        imagesc(log(abs(rec))),axis image,colormap gray;grid on

        resta=fftshift(fft2(resta));
        resta=circshift(resta,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
        if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
            [resta,c]=mascara(resta,'Interno');
        else
            [resta,c]=mascara(resta,'Externo');
        end
        resta=circshift(resta,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
        resta=ifft2(ifftshift(resta));

        if isempty(c)
            c=[1 1 N-1 M-1];
        else
            close(figura)
        end
        barra = waitbar(0,'espere','Name','Progreso');
    else
        resta=fftshift(fft2(resta));
        resta=circshift(resta,[-round(vertical*180) round(horizontal*180)]);
        if get(handles.radiobutton_interno,'Value')==1
            resta=mascara(resta,'Interno',c);
        else
            resta=mascara(resta,'Externo',c);
        end
        resta=circshift(resta,[round(vertical*180) -round(horizontal*180)]);
        resta=ifft2(ifftshift(resta));
    end
end
else
    if l==1
        barra = waitbar(0,'espere','Name','Progreso');
    end
end
end
rec=fresnel_trans(resta,px,lw,distancia,horizontal,-vertical);

```

```

        rec=fftshift(rec);
        suma=suma+abs(rec);
        waitbar(1/(length(holo)-1),barra);
    end
    delete(barra);
else
    waitfor(msgbox('No es posible realizar un análisis con un solo subarchivo','HID','Error','Modal'))
    error=1;
end
else
    msgbox('Archivo de datos no válido','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
else
    msgbox('No ha seleccionado un archivo','HID','Error','Modal')
    error=1;
end
end

if isequal(error,0) % al no producirse un error
    if get(handles.checkbox_enmascaramiento,'Value')==1
        if get(handles.radiobutton_recortar,'Value')==1
            suma=suma(c(2):c(2)+c(4),c(1):c(1)+c(3));
        end
    end
    if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1 % promedio
        suma=suma/b2;
    else
        suma=suma/length(holo);
    end
    if get(handles.checkbox_wiener,'Value')==1
        wiener=2*get(handles.popupmenu_wiener,'Value')+1;
        suma=wiener2(suma,[wiener wiener]);
    end
    if get(handles.checkbox_mediana,'Value')==1
        mediana=2*get(handles.popupmenu_mediana,'Value')+1;
        suma=medfilt2(suma,[mediana mediana]);
    end

    filename1=[];
    filename2=[];
    filename3=[];
    filename_r=[];
    filename_o=[];

end

close(gcf)

function radiobutton_imagen_Callback(hObject, eventdata, handles)
global filename_r filename_o
filename_r=[];
filename_o=[];

set(handles.checkbox_referencia,'Value',0)
set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_referencia,'String','Referencia')
set(handles.checkbox_objeto,'Value',0)
set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_objeto,'String','Objeto')

```

```

set(handles.radiobutton_imagen,'Value',1)
set(handles.radiobutton_matfile,'Value',0)
set(handles.pushbutton_inicial,'Enable','on')
set(handles.pushbutton_final,'Enable','on')
set(handles.pushbutton_matfile,'Enable','off')

function radiobutton_matfile_Callback(hObject, eventdata, handles)
global filename_r filename_o
filename_r=[];
filename_o=[];

set(handles.checkbox_referencia,'Value',0)
set(handles.pushbutton_referencia,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_referencia,'String','Referencia')
set(handles.checkbox_objeto,'Value',0)
set(handles.pushbutton_objeto,'Enable','Off')
set(handles.pushbutton_objeto,'String','Objeto')

set(handles.radiobutton_matfile,'Value',1)
set(handles.radiobutton_imagen,'Value',0)
set(handles.pushbutton_inicial,'Enable','off')
set(handles.pushbutton_final,'Enable','off')
set(handles.pushbutton_matfile,'Enable','on')

function pushbutton_matfile_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname3 filename3 direccion
[filename3,pathname3] = uigetfile( ...
    {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)', ...
    'Matfile',direccion);
if isequal(filename3,0) % si no se a cargado nada
    set(handles.pushbutton_referencia,'String','Matfile')
else
    direccion=pathname3;
    set(handles.pushbutton_matfile,'String',filename3)
end

function pushbutton_referencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_r direccion filename_r
name_r=filename_r;
path_r=pathname_r;
if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
    [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
    { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
    '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
    '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
    'Referencia',direccion);
else
    [filename_r,pathname_r] = uigetfile( ...
    {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)', ...
    'Referencia',direccion);
end
if isequal(filename_r,0) % si no se a cargado nada
    filename_r=name_r;
    pathname_r=path_r;
else
    direccion=pathname_r;
    set(handles.pushbutton_referencia,'String',filename_r)
end

```

```

function pushbutton_objeto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pathname_o direccion filename_o
name_o=filename_o;
path_o=pathname_o;
if get(handles.radiobutton_imagen,'Value')==1
    [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
    { '*.jpg','Joint Photographic Experts Group (*.jpg)'; ...
      '*.bmp','Windows Bitmap (*.bmp)'; ...
      '*.png','Portable Network Graphics (*.png)'}; ...
      'Objeto',direccion);
else
    [filename_o,pathname_o] = uigetfile( ...
    {'*.mat','MATLAB formatted file (*.mat)'}; ...
      'Objeto',direccion);
end
if isequal(filename_o,0) % si no se a cargado nada
    filename_o=name_o;
    pathname_o=path_o;
else
    direccion=pathname_o;
    set(handles.pushbutton_objeto,'String',filename_o)
end

function checkbox_wiener_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.checkbox_wiener,'Value')==1
    set(handles.popupmenu_wiener,'Enable','on')
else
    set(handles.popupmenu_wiener,'Enable','off')
end

function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
global filename1 filename2 filename3 filename_r filename_o suma
filename1=[];
filename2=[];
filename3=[];
filename_r=[];
filename_o=[];

delete(hObject);

```

ANEXO D. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA SEPARACION

```
function [nom,num]=separacion(nombre)
a=nombre(1:end-4);
val=length(a);
nom="";
for k=1:val
    m=str2double(a(k));
    if isnan(m)
        nom(k)=a(k);
    else
        break
    end
end
num=str2double(nombre(length(nom)+1:end-4));
if isnan(num)
    num=[];
end
end
```

ANEXO E. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA INCLINACION

```
function varargout = inclinacion(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @inclinacion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @inclinacion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

function inclinacion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
movegui(hObject,'center')
% Choose default command line output for inclinacion
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

global distancia lw px holograma
rec=fresnel_trans(holograma,px,lw,distancia,0,0);
rec=fftshift(rec);
imagesc(log(abs(rec))),axis image,colormap gray;grid on

function varargout = inclinacion_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function slider_verticalp_Callback(hObject, eventdata, handles)
global distancia lw px holograma des_a des_b
des_a=get(handles.slider_horizontalp,'Value');
des_b=get(handles.slider_verticalp,'Value');
rec=fresnel_trans(holograma,px,lw,distancia,des_a,des_b);
rec=fftshift(rec);
imagesc(log(abs(rec))),axis image,colormap gray;grid on

function slider_horizontalp_Callback(hObject, eventdata, handles)
global distancia lw px holograma des_a des_b
des_a=get(handles.slider_horizontalp,'Value');
des_b=get(handles.slider_verticalp,'Value');
rec=fresnel_trans(holograma,px,lw,distancia,des_a,des_b);
rec=fftshift(rec);
imagesc(log(abs(rec))),axis image,colormap gray;grid on

function pushbutton_inclinacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
global des_a des_b des_h des_v
des_h=des_a;des_v=-des_b;
close(gcf)
```

ANEXO F. CONSTANCIA VISITA A LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

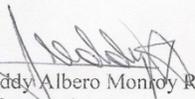
Bogotá D.C. 6 de Mayo de 2010

Señores
**COMITÉ CURRICULAR Y DE INVESTIGACIONES
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**
Universidad de Nariño
Ciudad

Cordial saludo.

Mediante la presente se hace constar que los estudiantes egresados del programa de Ingeniería Electrónica JORGE EDISON MORA ARROYO y OSCAR JOSÉ BARCO GALVIZ, pertenecientes al grupo de INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMAS INTELIGENTES de la UNIVERSIDAD DE NARIÑO, quienes se encuentran desarrollando su trabajo de grado, como requisito parcial para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO, titulado "ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DEBIDAS A ESFUERZOS, VIBRACIONES O VARIACIONES DE TEMPERATURA EN UN OBJETO MEDIANTE METROLOGÍA ÓPTICA BASADA EN TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA", realizaron prácticas en el Laboratorio de Holografía Digital adscrito a la Facultad de Ciencias Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, bajo la asesoría del Dr. Freddy Alberto Monroy Ramírez, docente del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, durante los días 3, 4, 5, y 6 de Mayo de 2010.

Atentamente


Freddy Albero Monroy Ramírez
Profesor Asistente
Departamento de Física - Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá
Edificio 404, of. 376 – famonroyr@bt.unal.edu.co
Tel: (+571) 3165000 ext. 13045/13026
e-mail: famonroyr@bt.unal.edu.co
Bogotá-Colombia

200 COLOMBIA
AÑOS DE IDENTIDAD -1810-2010-

Carrera 30 No. 45-03, FACULTAD DE CIENCIAS DEPARTAMENTO FÍSICA, Edificio 404, 2º piso, Oficina 205
Teléfono: (57-1) 316 5130 Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 13083 Fax: 13083
Correo electrónico: depfísica_fcbog@unal.edu.co / Bogotá, Colombia, Sur América
ciencia y tecnología para el país

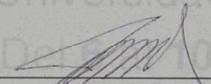
ANEXO G. CONSTANCIA PONENCIA EN EL II CONGRESO DE INGENIERÍA FÍSICA

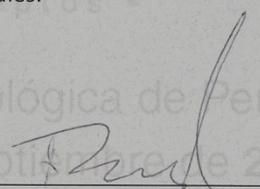
Pereira, 7 de Septiembre de 2010

El comité organizador del II Congreso Nacional de Ingeniería Física

Hace constar

Que el trabajo titulado **ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DEBIDAS A ESFUERZOS, VIBRACIONES O VARIACIONES DE TEMPERATURA EN UN OBJETO MEDIANTE METROLOGÍA ÓPTICA BASADA EN TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA** de los autores **D. Fajardo, J. Mora, O. Barco,** fue presentado en la sesión de orales.


Jaime Andrés Pérez Taborda
Director Comité Organizador


Rogelio Ospina
Presidente Sociedad
Colombina de Ingenieros Físicos