

**RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES 3D MEDIANTE PROYECCIÓN
DE FRANJAS UTILIZANDO MÉTODOS DE TRANSFORMADA DE
FOURIER, PHASE SHIFTING A 3, 4 Y 5 CAPTURAS**

Hosman Yadir Gelvez Ramirez

Trabajo presentado para optar al título de Físico



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE FÍSICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE ÓPTICA MODERNA (GOM)
PAMPLONA
2018**



***RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES 3D MEDIANTE PROYECCIÓN
DE FRANJAS UTILIZANDO MÉTODOS DE TRANSFORMADA DE
FOURIER, PHASE SHIFTING A 3, 4 Y 5 CAPTURAS***

***Hosman Yadir Gelvez Ramirez
Código: 1094248431***

DIRECTORES

***Dr. Néstor Alonso Arias Hernandez
Dra. Martha Lucia Molina Prado***

***UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE FÍSICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE ÓPTICA MODERNA (GOM)
PAMPLONA
2018***

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi familia que fueron los que me enseñaron a ser la persona que soy, a no rendirme y siempre seguir adelante.

A mi madre Miryam por ser la mejor madre del mundo

A mi padre Oscar que me está acompañando con su energía

A mis hermanos Oscar y Lorena, por ayudarme a ser mejor persona

A mis tíos Jesús, alba y mari que me han ayudado incondicionalmente con sus consejos y aportes

A mis abuelos Francisco (nono paco) y Evila (nonita) que me enseñaron a ser un hombre de bien con valores bien fundamentados

A mis primos Andrés, Jesús y Diana, con los que he compartido momentos inolvidables y que los quiero como a mis propios hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a mis profesores tutores, el doctor Néstor Alonso Arias Hernández y la Doctora Martha Lucia Molina Prado por su constante guía, paciencia y oportunidades, a los profesores que tuve durante todos estos años que fueron los que me brindaron el conocimiento para llegar hasta este punto, a mis compañeros con los que transite este camino, a mis hermanos por parte de otra madre Jhorman, Laura, Bibiana, Helizain, Juan, David, Manuel, Amando, Nelson, Gustavo, Erick, Angelica, Daniel que de alguna forma me ayudaron a sacar este proyecto con algún consejo, con alguna ayuda sobre algún tema que no entendía, con algún comentario montador, o simplemente con una buena distracción.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1. TÉCNICAS DE PROYECCIÓN SECUENCIALES	10
2.1.1. Patrones Binarios y Codificación de Niveles de Gris	10
2.1.2. Patrones de Niveles de Gris.....	11
2.1.3. Phase Shifting (PS).....	11
2.1.4. Método híbrido: Phase Shifting + Codificación de niveles de gris	12
2.1.5. Fotometría	12
2.2. PATRÓN DE COLOR ESPACIAL DE VARIACIÓN COMPLETA.....	13
2.2.1. Cámara de Arco Iris 3D	13
2.2.2. Codificación de Colores Continuamente Variable	13
2.3. LA INDEXACIÓN DE LA FRANJA (TIRO ÚNICO)	14
2.3.1. Indexación de la Franja Mediante Colores	14
2.3.2. Indexación de la Franja con el Patrón Segmento	14
2.3.3. Indexación de la Franja Utilizando Patrones Repetidos de Escala de Grises.....	15
2.3.4. Indización de Franjas Basada en la Secuencia De Bruijn	15
2.4. REJILLA DE INDEXACIÓN: PATRONES ESPACIALES CUADRÍCULA 2D	16
2.4.1. Matriz Binaria Pseudoaleatoria (PRBA)	16
2.4.2. Mini-Patrones Utilizados como Palabras de Código.....	17
2.4.3. Código de Malla a Color	17
2.4.4. Matriz 2D de Puntos con Codificación por Colores.....	18
2.4.5. Métodos Híbridos	18
3. MARCO TEÓRICO.....	19
3.1. OBSERVACIÓN Y PROYECCIÓN DEL SISTEMA DE FRANJAS.....	19
3.1.1. Proyección del Sistema de Franjas	19
3.1.2. Observación del Sistema de Franjas.....	19
3.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE FRANJAS	20
3.2.1. Corrimiento de Fase (Phase Shifting) [56].....	20
3.2.1.1 Técnica en Tres Capturas (Phase Shifting a 3 Capturas wyant 1984) [57].....	22
3.2.1.2 Técnica en Tres Capturas a Color (Phase Shifting Color).....	23
3.2.1.3 Técnica en Cuatro Capturas (Phase Shifting a 4 Capturas schwider, 1993) [58-59]....	23
3.2.1.4 Técnica en Cinco Capturas (Phase Shifting a 5 Capturas hariharan et al 1987) [60-61]	
23	
3.2.2. Reconstrucción utilizando la Transformada de Fourier [62].....	23
3.3. DESENVOLVIMIENTO DE LA FASE (UNWRAPPING) [64].....	25

3.3.1. Técnicas de Desdoblamiento de Fase [64]	27
3.3.2. Métodos Dependientes del Camino [64]	27
4. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN	28
4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	28
4.2. MONTAJE	28
4.2.1. Sistema de Proyección	29
4.2.2. Sistema de Observación	30
4.2.3. Sistema de Control de Adquisición y Procesamiento de Imágenes.....	31
4.3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	32
5. CALIBRACIÓN	33
5.1. CALIBRACIÓN DEL ESPACIO VISUAL.....	33
5.2. CALIBRACIÓN POR ALTURA.....	34
5.3. CALIBRACIÓN GAMMA.....	35
6. PASOS DE LA RECONSTRUCCIÓN.....	45
7. RESULTADOS.....	47
7.1. PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR.....	47
7.2. PHASE SHIFTING 3 CAPTURAS	48
7.3. PHASE SHIFTING 4 CAPTURAS	49
7.4. PHASE SHIFTING 5 CAPTURAS	49
7.5. TRANSFORMADA DE FOURIER	50
7.6. PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR.....	52
7.7. PHASE SHIFTING 3 CAPTURAS	53
7.8. PHASE SHIFTING 4 CAPTURAS	54
7.9. PHASE SHIFTING 5 CAPTURAS	54
7.10. TRANSFORMADA DE FOURIER	55
8. CONCLUSIONES	58
9. REFERENCIAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema de proyección de luz estructurada. Tomada de [5]	10
FIGURA 2. Proyecciones secuenciales de patrones codificados en binario para imágenes tridimensionales. Tomada de [5]	10
FIGURA 3. Codificación de nivel de gris para imágenes 3D. Tomada de [5]	11
FIGURA 4. Patrón de franjas senoidales. Tomada de [5]	11
FIGURA 5. Combinación código gris con phase shifting. Tomada de [5]	12
FIGURA 6. Esquema estéreo fotométrico donde se toman ocho imágenes del mismo objeto bajo iluminación de ocho ubicaciones diferentes. Tomada de [5]	12
FIGURA 7. Cámara arco iris 3D. Tomada de [23]	13
FIGURA 8. Esquema de codificación de colores de variación continua: tres patrones de diente de sierra de color primario aditivo. Tomada de [5]	14
FIGURA 9. Indexación de franjas usando el patrón de segmento. Tomad de [27]	15
FIGURA 10. Indexación de franjas usando un patrón de escala de grises repetido. Tomada de [5]	15
FIGURA 11. Ejemplo simple de la secuencia De bruijn Tomada de [5]	16
FIGURA 12. Ejemplo de indexación en franjas de color basada en la secuencia De bruijn. Tomada de [33]	16
FIGURA 13. PRBA con polinomio primitivo de grado 10 y tamaño de ventana secundaria. Tomada de [34]	16
FIGURA 14. Usando mini patrones como palabras de código para la indexación de la grilla. Tomada de [36]	17
FIGURA 15. Ejemplo de cuadrículas codificadas por colores. Tomada de [5]	17
FIGURA 16. Ejemplo de matriz 2D de puntos codificados por colores. Tomada de [5]	18
FIGURA 17. Ejemplo de combinación de dos códigos de banda 1D en un patrón indexado de grilla 2D. Tomada de [5]	18
FIGURA 18: Esquema del montaje	19
FIGURA 19. Componentes principales del esquema experimental	20
FIGURA 20. Separado espectros de Fourier de un patrón de franjas inclinadas. Tomada de [63]	25
FIGURA 21. (a) Función característica de fase envuelta; (b) Función de fase continua obtenida por el unwrapping de los datos de (a). Tomada de [64]	25
FIGURA 22. Efecto de ruido aditivo en los datos de fase envuelta: (a) ruido añadido con una amplitud máxima de -2π , la discontinuidad de fase se encuentra correctamente (b) y los datos sin envolver; (c) ruido de alta amplitud añadido a los mismos datos (d) puede resultar en la detección falsa de un salto de fase de 2π . (e) los datos resultantes sin envolver (f) conserva un salto de fase 2π erróneo. Tomada de [64]	26
FIGURA 23. (a) Objeto original, (b) Fase calculada "WRAPPING", (c) Fase desenvuelta "UNWRAPPING" con errores de propagación	27
FIGURA 24. Línea de escaneo secuencial línea por línea. Tomada de [64]	27
FIGURA 25. Imagen del montaje óptico para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas	28
FIGURA 26. Imagen del montaje óptico para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas	28
FIGURA 27. Interfaz de trabajo	31
FIGURA 28. Espacio visual captado por la cámara	33
FIGURA 29: Franjas de escalón para la calibración	34
FIGURA 30. Perfil topográfico de los escalones con sus respectivas relaciones de fase a alturas de cada peldaño	34
FIGURA 31. (a) Curvas de calibración, (b) resultados de la desviación estándar promedio de los datos medidos y de la desviación estándar del ajuste de la curva para cada paso.	35
FIGURA 32: Calibración gamma	36
FIGURA 33. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 0, brillo en 153, contraste en 60, exposición en -7.2	37
FIGURA 34. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 30, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4	37
FIGURA 35. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 0, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4	38
FIGURA 36. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 50, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4	39
FIGURA 37. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 75, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4	40
FIGURA 38. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 100, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4	41

FIGURA 39. Variando del parámetro exposición, dejando los parámetros Gamma y ganancia en 50, brillo y contraste en 0	41
FIGURA 40. Variación del parámetro exposición, dejando los parámetros de gamma en 399, ganancia en 0, brillo en 153, contraste en 60	42
FIGURA 41. Datos totales cámara- videobeam	42
FIGURA 42. Datos óptimos cámara-videobeam	43
FIGURA 43. Superposición de datos reales con datos de ajuste	43
FIGURA 44. (a) Captura de franjas sin corrección gamma, (b) Captura de franjas con corrección gamma, (c) Superposición del perfil de intensidad	44
FIGURA 45. Medidas del objeto de prueba	47
FIGURA 46. Imágenes capturadas franjas a calor	47
FIGURA 47. Planos RGB de las franjas a color capturadas	47
FIGURA 48. Fase calculada PS color	47
FIGURA 49. Fase desenvuelta PS color	47
FIGURA 50. Topografía objeto reconstruido vista superior PS color	48
FIGURA 51. Topografía 3D objeto reconstruido PS color	48
FIGURA 52. Imágenes capturadas PS3	48
FIGURA 53. Fase calculada PS3	48
FIGURA 54. Fase desenvuelta PS3	48
FIGURA 55. Topografía objeto reconstruido vista superior PS3	48
FIGURA 56. Topografía 3D objeto reconstruido PS3	48
FIGURA 57. Imágenes capturadas PS4	49
FIGURA 58. Fase calculada PS4	49
FIGURA 59. Fase desenvuelta PS4	49
FIGURA 60. Topografía objeto reconstruido vista superior PS4	49
FIGURA 61. Topografía 3D objeto reconstruido PS4	49
FIGURA 62. Imágenes capturadas PS5	49
FIGURA 63. Fase calculada PS5	50
FIGURA 64. Fase desenvuelta PS5	50
FIGURA 65. Topografía objeto reconstruido vista superior PS5	50
FIGURA 66. Topografía 3D objeto reconstruido PS5	50
FIGURA 67. Imagen capturada Fourier	50
FIGURA 68. Fase calculada Fourier	50
FIGURA 69. Fase desenvuelta Fourier	50
FIGURA 70. Topografía objeto reconstruido vista superior Fourier	50
FIGURA 71. Topografía 3D objeto reconstruido Fourier	50
FIGURA 72. (a) Superposición de topografías de cada método de reconstrucción, (b) topografía método PS a color, (c) topografía método PS a 3 capturas, (d) topografía método PS a 4 capturas, (e) topografía método PS a 5 capturas, (f) topografía método de reconstrucción por transformada de Fourier.	51
FIGURA 73. Topografía con corrección gamma PS color	52
FIGURA 74. Topografía sin corrección gamma PS color	52
FIGURA 75. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS color	53
FIGURA 76. Topografía con corrección gamma PS3	53
FIGURA 77. Topografía sin corrección gamma PS3	53
FIGURA 78. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS3	53
FIGURA 79. Topografía con corrección gamma PS4	54
FIGURA 80. Topografía sin corrección gamma PS4	54
FIGURA 81. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS4	54
FIGURA 82. Topografía con corrección gamma PS5	54
FIGURA 83. Topografía sin corrección gamma PS5	54
FIGURA 84. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS5	55
FIGURA 85. Topografía con corrección gamma Fourier	55
FIGURA 86. Topografía sin corrección gamma Fourier	55
FIGURA 87. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma Fourier	55
FIGURA 88. (a) Cuarta parte de una esfera, (b) Reconstrucción de una cuarta parte de una esfera	57
FIGURA 89. (a) Molde de zapatos, (b) Reconstrucción del molde para zapatos	57
FIGURA 90. (a) Cartón de huevos, (b) Reconstrucción del cartón de huevos	57

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la topografía y la deformación de objetos inertes y de seres vivos, así como construir replicas en tiempo real son operaciones de gran interés en diversas áreas como en el procesamiento automático, control de calidad, aplicaciones médicas, industriales, robóticas, entretenimiento, seguridad, diseño y fabricación. Sin embargo, debido a la naturaleza y complejidad de los objetos en cada una de las áreas mencionadas anteriormente, en las cuales es muy difícil la reconstrucción tridimensional.

Conscientes de las anteriores áreas de trabajo se fundamenta este trabajo con el objetivo de realizar un análisis topográfico con cierta precisión de un objeto colocado sobre una pantalla a cierta distancia, sin contacto físico y basado en el procesamiento de datos por computador. La ventaja de estos métodos de reconstrucción de objetos mediante la proyección de luz estructurada, viene dada por el hecho de analizar la topografía sin necesidad de entrar en contacto con el objeto, además porque son métodos de fácil control.

El trabajo se centra en las técnicas de medición de superficie 3D mediante la proyección de luz estructurada; La tecnología de proyección digital de luz y los sensores de imagen utilizadas, permite la reconstrucción de superficies 3D con gran precisión, resolución y modulación, la cual depende de la configuración que se implemente.

Hoy en día, existen algunas técnicas de reconstrucción 3D de objetos basado en luz estructurada tales como topografía moiré, proyección de franjas, mapeo de fase, visión estereoscópica, transformada de Fourier por perfilometría (FTP), la medición de fase de perfilometría (PMP) y la triangulación de escaneo láser por nombrar algunas. [1-4]. Los métodos de medición de objetos en 3D basado en la Iluminación de luz estructurada, utilizan el análisis de la luz deformada para obtener la información del perfil del objeto estudiado. Analizando el sistema de franjas deformado por el objeto, mediante el uso de una cámara con posición fija, adquiriendo varias imágenes, para realizar su procesamiento.

El trabajo se centra en la proyección de franjas, analizando la deformación mediante las técnicas de Perfilometría por corrimiento de fase (phase shifting) y transformada de Fourier.

La estructura del trabajo contiene 9 capítulos:

- El capítulo 1, contiene la introducción del tema desarrollado
- El capítulo 2, contiene una reseña histórica sobre algunos métodos de reconstrucción 3D, mediante la proyección de luz estructurada
- El capítulo 3, contiene la parte analítica que se desarrolló para la implementación de los métodos de reconstrucción utilizados del trabajo
- El capítulo 4 posee la descripción de la implementación y aplicación analítica y computacional
- El capítulo 5 muestra el proceso de calibración que se llevó a cabo para realizar la reconstrucción 3D
- El capítulo 6 contiene las fases por las cuales debe pasar los objetos para realizar la reconstrucción 3D
- El capítulo 7 evidencia los resultados obtenidos de cada método utilizado para la reconstrucción del objeto, también contiene unos resultados de la implementación de la calibración realizada utilizando un solo método de reconstrucción
- El capítulo 8 contiene las conclusiones a las que se llegó con el trabajo
- El capítulo 9 se podrá encontrar la bibliografía que se utilizó para el desarrollo del trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

El trabajo se centra en las técnicas de medición de superficie 3D sin contacto mediante el uso de “luz estructurada”, es decir, la iluminación activa de la escena, mediante la proyección de un patrón de intensidad variable en 2D; Aprovechando la tecnología actual que nos proporciona una mejor la velocidad, precisión, resolución, modulación y facilidad de uso de los sistemas de proyección y adquisición de imágenes.

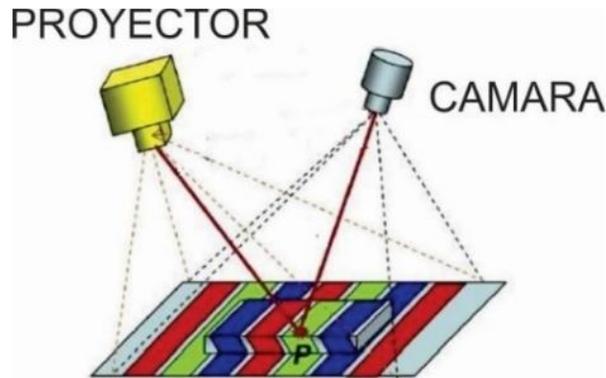


FIGURA 1. Esquema de proyección de luz estructurada. Tomada de [5]

En la figura 1, se muestra la proyección de luz estructurada, donde se puede apreciar que mediante un proyector se ilumina el objeto, que hará que la luz proyectada sufra una deformación por su topografía, en la deformación que se produce se encuentra los datos necesarios que se necesitan para realizar la reconstrucción del objeto y esta información será adquirida en el punto p, (que es el punto donde se interceptan el plano de proyección y el plano de observación), por una cámara; por ejemplo, si la escena es una superficie plana sin ninguna variación de la superficie, la luz proyectada no sufrirá ninguna deformación y en la imagen adquirida se podrá apreciar un patrón similar a la del patrón de luz estructurada proyectada.

2.1. TÉCNICAS DE PROYECCIÓN SECUENCIALES

2.1.1. Patrones Binarios y Codificación de Niveles de Gris

La codificación binaria [6-9] utiliza franjas blancas y negras para formar una secuencia de patrones de proyección, de manera que cada punto de la superficie del objeto posee un código binario único que difiere de cualquier otro código de diferentes puntos. La Figura 2 muestra un patrón de proyección de 5 bits simplificado.

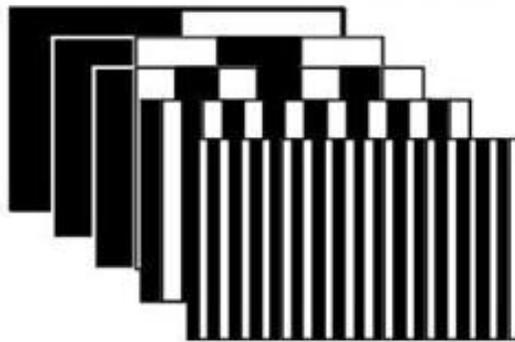


FIGURA 2. Proyecciones secuenciales de patrones codificados en binario para imágenes tridimensionales. Tomada de [5]

Para lograr una alta resolución espacial, se necesitan de un gran número de patrones secuenciales proyectados y los objetos con los que se trabajan deben permanecer estáticos.

2.1.2. *Patrones de Niveles de Gris*

Para reducir efectivamente el número de patrones necesarios para obtener una reconstrucción de alta resolución, se desarrollan patrones de niveles de gris. Por ejemplo, se puede utilizar distintos niveles de intensidad (en lugar de sólo dos como en el código binario) para producir codificación única de los patrones de proyección. Hay una optimización en el diseño de los patrones de franjas proyectadas, dándonos un sistema de proyección con más posibilidades de franjas que el método de codificación binaria [10, 11]. La Figura 3 muestra un ejemplo de los patrones de codificación de nivel de gris, que se pueden utilizar para realizar reconstrucción de objetos mediante la proyección de luz estructurada.



FIGURA 3. Codificación de nivel de gris para imágenes 3D. Tomada de [5]

2.1.3. *Phase Shifting (PS)*

Phase Shifting (PS) o cambio de fase es un método de proyección de franjas que se utiliza para la reconstrucción de imágenes 3D. El método consiste en proyectar un conjunto de patrones sinusoidales ideales creados mediante un algoritmo que se proyecta sobre la superficie del objeto. La deformación que sufra este conjunto de patrones por la topografía del objeto, será la que proporcione la información necesaria para realizar la reconstrucción del objeto.

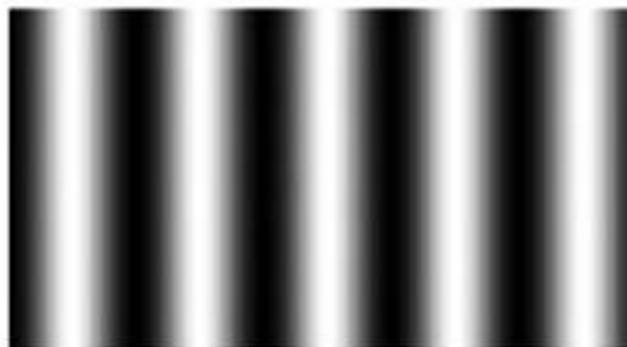


FIGURA 4. Patrón de franjas senoidales. Tomada de [5]

Esta técnica posee una dificultad, llamada desdoblamiento de fase, esta surge por la naturaleza en la forma de calcular la fase de los datos adquiridos [13].

2.1.4. Método híbrido: Phase Shifting + Codificación de niveles de gris

Existen dos grandes problemas con las técnicas de cambio de fase: los métodos desvolventes sólo proporcionan un desvolvemento relativo y no resuelven la fase absoluta. Si dos superficies tienen una discontinuidad de más de 2π , entonces ningún método basado en el desvolvemento podrá ser utilizado correctamente. Estos problemas, a menudo llamados "ambigüedad", pueden ser resueltos mediante el uso de una combinación de la proyección en niveles de gris y las técnicas de cambio de fase.

La Figura 5 se muestra un ejemplo de la combinación de proyección de niveles de gris con desplazamiento de fase en una secuencia de 32 codificaciones. El nivel de gris determina la gama absoluta de fase sin ninguna ambigüedad, mientras que el desplazamiento de fase ofrece una resolución subpíxel teniendo en cuenta el número de franjas previstas [14-16]. Sin embargo, los métodos híbridos requieren un mayor número de proyecciones y no se prestan bien para la reconstrucción de imagen en 3D de objetos dinámicos.



FIGURA 5. Combinación código gris con phase shifting. Tomada de [5]

2.1.5. Fotometría

La fotometría, iniciada por Woodham [17], es una variante por su forma con el sombreado. Se estima la orientación de la superficie local mediante una secuencia de imágenes de la misma superficie tomada desde el mismo punto de vista, pero bajo iluminación desde diferentes direcciones [18-20]. Por lo tanto, resuelve algunos problemas en forma de sombreado utilizando varias imágenes. Este método requiere todas las posibles fuentes de luz y sólo estima la orientación de la superficie local. Asume continuidades de la superficie 3D y necesita un "punto de partida" (un punto de la superficie objeto cuyo (x, y, z) coordenadas se conocen) para sus algoritmos de reconstrucción 3D.

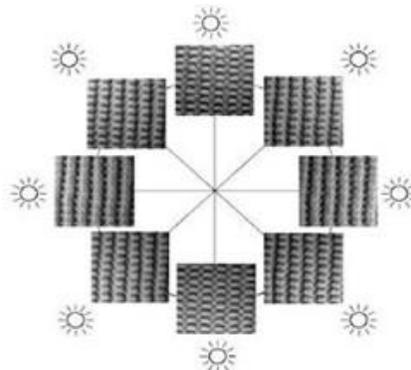


FIGURA 6. Esquema estéreo fotométrico donde se toman ocho imágenes del mismo objeto bajo iluminación de ocho ubicaciones diferentes. Tomada de [5]

2.2. PATRÓN DE COLOR ESPACIAL DE VARIACIÓN COMPLETA

Los principales inconvenientes de las técnicas de proyección secuenciales incluyen su incapacidad para adquirir el objeto 3D en movimiento dinámico o en un sujeto vivo, como partes del cuerpo humano. Ahora presentamos algunas técnicas de formación de imágenes de superficie de un solo tiro en 3D que se aprovechan de la información de color o un esquema de codificación único en el patrón de proyección y requieren sólo una imagen adquirida del objeto bajo la iluminación con un patrón de color para obtener el cuadro completo de la imagen en 3D. Entre estas técnicas se encuentran

2.2.1. Cámara de Arco Iris 3D

La Figura 7 ilustra el concepto básico de la cámara del arco iris 3D [21,22]. A diferencia de los anteriores métodos, que deben extraer características correspondientes de un par de imágenes estéreo para calcular el valor de profundidad, la cámara del arco iris 3D proyecta una iluminación de longitud de onda variable espacialmente sobre la superficie del objeto. La geometría fija del proyector de la luz del arco iris, establece una correspondencia de uno a uno entre el ángulo de proyección, Θ , de un plano de luz y una longitud de onda espectral particular λ , Proporcionando así la fácil identificación de puntos de referencia en cada punto de la superficie. Con una conocida línea de base y un ángulo de visión conocido, los valores de la gama 3D correspondientes a cada pixel individual se pueden calcular mediante el uso de un principio de triangulación sencillo, y un cuadro completo de la imagen de gama 3D se pueden obtener en una sola instantánea, a la cámara de velocidad de cuadro (30 fotogramas, o más rápido).

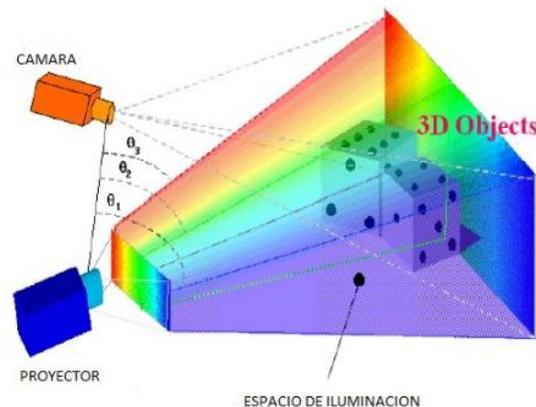


FIGURA 7. Cámara arco iris 3D. Tomada de [23]

2.2.2. Codificación de Colores Continuamente Variable

Es posible componer diversos patrones de color que varían continuamente para codificar la información de localización espacial [24]. Por ejemplo, podemos construir un patrón de variación de intensidad para cada canal de color de un proyector de tal manera que, cuando se añaden juntos, estos patrones en los canales de color individuales forman un patrón de color que varía continuamente. La Figura 8 muestra un ejemplo de los patrones de variación de intensidad para tres canales primarios aditivos de color. Cuando se suman, se forma un patrón de proyección de color de arco iris. Tenga en cuenta que este tipo de patrón de color no se sigue necesariamente una relación de variación lineal en el espectro de color (longitud de onda). Sin embargo, si se conocen las relaciones entre las contribuciones de cada canal de color, el esquema de decodificación es fácil de obtener y aplicar.

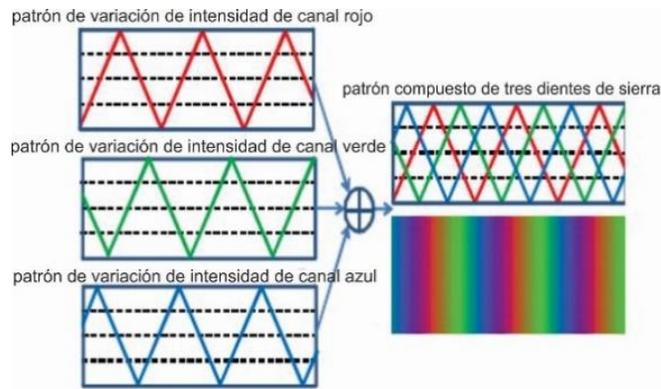


FIGURA 8. Esquema de codificación de colores de variación continua: tres patrones de diente de sierra de color primario aditivo. Tomada de [5]

2.3. LA INDEXACIÓN DE LA FRANJA (TIRO ÚNICO)

La indexación de las franjas es necesario para lograr la reconstrucción 3D de una superficie sólida, ya que ordena los datos de acuerdo con un criterio común a todos ellos facilitando su consulta y análisis; ya que el orden en el que se observan las franjas no es necesariamente el mismo que el orden en el que se proyectan las rayas. Esto es debido a la existente similitud en los sistemas de formación de imágenes de superficie 3D basado en la triangulación y la posibilidad de franjas que faltan en la imagen adquirida debido a la dificultad en adquirir la información necesaria de las características de la superficie del objeto a reconstruir. Ahora presentamos algunas técnicas de indexación de franjas.

2.3.1. Indexación de la Franja Mediante Colores

Los sensores de imagen de color poseen tres canales de adquisición independientes, cada uno correspondiente a una banda del espectro. La combinación lineal de los valores de estos componentes de color puede producir un número infinito de colores. Tres canales de 8 bits pueden representar 224 colores diferentes. Tal información de colores se puede utilizar para mejorar la precisión de formación de imágenes en 3D y para reducir el tiempo de adquisición. Por ejemplo, el uso del color para la indexación de la franja en los patrones de proyección (Figura 1) puede ayudar a aliviar el problema de la ambigüedad que enfrentan las técnicas de cambio de fase o de múltiples franjas utilizando patrones monocromáticos [25,26]. Este tipo de sistema de colores puede lograr capacidad de imagen de superficie 3D en tiempo real. También es posible codificar múltiples patrones de una única imagen de color en proyección, cada patrón que posee un valor de color único en el espacio de color. Para reducir la tasa de errores de decodificación, se puede seleccionar un grupo de colores en la que cada color tiene una distancia máxima desde cualquier otro color en el conjunto. El número máximo de colores en el conjunto se limita a la distancia entre los colores que generan la perturbación electromagnética producida en un canal de comunicación por el acoplamiento de este con otro (diafonía) en las imágenes adquiridas.

2.3.2. Indexación de la Franja con el Patrón Segmento

Para distinguir una franja de las demás, se puede añadir algunos patrones de segmentos únicos para cada banda (Figura 9) de tal manera que, cuando se realiza la reconstrucción 3D, el algoritmo puede utilizar el patrón de segmento único de cada banda para distinguirlos, es decir, el algoritmo se fijara en la geometría de las franjas (largo y ancho) para poder realizar el reconocimiento rápido de estas para su procesamiento, a esto se le conoce como indexación. Este método sólo se aplica a un objeto 3D con una superficie lisa con deformaciones mínimas en su geometría para el que patrón generado no sea muy caótico. De lo contrario, puede ser muy difícil de

recuperar el patrón de segmento único, debido a la deformación del patrón y / o discontinuidad de la superficie del objeto. [26]

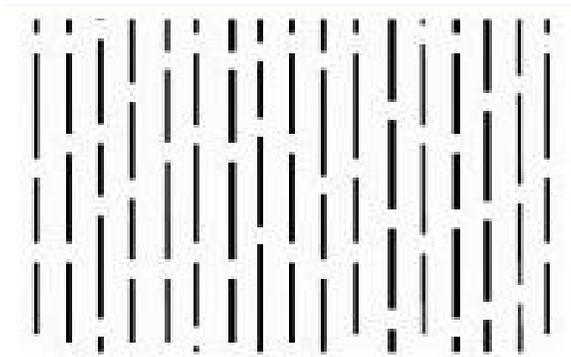


FIGURA 9. Indexación de franjas usando el patrón de segmento. Tomad de [27]

2.3.3. Indexación de la Franja Utilizando Patrones Repetidos de Escala de Grises

Utilizando más de dos niveles de intensidad, se disponen de estos de tal manera que se puedan crear cualquier grupo de franjas (una ventana deslizante de N franjas) obteniendo patrones de intensidad único dentro de un período de longitud [28]. Por ejemplo, si se utilizan tres niveles de gris (negro, gris y blanco), un patrón puede ser diseñado como se muestra en la Figura 10.

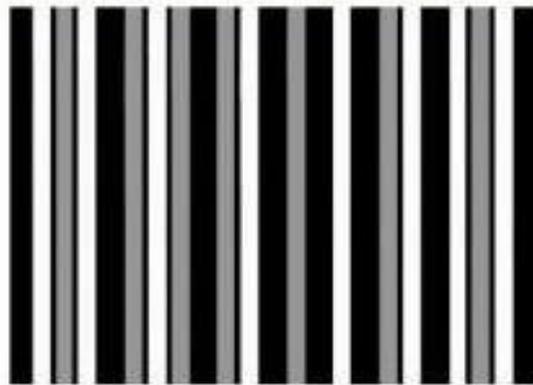


FIGURA 10. Indexación de franjas usando un patrón de escala de grises repetido. Tomada de [5]

2.3.4. Indización de Franjas Basada en la Secuencia De Bruijn

Una secuencia De Bruijn [28] de rango n en un alfabeto de tamaño k es una palabra cíclica en la que cada una de las palabras k^n de longitud n aparece exactamente una vez a medida que viajamos alrededor del ciclo. En la figura 11 se muestra un ejemplo simple de un círculo De Bruijn con $n=3$ y $k=2$ (el alfabeto es $\{0, 1\}$). Mientras viajamos alrededor del ciclo (en el sentido de las manecillas del reloj o en el sentido contrario a las agujas del reloj), encontraremos cada uno de los $2^3 = 8$ patrones de tres dígitos 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 exactamente una vez. No hay un patrón repetido de tres dígitos en la secuencia. En otras palabras, ninguna subsecuencia se correlaciona con ninguna otra en la secuencia De Bruijn. Esta característica única de la secuencia De Bruijn se puede usar para construir una secuencia de patrón de rayas que tiene patrones de variación local únicos que no se repiten [29-31]. Tal singularidad hace que la decodificación del patrón sea una tarea más fácil. El gráfico asociado con una secuencia de De Bruijn se llama De Bruijn graph [32].

Se puede utilizar unas combinaciones binarias de colores (RGB) para producir una franja de color indexado basado en la secuencia de De Bruijn.

Hay una limitación importante en la construcción de una secuencia de la franja de color indexado utilizando la técnica de De Bruijn: todas las franjas vecinas deben tener diferentes colores, de lo contrario, podrían producirse algunas franjas con un ancho del doble o triple, confundiendo los algoritmos de reconstrucción 3D. La figura 12 muestra un conjunto de resultados con patrón de franjas de color indexado real. En esta secuencia de franjas, todas las franjas vecinas tienen diferentes colores; diversas variaciones sobre la aplicación de las técnicas de Bruijn se pueden utilizar para generar patrones únicos de color indexado, indexados a la escala de grises, u otros tipos de patrones de proyección para aplicaciones de imágenes de superficie 3D.

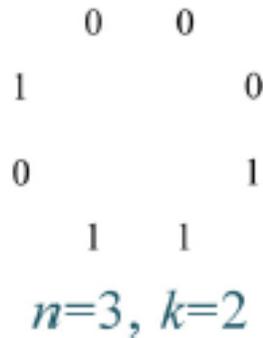


FIGURA 11. Ejemplo simple de la secuencia De bruijn Tomada de [5]



FIGURA 12. Ejemplo de indexación en franjas de color basada en la secuencia De bruijn. Tomada de [33]

2.4. REJILLA DE INDEXACIÓN: PATRONES ESPACIALES CUADRÍCULA 2D

El concepto básico de las técnicas de modelo de rejilla 2D, es etiquetar de forma única cada subventana en el patrón de proyección 2D, de manera que el patrón en cualquier subventana es única y totalmente identificable con respecto a su posición en el patrón 2D.

2.4.1. Matriz Binaria Pseudoaleatoria (PRBA)

Una de las estrategias de indexación de rejilla, es utilizar una matriz binaria pseudo-aleatoria (PRBA - Pseudo-Random Binary Array) para producir ubicaciones de rejilla que pueden ser marcadas con puntos u otros patrones, de manera que el patrón codificado de cualquier subventana es único.

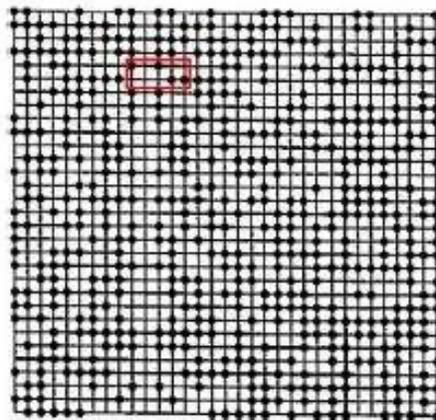


FIGURA 13. PRBA con polinomio primitivo de grado 10 y tamaño de ventana secundaria. Tomada de [34]

2.4.2. Mini-Patrones Utilizados como Palabras de Código

En lugar de utilizar una matriz binaria pseudo-aleatoria, una matriz pseudo-aleatoria de varios valores puede ser utilizado. Uno puede representar cada valor con un mini-patrón como palabra de código especial, formando así un patrón de proyección de la red indexadas [35]. La figura 14 muestra un ejemplo de una matriz pseudo-aleatorio de tres valores y un conjunto de palabras de código mini-patrón (que se muestra en la parte inferior derecha de la figura). El uso de las palabras de código especialmente definidas, una matriz de pseudo-aleatoria de varios valores puede ser convertido en un patrón de proyección con subventanas únicas.

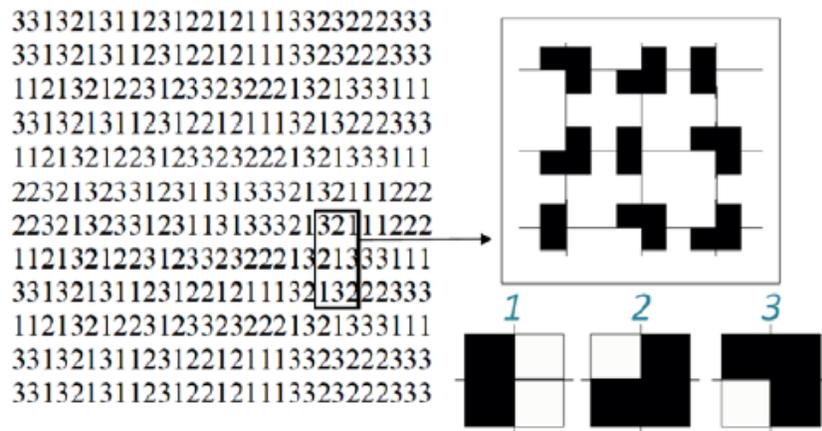


FIGURA 14. Usando mini patrones como palabras de código para la indexación de la grilla. Tomada de [36]

2.4.3. Código de Malla a Color

Otra estrategia de indexación de cuadrícula es el código de color, con ambas franjas verticales y horizontales de modo que una indexación rejilla 2D se puede lograr [36-38]. Los esquemas de codificación de las franjas vertical y horizontal o bien pueden ser el mismo o totalmente diferente, dependiendo de las aplicaciones (Figura 15). No hay ninguna garantía de la unicidad de sub-ventanas, pero las franjas de colores en ambas direcciones pueden ayudar a la decodificación en la mayoría de las situaciones en las que se establece la correspondencia. Las líneas de la cuadrícula delgadas pueden no ser tan fiable en extracción de modelos como otros patrones (puntos, plazas, etc.).

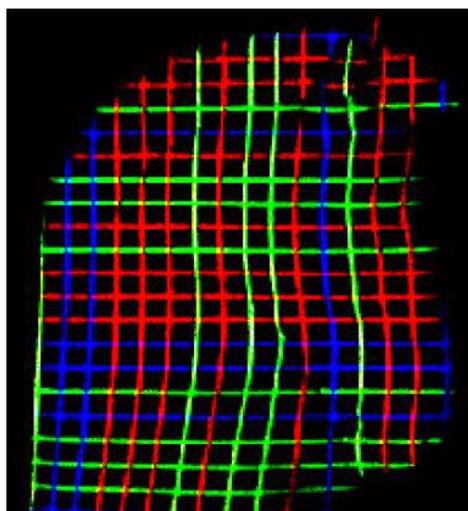


FIGURA 15. Ejemplo de cuadrículas codificadas por colores. Tomada de [5]

2.4.4. Matriz 2D de Puntos con Codificación por Colores

Existen métodos alternativos de generación de la matriz pseudo-aleatorio. En [39,40] se propuso un algoritmo de fuerza bruta para generar una matriz que preservara la singularidad de subventana, pero no puede agotar todos los posibles patrones de subventanas. El método es relativamente intuitivo de implementar en algoritmos informáticos. Por ejemplo, la Fig. 16 (izquierda) muestra una matriz de 6x6 con tamaño subventana de 3x3 utilizando tres palabras de código (R, G, B). El procedimiento de computación será, primero llenar la esquina superior izquierda de la matriz de 6x6 con un patrón elegido al azar, a continuación, agregue una columna de tres elementos a la derecha con la palabra código aleatorio. La singularidad de la subventana se verifica antes de la adición de una columna de este tipo, se mantendrá la adición de las columnas hasta que todas las columnas estén llenas de palabras de código aleatorios y la singularidad de subventana se verifica. Del mismo modo, añadir filas al azar en la dirección hacia abajo desde la posición inicial de la subventana; después, añadir nuevas palabras de código al azar a lo largo de la dirección diagonal. Repita este procedimiento hasta que todos los puntos estén llenos de colores. De nuevo, este procedimiento de cálculo no puede garantizar la generación de una matriz de pseudo-aleatoria para todos los tamaños de matriz y palabras de código, pero los buenos resultados se han logrado durante muchos casos. La Figura 16 (derecha) muestra un ejemplo de una matriz de pseudo-aleatorio con 20x18 dimensiones.

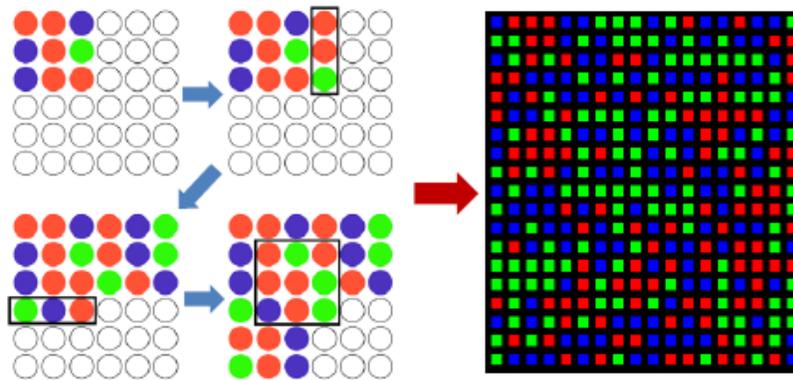


FIGURA 16. Ejemplo de matriz 2D de puntos codificados por colores. Tomada de [5]

2.4.5. Métodos Híbridos

Hay muchas oportunidades para mejorar aspectos específicos del desempeño del sistema de imágenes 3D de la superficie mediante la combinación de más de un esquema de codificación que se discutió anteriormente. La Figura 17 muestra un ejemplo.

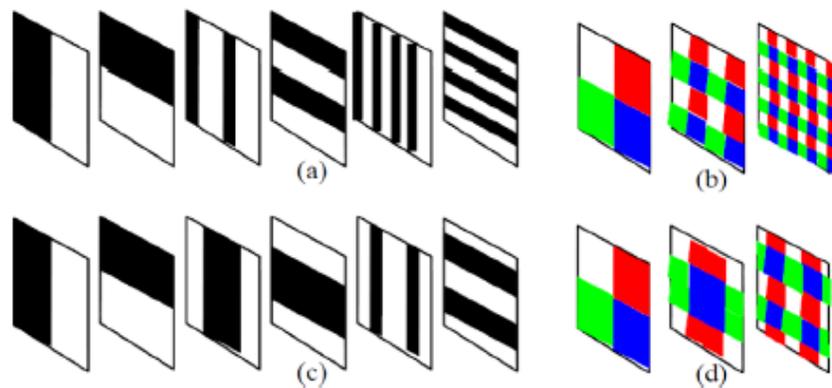


FIGURA 17. Ejemplo de combinación de dos códigos de banda 1D en un patrón indexado de grilla 2D. Tomada de [5]

3. MARCO TEÓRICO

El método utilizado en el desarrollo del trabajo, se basa en la deformación que sufren las franjas que se proyectan sobre un objeto, esta deformación se debe a la topografía o relieve del objeto a reconstruir, utilizando los métodos de PHASE SHIFTING y RECONSTRUCCION DE OBJETOS MEDIANTE LA TRANSFORMAD DE FOURIER; la información contenida en las deformaciones pasa por un algoritmo único, que contiene una serie de métodos de reconstrucción.

3.1. OBSERVACIÓN Y PROYECCIÓN DEL SISTEMA DE FRANJAS

En la figura 18 se muestra el montaje utilizado, consiste en dos brazos; en donde uno de ellos, se realizará la proyección del sistema de franjas sobre la superficie del objeto (L) y en el otro brazo se realizará la observación del sistema de franjas deformado por el objeto (D). Entre el brazo de proyección y de observación existe un ángulo Θ ; la deformación de las franjas es debido a la topografía del objeto. Si la superficie del objeto es plana, el brazo de observación captará un sistema de franjas paralelas donde es posible definir una distancia entre ellas (paso); por otro lado, si la superficie no es plana, las franjas dejarán de ser paralelas, deformándose de acuerdo a las características del objeto.

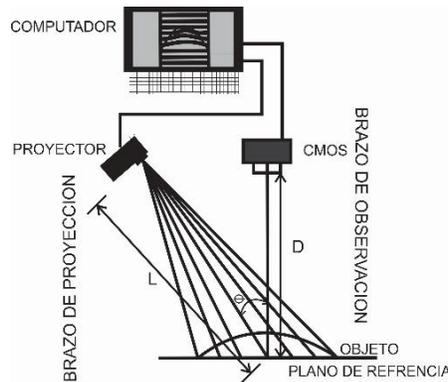


FIGURA 18: Esquema del montaje

3.1.1. Proyección del Sistema de Franjas

El sistema de franjas sobre el objeto se obtiene mediante un proyector DellM115HD con iluminación LED, donde este se encarga de proyectar unas franjas a blanco y negro o a color, creadas mediante un algoritmo en MATLAB, donde se puede controlar en tiempo real la amplitud, el periodo y la fase. Es importante establecer un ángulo entre los ejes de los dos brazos, si el ángulo es de cero grados, el sistema de franjas no se observará deformado, aunque haya un objeto muy deforme; también deberemos calcular una distancia entre las franjas sobre el plano de referencia que llamaremos P_0 . En la tabla 1 muestra los datos experimentales del montaje, según la figura 18.

3.1.2. Observación del Sistema de Franjas

El plano donde se ubica el objeto lo llamaremos plano de referencia. Para mayor sencillez en el montaje y análisis matemático se ajustó un ángulo de cero grados entre el brazo de observación y la normal del plano de referencia.

Para obtener la información deseada en tiempo real, es necesario codificar la imagen (sistema de franjas) y enviarlas al computador para su análisis. Para este trabajo se utiliza los sensores de estado sólido, estos utilizan la tecnología conocida como CMOS para la transferencia de carga desde las celdas sensibles a los registros de lectura [41,42].

Las estructuras CMOS (Metal-Oxide-semiconductor) pueden recolectar y almacenar portadores de carga minoritarios, liberados por la radiación luminosa, en pozos de potencial. Los sensores CMOS tienen varias ventajas sobre otro tipo de cámaras como la ausencia de distorsión geométrica en la imagen, tiempo de respuesta corto a cambios en la iluminación (característica conocida como lag), operaciones inalteradas por la presencia de campos magnéticos, tamaño compacto, alta densidad de sensores por unidad de superficie, peso reducido, gran linealidad en los niveles de gris, entre otras. En este montaje se utilizó una cámara a color de 752x480 píxeles. La imagen digitalizada, está formada por píxeles, los cuales puede reportar un valor de intensidad luminosa digital o nivel de gris entre 0 y 255 (8 Bits). [43]

3.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE FRANJAS

La proyección de franjas se ha usada para recolectar información de formas 3D y 2D en diversas áreas, mediante la extracción de la fase donde se ha codificado la información deseada [44]. Durante muchos años, el análisis de estos ha sido una cuestión de localizar manualmente las posiciones y la numeración de las franjas. Con el desarrollo y la disminución de costos de equipos de procesamiento digital de imágenes, en la literatura se encuentran técnicas de medición de patrón de franjas digital, existen tres principales razones de este esfuerzo:

- ❖ Para obtener una mayor precisión
- ❖ Para aumentar la velocidad
- ❖ Para automatizar el proceso

Existen varios métodos de perfilometría que usan patrones de luz estructurada donde se incluyen técnicas como Moiré (TM)[45,47], perfilometría por cálculo de la fase (PCF)[48,52], Perfilometría por transformada de Fourier (PTF)[53,54], Perfilometría por cálculo de la modulación (PCM)[55], detección de fase espacial(DFE)[55], triangulación laser (TL)[55], proyección de franjas con código de color, entre otras. Para este trabajo se ha escogido dos técnicas de proyección de franjas, como lo es la Perfilometría por corrimiento de fase (Phase Shifting (PS)) y Perfilometría por transformada de Fourier (PTF).

El montaje para el desarrollo de estas dos técnicas es la misma, la geometría general en la cual los ejes ópticos del proyector y de la cámara respectivamente se interceptan en un punto en el plano de referencia, la cual es un plano ficticio que se considera normal al eje óptico de la cámara y sirve como una referencia, desde la cual un objeto con altura es medido. Con este método se evaluará un objeto en donde se interceptan la línea de proyección de una franja y línea de visión de la cámara con el plano teniendo en cuenta el objeto.

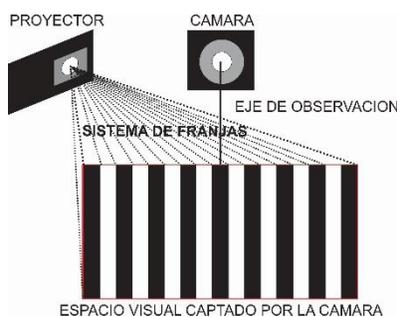


FIGURA 19. Componentes principales del esquema experimental

3.2.1. Corrimiento de Fase (Phase Shifting) [56]

La reconstrucción de objetos por medio de proyección de franjas se basa en la deformación que sufren las franjas proyectadas sobre un objeto, debido a la topografía de su superficie, es sabido que la generación de patrones mediante la suposición de haces luminosos ha sido utilizada como método de medición desde el siglo

XIX, sin embargo, la interpretación cuantitativa de dichos patrones fue prácticamente imposible hasta la invención de las computadoras. El avance tecnológico que posibilitó la fabricación de computadoras personales de gran potencia y sensores electrónicos de imagen, principalmente Charge-Coupled Device (CCD) y Complementary Metal–Oxide Semiconductor (CMOS), permitió el nacimiento y rápido desarrollo del análisis automático de patrones de franjas.

El análisis de los patrones de franjas se refiere a la recuperación o reconstrucción de la señal contenida en la fase. Algunas de las principales dificultades que esto representa son:

- ❖ El único observable es la intensidad total, en esta se tienen cantidades desconocidas, y enmascarada se encuentra una señal de interés, que también es desconocida;
- ❖ Debido a la periodicidad, la fase solo puede ser determinada con una ambigüedad de 2π

La técnica más utilizada para la detección de la señal de interés, es la así llamada Corrimiento de Fase o PS (Phase-Shifting). En la técnica de PS, una serie de patrones de franjas es generada introduciendo un desplazamiento lineal.

Las condiciones ideales para la aplicación de la técnica de PS son las siguientes:

- ❖ La intensidad luminosa del patrón de franjas se encuentra en el rango de operación lineal del sensor utilizado.
- ❖ Los interferogramas son capturados con la diferencia de fase exacta a la cual se ajustó el algoritmo correspondiente.
- ❖ Durante la captura digital de los interferogramas, todas las perturbaciones son pequeñas (cambios globales de intensidad, vibraciones, turbulencia de aire, etcétera).

Aplicando el PS encontraremos un mapa de fase, donde no han sido corregidas las falsas discontinuidades introducidas en el proceso interferométrico, a esto se conoce como fase envuelta o wrapping. El proceso de eliminación de dichas discontinuidades en la fase recuperada es conocido coloquialmente como desenvolvimiento de fase o unwrapping.

3.2.1.1. Principios Fundamental [56]

Una expresión general para la intensidad registrada se puede escribir:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\beta(x, y) + 2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde

$$\beta(x, y) + 2\pi f_0 x = \varphi(x, y) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\begin{aligned} \beta(x, y) &= \text{Información de la topografía} \\ 2\pi f_0 x &= \text{Fase frecuencia portadora} \\ f_0 &= \text{Frecuencia portadora de las franjas en la dirección } x \end{aligned}$$

$$I(x, y) = I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \phi(x, y)] \quad (\text{Ec. 3})$$

En tanto que, a , b y ϕ son funciones de las coordenadas espaciales. Aquí $a(x, y)$ es la intensidad media o iluminación de fondo y $b(x, y)$ contraste de franjas, ϕ es la diferencia de fase entre las franjas. Para recuperar la fase, ahora se describe un grupo de métodos de fase llamada perfilometría en la medición (PMI). PMI es la técnica más ampliamente utilizada hoy para la medición de fase y también se ha aplicado con éxito en la holográfica y Moore. Técnicas de PMI se pueden dividir en dos categorías principales:

- ❖ Los que toman secuencialmente datos de fase.
- ❖ Los que toman los datos de fase de forma simultánea.

Los métodos de la primera tipo se conocen como PMI temporal o TPMI, y los del segundo tipo se conocen como PMI espacial. El punto de partida para todas las técnicas de PMI es la expresión de la intensidad Ec. 3. La característica esencial de todas las técnicas de PMI es que ϕ es una modulación de fase que se introduce y se controla de forma experimental. Las técnicas para la determinación de la fase se pueden dividir en dos categorías básicas: electrónica y analítica. Para las técnicas de análisis, los datos de intensidad se registran mientras que la fase se modula temporalmente, enviada a una computadora y luego se utilizan para calcular las mediciones de intensidad relativa. Los métodos analíticos se pueden subdividir en dos técnicas

- ❖ Las que integran la intensidad mientras que la fase se incrementa linealmente
- ❖ La fase se altera en los pasos entre las mediciones de intensidad

El primer método se conoce como integración de cubo de cambio de fase, mientras que el segundo se denomina fase-paso a paso o Phase Shifting.

La Ec. 3 contiene tres incógnitas a, b y φ , que requieren un mínimo de tres ecuaciones (mediciones de la intensidad) para determinar la fase. El desplazamiento de fase entre las mediciones adyacentes puede ser cualquiera entre los 0 y π grados. Por fase arbitraria desplaza ϕ_1, ϕ_2 y ϕ_3 obtenemos

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b \cos(\varphi + \phi_1) \\ I_2 &= a + b \cos(\varphi + \phi_2) \\ I_3 &= a + b \cos(\varphi + \phi_3) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4})$$

De esta ecuación se despeja φ

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{(I_2 - I_3) \cos \phi_1 - (I_1 - I_3) \cos \phi_2 - (I_1 - I_2) \cos \phi_3}{(I_2 - I_3) \sin \phi_1 - (I_1 - I_3) \sin \phi_2 - (I_1 - I_2) \sin \phi_3} \quad (\text{Ec. 5})$$

Con

$$\phi_1 = \frac{\pi}{4}, \phi_2 = \frac{3\pi}{4}, \phi_3 = \frac{5\pi}{4}$$

Con un desplazamiento de fase de $\pi/2$ por exposición, se llega a una expresión particularmente simple

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Existen muchas maneras de realizar el método de Phase Shifting. Sin embargo, todos usan múltiples imágenes y su propio algoritmo, cada algoritmo tiene su ventaja y su desventaja, teniendo como meta resolver ciertos problemas tales como, velocidad, la precisión y la geometría del objeto a reconstruir.

En los siguientes métodos se proyectan franjas a blanco y negro, con un corrimiento determinado ϕ , que recordando es una modulación de fase que se introduce y se controla de forma experimental, el código realiza los desplazamientos correspondientes y para cada desplazamiento de las franjas realiza la captura correspondiente

3.2.1.1 *Técnica en Tres Capturas (Phase Shifting a 3 Capturas wyant 1984) [57]*

DESPLAZAMIENTO

$$\phi_i = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$$

CÁLCULO DE LA FASE

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \quad (\text{Ec. 6})$$

3.2.1.2 *Técnica en Tres Capturas a Color (Phase Shifting Color)*

Esta técnica se basa en el anterior método. Para lograr la captura de los datos en un solo disparo, se modifica la proyección de franjas, en el anterior método se proyectan franjas a blanco y negro y se realiza los desplazamientos correspondientes, para cada desplazamiento se realiza un disparo para la toma de datos, lo que cambia para esta técnica es que ya no se proyectarán franjas a blanco y negro, si no franjas a color, la cámara realizara un único disparo guardando la información simultanea de los tres planos (R,G,B), el proceso de lectura de la información de cada plano se desarrollara internamente en el algoritmo creado.

DESPLAZAMIENTO

$$\phi_i = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$$

CÁLCULO DE LA FASE

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_B - I_G}{I_R - I_G} \quad (\text{Ec. 7})$$

3.2.1.3 *Técnica en Cuatro Capturas (Phase Shifting a 4 Capturas schwider, 1993) [58-59]*

DESPLAZAMIENTO

$$\phi_i = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$$

CÁLCULO DE LA FASE

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (\text{Ec. 8})$$

3.2.1.4 *Técnica en Cinco Capturas (Phase Shifting a 5 Capturas hariharan et al 1987) [60-61]*

DESPLAZAMIENTO

$$\phi_i = -\pi, -\frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, \pi$$

CÁLCULO DE LA FASE

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{7(I_2 - I_4)}{-4I_1 + I_2 + 6I_3 + I_4 - 6I_5} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

3.2.2. *Reconstrucción utilizando la Transformada de Fourier [62]*

La transformada de Fourier llamada así en honor a Joseph Fourier, fue desarrollada para funciones periódicas y no periódicas; esta transformada convierte una función del dominio espacial o temporal, al dominio de las frecuencias y viceversa.

Matemáticamente la transformada de Fourier de una función $f(x)$, está definida por:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i2\pi ux} dx \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde u es una variable real. Si esta integral existe para todos los valores de $F(u)$ entonces se dice que es la transformada de Fourier de la función $f(x)$. La función $f(x)$ tiene Transformada si tiene

- ❖ Debe ser absolutamente integrable, sobre un dominio infinito.
- ❖ En cualquier intervalo finito debe existir un número finito de máximos y mínimos.
- ❖ En este mismo intervalo de existir un numero finito de discontinuidades.

Es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia. Es reversible, siendo capaz de transformarse en cualquiera de los dominios al otro. Esta nos permitirá Examinar la función en el plano frecuencial, evaluando el contenido frecuencial de una función o señal.

Las condiciones anteriores se satisfacen automáticamente si la función $f(x)$ describe con precisión una cantidad física real. Pero se encuentra con frecuencia aproximaciones buenas, con forma simple, y útiles, que al

desprenderse de ellas podría introducirse dificultades innecesarias. Por otra parte, a pesar de que estas funciones no pueden tener las transformadas de Fourier en el sentido estricto, muchas de ellas si poseen lo que se llama transformada de Fourier generalizada.

La transformada de Fourier inversa se define por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u)e^{i2\pi ux} du \quad (\text{Ec. 11})$$

La transformada de Fourier simplemente es un diagrama donde se reportan las frecuencias y amplitudes de las funciones senoidales utilizadas para la reconstrucción de cualquier función. Si la función no es periódica la transformada será una función continua de frecuencias. La información contenida en la transformada es la misma que posee la función original, la diferencia radica en la manera como se presenta la información. El análisis de Fourier permite examinar la función en el plano frecuencial y no en el dominio espacial.

El método de la transformada de Fourier para realizar reconstrucciones topografía utilizando la recuperación de la fase fue originalmente concebido por Takeda; En este método de reconstrucción se realiza parte del proceso en el dominio de la frecuencia, para finalmente calcular la fase en el espacio directo.

Partiremos con el patrón de franjas, que está dado por

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\beta(x, y) + 2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (\text{Ec. 1})$$

donde f_0 es la frecuencia portadora de las franjas en la dirección x , para este método no tendremos en cuenta el parámetro que controla el corrimiento de fase ($\phi(x, y)$), con esto la Ec. 1 quedara de la siguiente forma:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\beta(x, y) + 2\pi f_0 x] \quad (\text{Ec. 12})$$

Siguiendo el método de Takeda, re-escribimos la Ec. 12: [63]

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{i2\pi f_0 x} + c^*(x, y)e^{-2\pi f_0 x} \quad (\text{Ec. 13a})$$

Con

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\phi(x, y)} \quad (\text{Ec. 13b})$$

Donde

a(x,y) es la iluminación de fondo
b(x,y) es el contraste de franjas

El patrón de la transformada de Fourier de la franja con respecto a x , queda

$$G(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x - f_0, y) \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde las letras mayúsculas denotan espectros de Fourier y f_x es la frecuencia espacial en la dirección x . El método de trabajo depende del paso del sistema de franjas y de las deformaciones sufridas por las franjas, se obtiene tres lóbulos separados. El lóbulo central corresponde al fondo continuo $A(f_x, y)$ y el plano de frecuencia y los lóbulos laterales contiene información sobre $C(f_x - f_0, y)$ y $C^*(f_x - f_0, y)$, los espectros de Fourier serán separados como se muestra esquemáticamente en la figura 20. Para obtener la fase es necesario la transformada inversa de alguno de los lóbulos laterales, esto se realizará aislando uno de los lóbulos mediante el uso de un filtrado

$$C(f_x - f_0, y) = G(f_x, y)H(f_x - f_0, y) \quad (\text{Ec. 15})$$

Trasladándolo f_0 hacia el origen para eliminar la portadora y obtener $C(f_x, y)$

$$C(f_x, y) = C(f_x - f_0 + f_0, y) \quad (\text{Ec. 16})$$

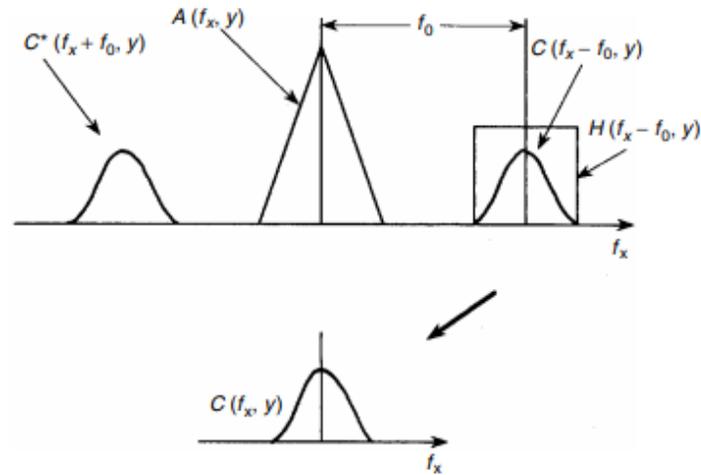


FIGURA 20. Separado espectros de Fourier de un patrón de franjas inclinadas. Tomada de [63]

La transformada de Fourier inversa de esta función se calcula y, como resultado se obtiene la función compleja $c(x, y)$ de la Ec. 15.

$$c(x, y) = FFT^{-1}\{C(f_x, y)\}_{f_x} \quad (\text{Ec. 17})$$

Calculando la fase de la función compleja obtenida Ec. 16, de la transformada de Fourier inversa. La fase es determinada por

$$\beta(x, y) = \tan^{-1} \frac{Im[c(x, y)]}{Re[c(x, y)]} \quad (\text{Ec. 18})$$

3.3. DESENVOLVIMIENTO DE LA FASE (UNWRAPPING) [64]

La solución de ϕ es una función parecida a un diente de sierra y las discontinuidades ocurren cada vez que ϕ cambia por 2π .

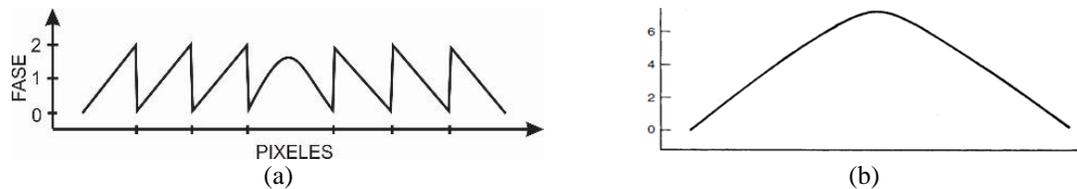


FIGURA 21. (a) Función característica de fase envuelta; (b) Función de fase continua obtenida por el unwrapping de los datos de (a). Tomada de [64]

El Unwrapping surge debido a que el paso final en el proceso de medida del patrón de franjas es desenvolver la fase a lo largo de una de la trayectoria, contando las discontinuidades cada 2π .

- Se añade 2π si el cambio es de -2π
- Se resta 2π si el cambio es de 2π .

Si ϕ aumenta, la pendiente de la función es positiva, y viceversa para la disminución de fase. El termino Phase Unwrapping surge debido a que el paso final en el proceso de medida del patrón de franjas es para desenvolver o integrar la fase a lo largo de una línea (o trayectoria) contando las discontinuidades cada 2π y añadiendo 2π cada vez al ángulo de fase si el cambio es de 2π a cero o restando 2π si el cambio es de cero a 2π .

La clave para desarrollar algoritmos de desenvolvimiento de la fase es la capacidad para detectar con precisión los saltos de fase 2π . En el caso de datos de fase envueltos sin ruido y donde estos datos se muestrean adecuadamente (es decir, los gradientes de fase son significativamente menor que 2π), entonces un método simple para desenvolver la fase será adecuado y todo lo que se requiere es un recorrido secuencial a través de los datos (línea por línea) para integrar la fase añadiendo o restando 2π en los saltos de fase.

En muchos problemas de medición, sin embargo, el ruido en los datos muestreados es un factor importante que contribuye en la falsa identificación de saltos de fase. La Figura 22 muestra el efecto de la adición de ruido a los datos desenvueltos. Es evidente que a medida que la amplitud del ruido se aproxima a 2π , los saltos de fase reales quedan ocultos. En el caso de datos unidimensionales, la única solución a este problema (que no sea un promedio de más conjuntos de datos para integrar el ruido en el tiempo) es suavizar los datos de franjas sinusoidales sin procesar con un filtro pasa bajo. Sin embargo, esto no siempre es satisfactorio y la información se pierde siempre en la operación de filtrado.

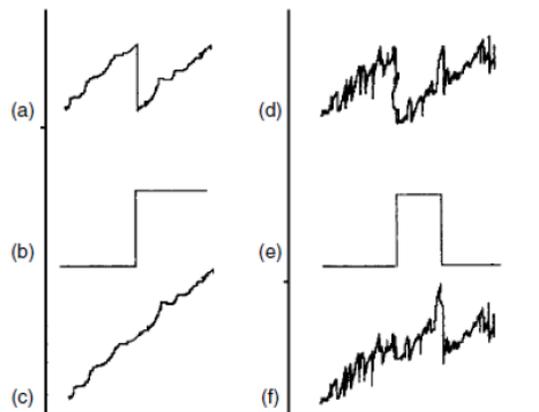


FIGURA 22. Efecto de ruido aditivo en los datos de fase envuelta: (a) ruido añadido con una amplitud máxima de -2π , la discontinuidad de fase se encuentra correctamente (b) y los datos sin envolver; (c) ruido de alta amplitud añadido a los mismos datos (d) puede resultar en la detección falsa de un salto de fase de 2π . (e) los datos resultantes sin envolver (f) conserva un salto de fase 2π erróneo. Tomada de [64]

Para que los métodos simples de desenvolvimiento funcionen, los datos deben ser continuos en toda la matriz de imágenes (sin agujeros en los datos) y extenderse a los límites de la ventana de muestra. Una discontinuidad de fase podría ser causada por un cambio rápido en el parámetro de medición, como un paso de gran altura en un componente bajo prueba. Dichos defectos pueden aparecer como un cambio repentino en el espaciado de la franja o como un punto en el que la franja se detiene (lo que a veces se conoce como una ruptura de franja). En estas circunstancias, los errores en el desenvolvimiento de fase se propagan desde el defecto u orificio en los datos a través del resto de la matriz de datos. Esto es particularmente grave si los datos se escanean línea por línea en una dirección. Los problemas presentados por defectos o agujeros en los datos se vuelven aún más complejos cuando la forma del agujero se vuelve complicada. En la figura 23 podremos apreciar errores al momento de utilizar el método

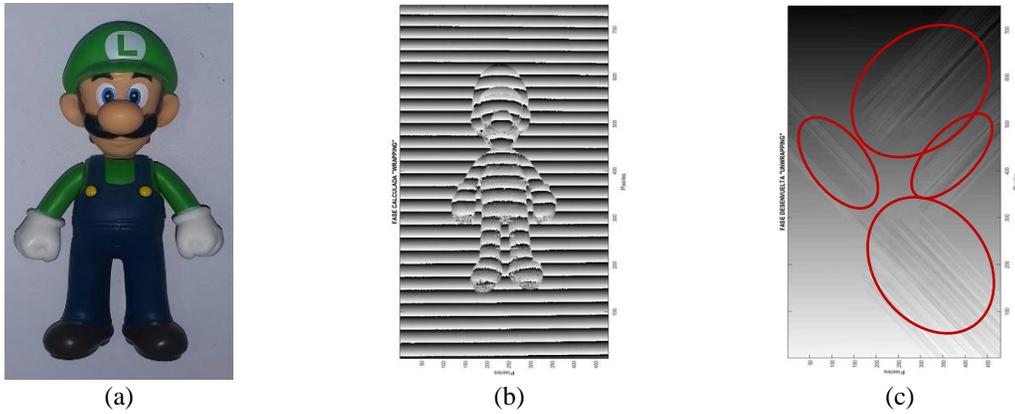


FIGURA 23. (a) Objeto original, (b) Fase calculada “WRAPPING”, (c) Fase desenvuelta “UNWRAPPING” con errores de propagación

3.3.1. Técnicas de Desdoblamiento de Fase [64]

El principio básico del desdoblamiento de fase es 'integrar' la fase envuelta φ (en unidades de 2π) a lo largo de una ruta a través de los datos. En cada píxel, el gradiente de fase se calcula por diferenciación:

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_{n-1} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde n es el número de píxel. Si $|\varphi|$ excede un cierto umbral como π , luego se supone un borde de franja de fase (discontinuidad 2π). Este salto de fase se corrige mediante la suma o la resta de 2π de acuerdo con el signo de φ .

Para corregir los saltos de fase 2π perdidos se basa en el hecho de que la diferencia de fase entre dos puntos medidos por la fase de integración a lo largo de una ruta entre los dos puntos es independiente de la ruta elegida siempre que la ruta no pase a través de una discontinuidad de fase a esto se le conoce como métodos de desdoblamiento de fase dependientes del camino.

3.3.2. Métodos Dependientes del Camino [64]

El más simple de los métodos de desdoblamiento de fase implica un escaneo secuencial a través de los datos, línea por línea, ver la Figura 23. Al final de cada línea, se determina la diferencia de fase entre el último píxel y el píxel en la línea inferior y la línea inferior se explora en la dirección inversa. En otras palabras, una matriz de datos bidimensionales se trata como un conjunto de datos unidimensional plegado. Este enfoque es exitoso cuando se aplica a datos de alta calidad, pero se necesitan variaciones más complejas en presencia de ruido.

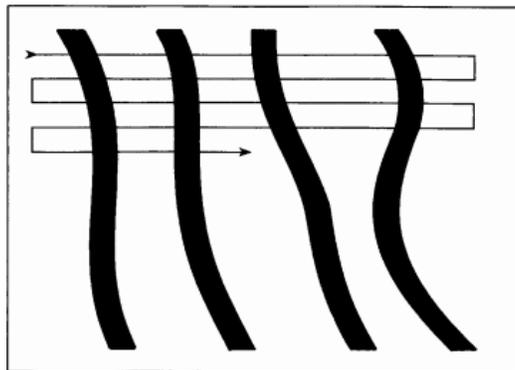


FIGURA 24. Línea de escaneo secuencial línea por línea. Tomada de [64]

4. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema consta de tres partes, el brazo de proyección, el brazo de observación y la codificación de la información obtenida por el brazo de observación, ver figura 24. El sistema se monta con el brazo de observación perpendicular al plano de observación y ajustar el brazo de proyección a un ángulo óptimo, es decir, que al momento de proyectar las franjas estas deben cubrir en su totalidad al objeto a reconstruir. El brazo de observación debe estar perpendicular al plano de observación para que las ecuaciones no sean más complejas de lo necesario, si no se realiza de esta manera, tendríamos de medir un ángulo adicional al ángulo que posee el proyector con respecto del brazo de observación, y esto conduce a introducir errores humanos en la medición de estos.

Se explican los procedimientos de calibración en el sistema de proyección y observación, para determinar los parámetros óptimos del sistema. De igual manera se explica el procedimiento para realizar la reconstrucción 3D digital de cualquier objeto.

El montaje consiste de 3 partes:

1. Un sistema de proyección que se encarga de proyectar un sistema de franjas sobre la superficie de un objeto.
2. Un sistema de observación, que se encarga de la adquisición del sistema de franjas proyectado sobre el objeto.
3. Un sistema de control, que permite el total manejo de los componentes de trabajo, desde la proyección del sistema de franjas, pasando por la adquisición de los datos y finalmente permitiendo el análisis de estos para dar los resultados.

La figura 24, muestra el sistema óptico utilizado para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas, construido a partir del esquema de la figura 18.

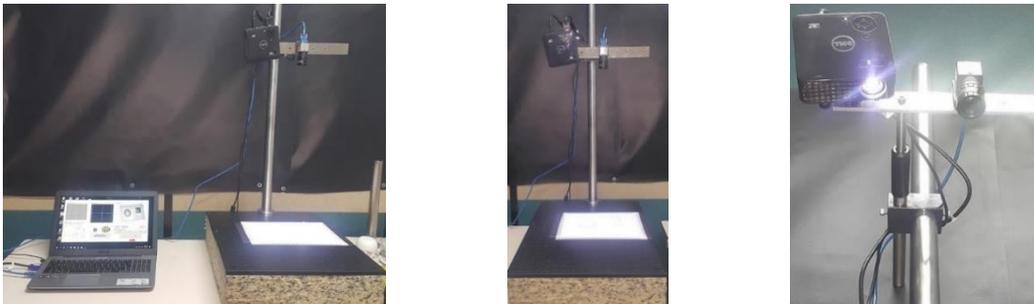


FIGURA 25. Imagen del montaje óptico para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas

4.2. MONTAJE



FIGURA 26. Imagen del montaje óptico para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas

4.2.1. Sistema de Proyección



El sistema de proyección es un aspecto de vital importancia en los sistemas ópticos de reconstrucción 3D y afectan de forma fundamental los resultados. Una iluminación arbitraria hacia el objeto a reconstruir no es aceptable, para cada objeto las franjas deben ser únicas, por lo que ningún objeto tiene las mismas características. La fuente de proyección es un proyector marca Dell M115HD con iluminación tipo led, las franjas proyectadas son creadas computacionalmente, como se mencionó anteriormente.

El proyector cuenta las siguientes especificaciones

❖ **PROYECCIÓN:**

Brillo: 450 lúmenes (máx.)

Relación de contraste: Típica de 10.000:1 (encendido total/apagado total)

Resolución nativa: 1280 x 800

Objetivo de proyección: Apertura: F/2,0, longitud focal, $f = 14,95$ mm, lente fijo

Distancia de proyección: 0,97 m ~ 2,58 m

Tamaño de pantalla diagonal: 0,76 m ~ 2,03 m

Colores visualizables: hasta 1,073 mil millones

Fuente de luz LED: Fuente de luz LED sin mercurio

Ciclo de vida de la fuente de luz LED: Hasta 30.000 horas (normal)

❖ **CONECTORES DE E/S:**

Alimentación: Un conector para alimentación de CC

Entrada de computadora: 1 conector universal de 24 clavijas (negro) para señales de entrada de RGB análogo y para admitir salida de audio

Salida de audio: Una mini ficha estéreo de 3,5 mm

USB: Un USB-A para visualizador USB, visor de Office, reproducción multimedia (video/audio/fotografía), acceso a almacenamiento de memoria USB (unidad flash USB/memoria interna), para admitir proyector, medios y actualización de firmware del procesador de imágenes o funcionalidad inalámbrica opcional (la llave USB inalámbrica se vende por separado)

Entrada de tarjeta de memoria: Una ranura para tarjeta MicroSD para visor de Office, reproducción multimedia (video/audio/fotografía) o para admitir actualizaciones del firmware de los procesadores de medios e imágenes

Entrada HDMI: 1x HDMI 1,3 (cumple con HDCP)

❖ **COMPATIBILIDAD DE VIDEO**

Entrada HDMI: 480i/p, 576i/p, 720p, 1080p

❖ **AUDIO**

Parlante de 1 W

❖ **ALMACENAMIENTO DE ARCHIVOS**

Memoria flash incorporada de 2 1 GB

❖ **TAMAÑO Y PESO**

Dimensiones (ancho x profundidad x altura): 105,3 mm x 104 mm x 36,5 mm

Peso: 360 g \pm 22,7 g

❖ **INFORMACIÓN ELÉCTRICA**

Fuente de alimentación: CA universal 100-240 50-60 Hz con adaptador de alimentación de 65 W

Consumo de energía:

Modo normal: 52 W \pm 10% a 110 V CA

Modo ecológico: 42 W \pm 10% a 110 V CA

Modo de ahorro de energía: 0,5 W (velocidad del ventilador al mínimo)

Modo de espera: \leq 0,5 W

❖ **MEDIOAMBIENTAL**

Temperatura en funcionamiento: 5 °C ~ 35 °C

Humedad: 80% (como máximo)

Temperatura de almacenamiento: 0 °C ~ 60 °C

Humedad: 90% (como máximo)

4.2.2. Sistema de Observación



En el sistema de observación se utilizó una cámara CMOS con el eje óptico ubicado perpendicular al plano de referencia. Se utilizó un soporte especialmente diseñado para adaptarlo a la cámara CMOS. La distancia de la lente de la cámara al plano de referencia es de 18 cm. En estas condiciones se obtuvo un campo de observación de 215 x 135 mm.

La cámara EO-0413 Color USB 3.0, cuenta con las siguientes características:

- **Formato de sensor de cámara:** 1/3"
- **Resolución** (Mega Píxeles): 0.3
- **Píxeles:** 752 x 480
- **Tipo:** Color Camera
- **Dimensiones** (mm): 29 x 29 x 29
- **Cuadros por segundo**(fps): 100 imágenes
- **Dispositivo:** ON Semi MT9V032
- **Fabricante:** EO
- **Profundidad de píxel:** 10-bit
- **Tamaño de píxel** (μ m): 6 x 6
- **Área de detección** (mm): 4.5 x 2.8
- **Tipo de sensor:** Exploración progresiva CMOS
- **Tipo de obturador:** Global
- **Salida de video:** USB 3.0
- **Peso**(g): 43

El sistema de observación también cuenta con un objetivo



Longitud focal (mm): 12.0
Apertura (f / #): f / 1.8 - f / 16
Tipo: Lente de longitud focal fija
Distancia de trabajo (mm): 100 - ∞
Peso (g): 54

4.2.3. Sistema de Control de Adquisición y Procesamiento de Imágenes

En la parte del hardware se cuenta con



Se utilizó un portátil ASUSTek modelo X555DG con un procesador AMD A10-8700P Radeon R6, 10 Compute Cores 4C + 6G de 1,80 GHz, con una memoria ram de 8 GB utilizando, con un sistema operativo de 64 bits para digitalizar y procesar las imágenes captadas por la CMOS, todo esto mediante una interfaz creada en MATLAB.

Y para el software se utilizó la plataforma de MATLAB, donde se creó una interfaz que realiza todo el control de la reconstrucción, desde la parte de la proyección de las franjas, pasando por la adquisición de la información y tratado hasta mostrar los resultados.

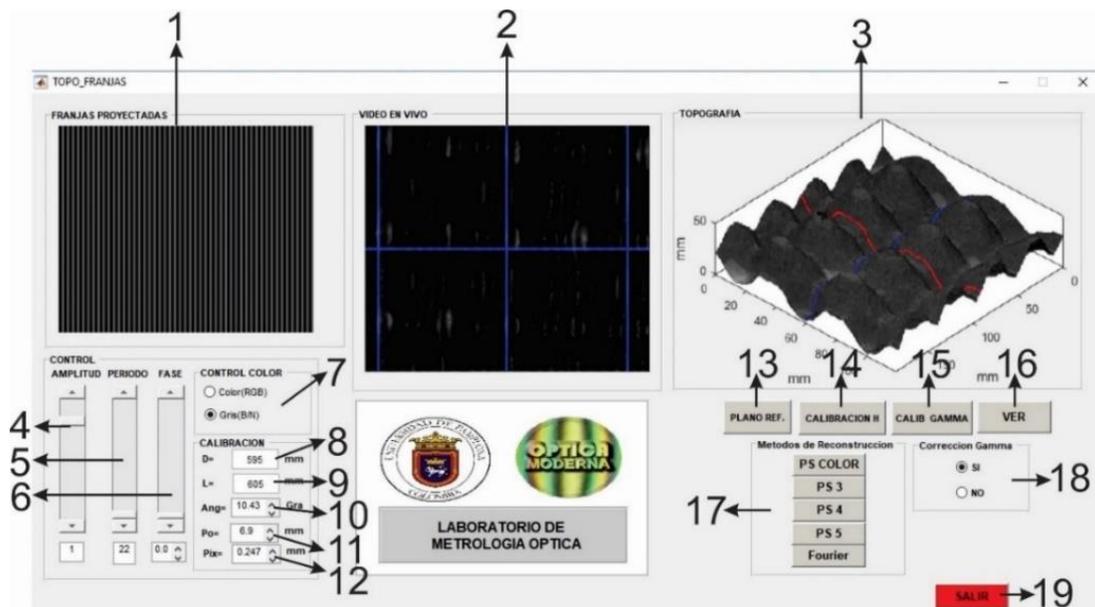


FIGURA 27. Interfaz de trabajo

En primera instancia la interfaz cuenta con tres ventanas donde en la primera (1) “FRANJAS PROYECTADAS”, se visualizan las franjas a proyectar, en la segunda (2) “VIDEO EN VIVO”, muestra la visualización de la cámara en vivo y finalmente en la tercera (3) “TOPOGRAFÍA”, muestra los procesos que lleva cada método hasta que realiza la reconstrucción.

1. **Franjas proyectadas:** Esta ventana muestra las franjas que se quieren visualizar y las modificaciones que se llevan a cabo para realizar una correcta reconstrucción.
2. **Video en vivo:** Esta ventana muestra lo que está captando la cámara en tiempo real, está cuenta con una mira para la correcta alineación de la cámara.
3. **Topografía:** En esta ventana se ven los pasos por los cuales pasan las respectivas capturas para finalmente realizar la reconstrucción, esta ventana cuenta con la ventaja que al momento de arrojar el

resultado final permite hacer una rotación de la imagen para poder tener una mejor vista si es necesario y también cuenta con una opción de guardar este resultado.

La interfaz cuenta con 3 sliders que controlan aspectos básicos de las franjas y una opción para elegir entre proyectar franjas a color o a blanco y negro.

4. **Amplitud:** Controla la intensidad lumínica de nuestras franjas
5. **Periodo:** Controla la separación de las franjas.
6. **Fase:** Controla el desplazamiento de las franjas.
7. **Control de color:** En esta parte es posible seleccionar si desea proyectar franjas a color o a blanco y negro.

También cuenta con una sección donde se ingresan parámetros del sistema manualmente que corresponde a datos experimentales del sistema ya montado, estos se toman experimentalmente cuando ya el sistema está montado

8. **D** (distancia del proyector al plano de referencia)
9. **L** (Distancia de la cámara al plano de referencia)
10. **Ang** (Angulo entre el eje óptico del proyector y la cámara)
11. **Po** (distancia entre las franjas sobre el plano de referencia)
12. **Pix** (tamaño del pixel que captura la cámara)

Con estos tres botones se realiza la calibración pertinente para la correcta reconstrucción

13. **Plano ref:** Con esta opción se registra los planos de referencia con cada periodo de franjas.
14. **Calibración H:** Con esta opción se registrará una calibración por alturas, con unos escalones donde conocemos la altura de cada escalón.
15. **Calib. Gamma:** Con esta opción se podrá llevar a cabo el proceso de calibración gamma de la cámara, mediante la proyección de una serie de intensidades de niveles de gris donde se analizará el nivel de intensidad de entrada y de salida.
16. **Ver:** En esta opción podemos visualizar todos los datos guardados en el proceso, como las calibraciones, los planos de referencia y las reconstrucciones.
17. **Métodos de reconstrucción:** Aquí podemos encontrar los métodos con los cuales podemos realizar la reconstrucción
18. **Corrección gamma:** Esta opción permite realizar reconstrucciones con o sin la corrección gamma.
19. **Salir:** Cierra la interfaz de trabajo, guardando los últimos parámetros de calibración automáticamente.

4.3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Se creó una interfaz donde se implementa un algoritmo que desarrolla automáticamente todos los procesos anteriormente mencionados, este activará el proyector, que emitirá unas franjas en niveles de gris o a color (RGB) dependiendo del método con el cual se desee realizar la reconstrucción, se realizará una captura de estas proyecciones sobre el objeto a reconstruir, estas imágenes capturadas representan las variaciones de franjas del sistema deformado.

El algoritmo se desarrolla en la plataforma MATLAB, ya que esta provee diversas herramientas que facilitarán el desarrollo del código y la creación de la interfaz donde su principal aspecto es la interactividad, automatización y fácil uso por parte del usuario; esta interfaz puede realizar ajustes en tiempo real de las franjas, esta permite visualizar las diferentes fases por las cuales deberá pasar para obtener la reconstrucción en 3D.

5. CALIBRACIÓN

5.1. CALIBRACIÓN DEL ESPACIO VISUAL

La resolución de una imagen indica la cantidad de detalles que puede observarse en esta. Para las imágenes digitales almacenadas como mapa de bits, la convención es describir la resolución de la imagen con dos números enteros, donde el primero es la cantidad de columnas de píxeles (cuántos píxeles tiene la imagen a lo ancho) y el segundo es la cantidad de filas de píxeles (cuántos píxeles tiene la imagen a lo alto).

Se puede decir que para componer una imagen se hace una retícula compuesta por celdillas. Cada una de las celdillas de dicha retícula se llama píxel. Un píxel, pese a ser una unidad de medida, es un concepto inmaterial que no tiene una medida concreta. La resolución se expresa en ppp. o ppi, y son los píxeles por unidad de longitud que mide una imagen; es decir, los píxeles por pulgada que contiene. Y recordemos que una pulgada mide 2,54 cm. Por lo tanto, la resolución mide la cantidad de píxeles que contiene una imagen y establece la relación entre las dimensiones digitales y las físicas. En definitiva, a mayor número de píxeles por pulgada, mayor concentración de puntos en menos espacio, y por lo tanto mayor calidad de imagen.

Ahora, cuando decimos que una imagen tiene una resolución pongamos por caso de 752 x 480, ¿qué significan estas cifras?; Es el tamaño de la imagen digital calculando su anchura por la altura. Es decir, en esta dicha imagen tendrá una resolución de 360.960 píxeles.

Muestro trabajo se centra en encontrar el tamaño del pixel, esto se realiza cuando el sistema este montado y fijo, porque a mayor distancia este la cama del plano de reconstrucción la cámara no podrá recolectar buena información.

El tamaño del pixel lo podremos calcular de la siguiente forma

$$TAMAÑO\ PIXEL = \frac{TAMAÑO\ DEL\ CAMPO\ VISUAL}{NUMERO\ DE\ PIXELES} \quad \text{Ec. 20}$$

Recordemos que la resolución de la cámara es de 752 x 480 pixeles, donde los 752 son los pixeles por columnas que capta la cámara y los 480 son los pixeles que capta la cámara por filas.

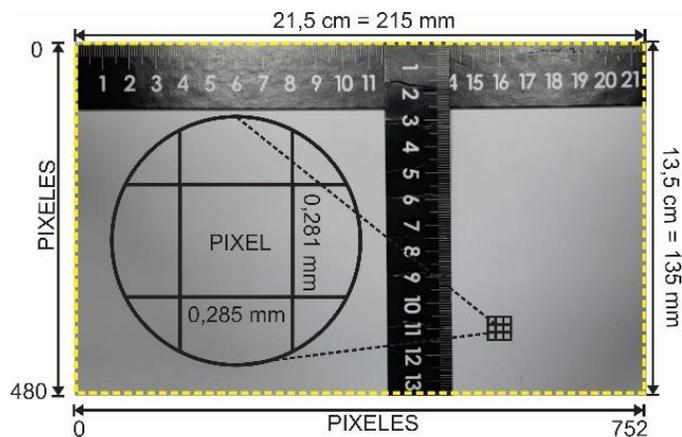


FIGURA 28. Espacio visual captado por la cámara

$$TAMAÑO\ PIXEL\ EJE\ X = \frac{215\ mm}{752} = 0,285\ mm$$

$$TAMAÑO\ PIXEL\ EJE\ Y = \frac{135\ mm}{480} = 0,281\ mm$$

5.2. CALIBRACIÓN POR ALTURA

En esta etapa se obtiene una ecuación que permite la conversión de valores de fase a alturas en milímetros. Para la calibración en alturas, debemos conocer con anterioridad la altura precisa de un objeto, en esta calibración utilizamos unos escalones con alturas previamente medida.

La altura de cada escalón fue medida con la ayuda de un vernier, los valores se pueden ver en la figura 28. Para el cálculo de la fase se proyecta un sistema de franjas sobre los escalones, figura 27, y posteriormente se calcula la fase utilizando el algoritmo de phase shifting a 5 imágenes, una vez obtenida la fase, se aísla los valores de fase de cada escalón, obteniendo de ahí, el valor promedio de fase y la dispersión de los mismos (desviación estándar).

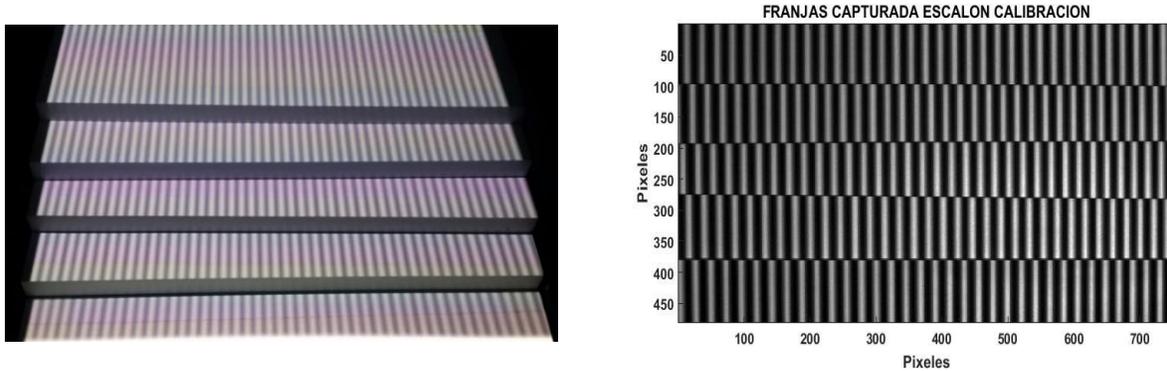


FIGURA 29: Franjas de escalón para la calibración

Obteniendo la fase en radianes de la escalera, se le asociara la altura real en milímetros de cada escalón, con esta relación se realizar el proceso para encontrar la ecuación de calibraciones mediante el ajuste por mínimos cuadrados. Para este caso el comportamiento encontrado es lineal, de la forma que satisface la siguiente ecuación

$$Z = m\varphi + B \text{ (mm)} \quad \text{Ec. 21}$$



FIGURA 30. Perfil topográfico de los escalones con sus respectivas relaciones de fase a alturas de cada peldaño

La desviación estándar (δ_a) obtenida por las rectas de ajuste es de alrededor de 0.5 mm, analizadas para los pasos de las franjas (ΔP) que posee el proceso de reconstrucción, que va desde un paso mínimo de 22mm hasta un paso máximo de 50mm, con un intervalo de 2 mm por cada paso, esto quiere decir que en total se realiza este proceso para un total de 15 pasos; por otro lado, la dispersión de los datos (δ_d) se encuentran entre 0.2 y

0.4 mm aproximadamente, obteniendo un aumento en esta dispersión en la medida que disminuye el paso de las franjas (ver figura 31).

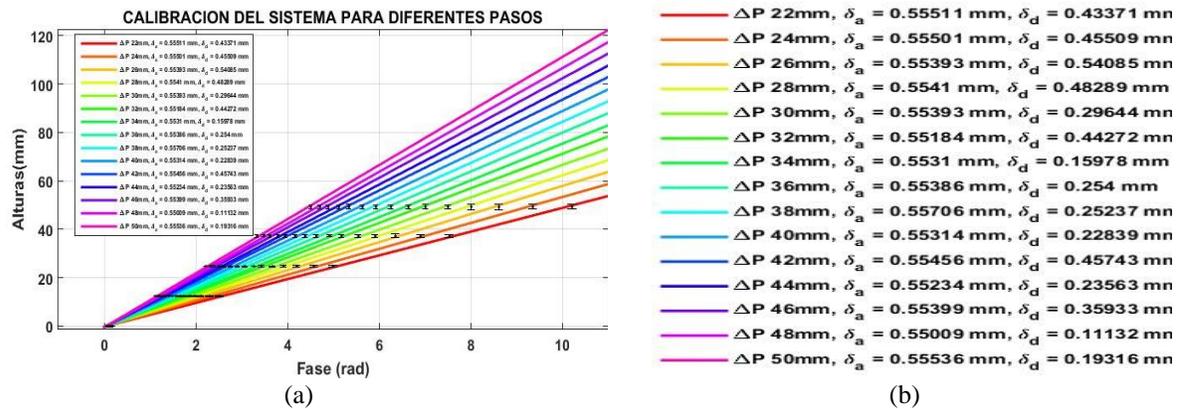


FIGURA 31. (a) Curvas de calibración, (b) resultados de la desviación estándar promedio de los datos medidos y de la desviación estándar del ajuste de la curva para cada paso.

En la figura 31b podemos ver la desviación estándar que sufre la calibración. Teniendo en cuenta la desviación estándar promedio de los datos medidos para cada paso δ_d , se puede ver que es menor para los pasos de menor dimensión. Por otro lado, la desviación estándar del ajuste de la curva de calibración δ_a , se mantiene constante. También observamos que para una altura de escalón determinada la dispersión se hace mayor, mientras el paso disminuye y de igual modo, esta aumenta si se aumenta la altura, para un valor de paso particular.

5.3. CALIBRACIÓN GAMMA

La Perfilometría por corrimiento de fase es un método de luz estructurada cuyas reconstrucciones tridimensionales son susceptibles de error por distorsión Gamma. En la práctica, la no linealidad de luminosidad causada por el efecto de distorsión Gamma de un video proyector digital y una cámara digital produce cambios de intensidad no deseados, que reducen sustancialmente la precisión de la medición. La precisión de la medición de estos métodos de reconstrucción generalmente se ve afectada por muchas fuentes de error, como: el ruido de la cámara, la no linealidad y la vibración [65]. El Proyector de Video Digital comercial y la cámara generalmente se fabrican para ser dispositivos no lineales, para adaptarlos al comportamiento de la visión humana [66], y la distorsión Gamma de estos dispositivos es el factor más importante que afecta la precisión de medición de la forma 3D.

En la PSP (Phase Shifting Profilometry), como se muestra en la Figura 19, una serie de patrones de franjas ideales, son generados por una computadora y proyectados a la superficie del objeto 3D usando un proyector comercial, la cámara captura la intensidad reflejada de la superficie del objeto 3D para su posterior procesamiento. Debido a la respuesta no lineal del sistema en la técnica PSP y a la reflectividad de la superficie del objeto, luminancia ambiental y el brillo del entorno, las imágenes de franjas capturadas se desviarán de su forma de onda del coseno ideal. A este conjunto de factores se les conoce como error distorsión gamma.

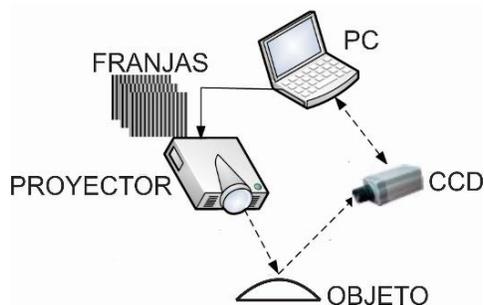


FIGURA 32: Calibración gamma

En este trabajo, se realiza una corrección gamma, proyectando al plano objeto diferentes valores de intensidades, controlando los niveles de grises en la imagen diseñada en el PC (intensidad de entrada) y realizando las capturas (intensidad de salida) que corresponden a cada nivel de intensidad de entrada. Con estos datos, se puede obtener el comportamiento que tiene el sistema entre la intensidad de entrada y la intensidad de salida, lo cual resulta en una curva experimental. La captura de los datos se realizó cada 10 niveles de gris y en cada nivel de gris se tomaron 10 datos, lo cual permite graficar los valores promedios y su dispersión (desviación estándar).

Posteriormente, se evalúa el comportamiento para los distintos parámetros del videobeam y de la cámara, para ver en que configuración de éstos es posible obtener una curva suave, continua y creciente que permita relacionar la intensidad de entrada y la de salida a través de una función que contenga todo el rango de niveles de grises, tanto en la entrada, como en la salida. Los parámetros de control de la cámara son: gamma (Gm), brillo (B), contraste (C), exposición (E), ganancia (G).

Los parámetros de la cámara y el proyector, se pueden controlar dentro de un rango de valores establecidos por el fabricante.

Parámetro	Rango	Parámetro	Valor
Gamma (G)	1 a 1000	Brillo	50
Brillo (B)	0 a 255	Contraste	52
Contraste (C)	0 a 100	Temperatura de calor	Bajo
Exposición (E)	-12 a -4	Intensidad de blanco	10
Ganancia (G)	0 a 100		
(a)		(b)	

Tabla 2. (a) Parámetros de control de la cámara. (b) Parámetros de control del videobeam

A continuación, se mostrará una serie de graficas mostrando el comportamiento que tiene la curva para cada combinación de configuración de parámetros de la cámara. Los parámetros del videobeam se establecieron por una rápida inspección, teniendo en cuenta evitar la rápida saturación de la cámara, estos son los vistos en la tabla 2(b). El procedimiento mediante el cual se realizó el estudio, fue a través de un barrido de cada parámetro a intervalos determinados (5 intervalos) por el número de valores a tener en cuenta en cada parámetro (6 valores), que en este caso es el mismo para todos los parámetros, con el propósito de hacer este proceso más simple. Sin embargo, la combinación de valores es muy alta, debido a esto, en una primera etapa se evalúa los efectos de cada parámetro sobre la curva que relaciona la intensidad de entrada con la de salida, obteniendo como conclusión que los parámetros que más influyen en los datos por parte de la cámara son el gamma, ganancia y exposición, mientras que el brillo y el contraste no producen cambios significativos.

Para la segunda etapa realizamos una variación más fina de los parámetros, dándole mayor importancia al gamma, la ganancia y la exposición. En las siguientes graficas se muestra algunas de las curvas obtenidas al variar estos parámetros.

❖ **VARIANDO GAMMA**

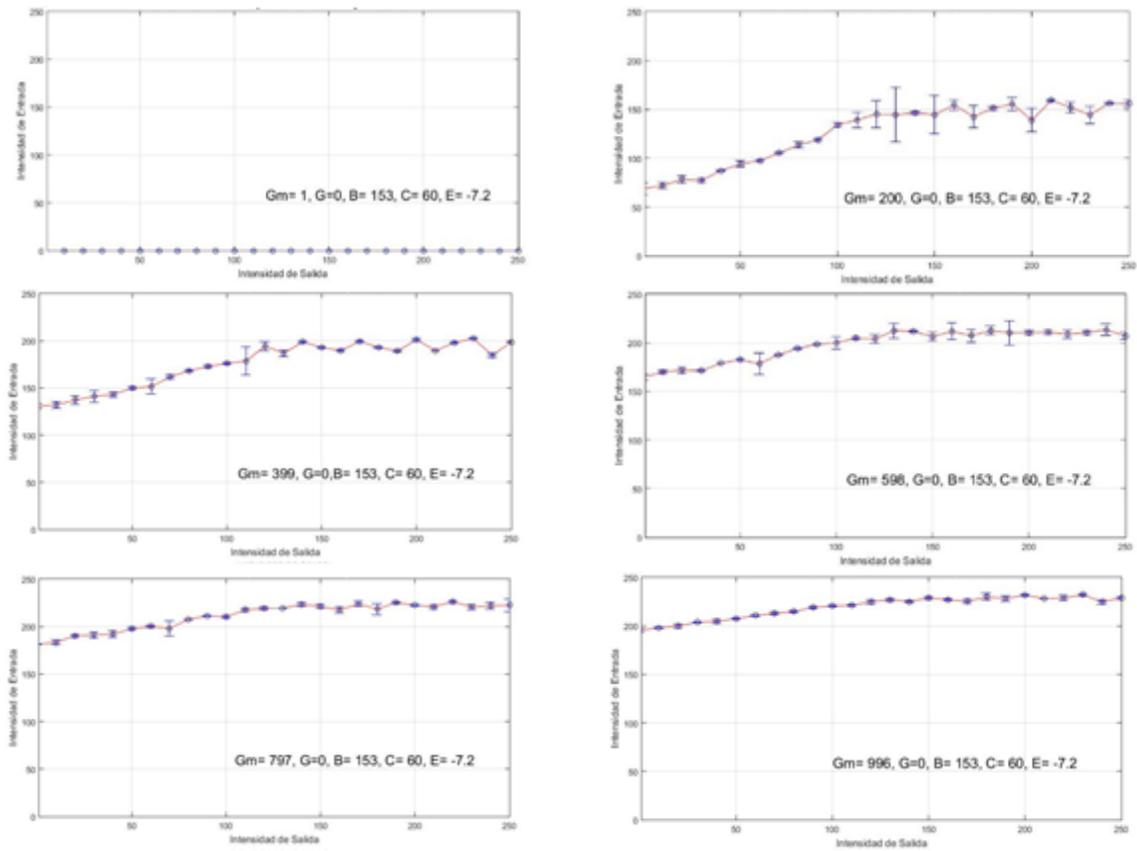


FIGURA 33. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 0, brillo en 153, contraste en 60, exposición en -7.2

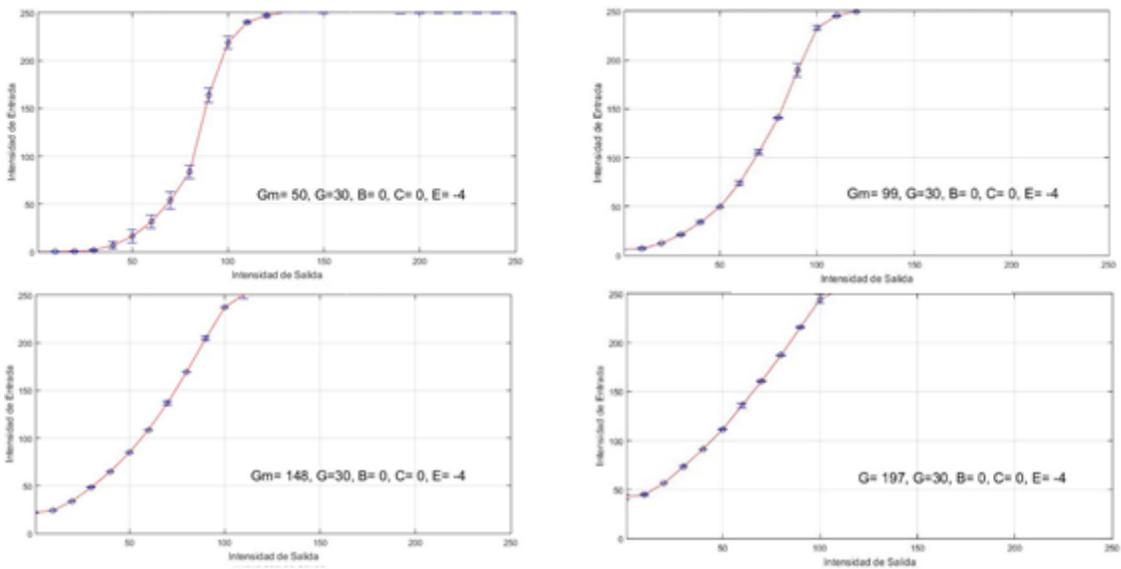


FIGURA 34. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 30, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4

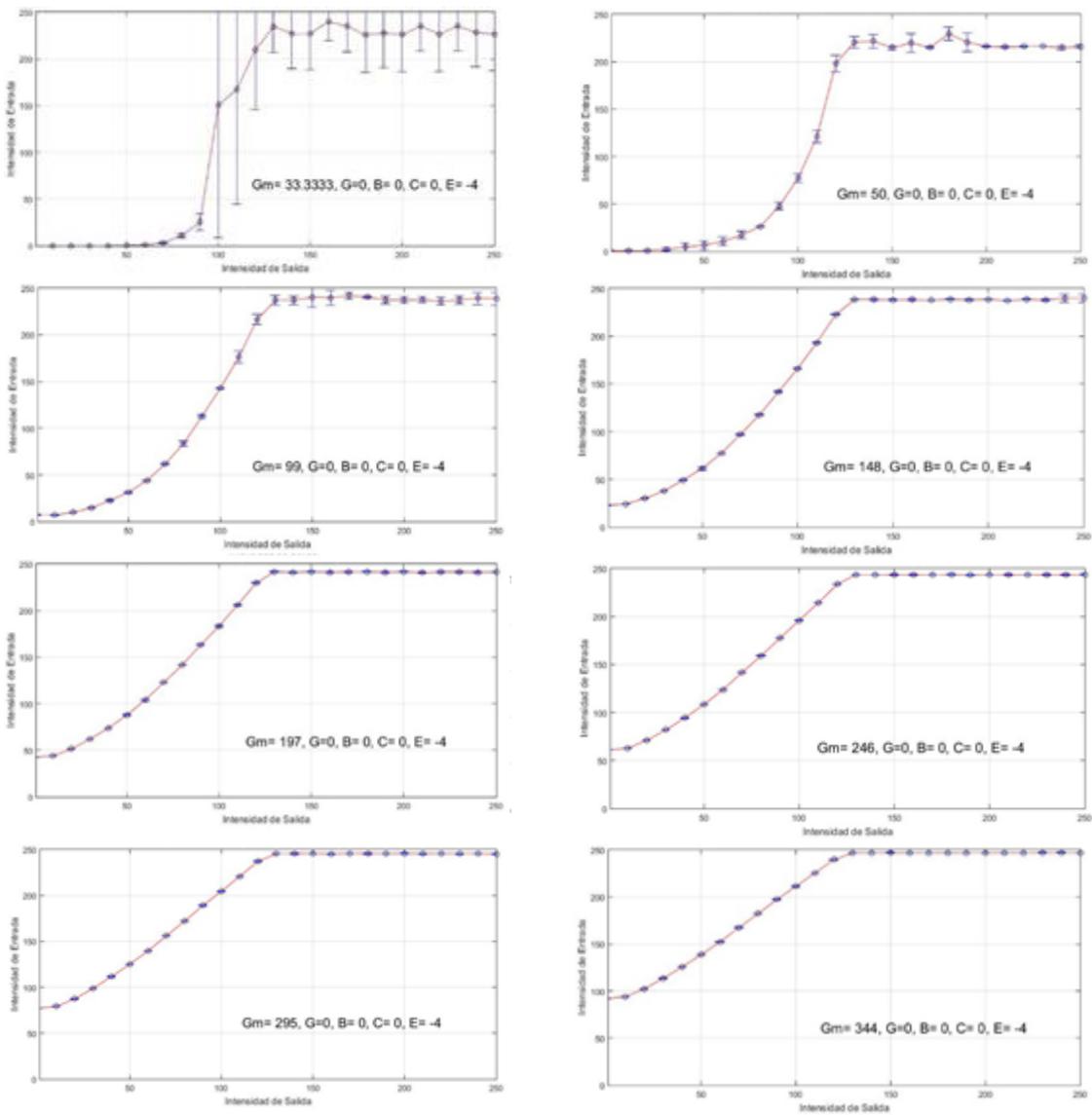


FIGURA 35. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 0, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4

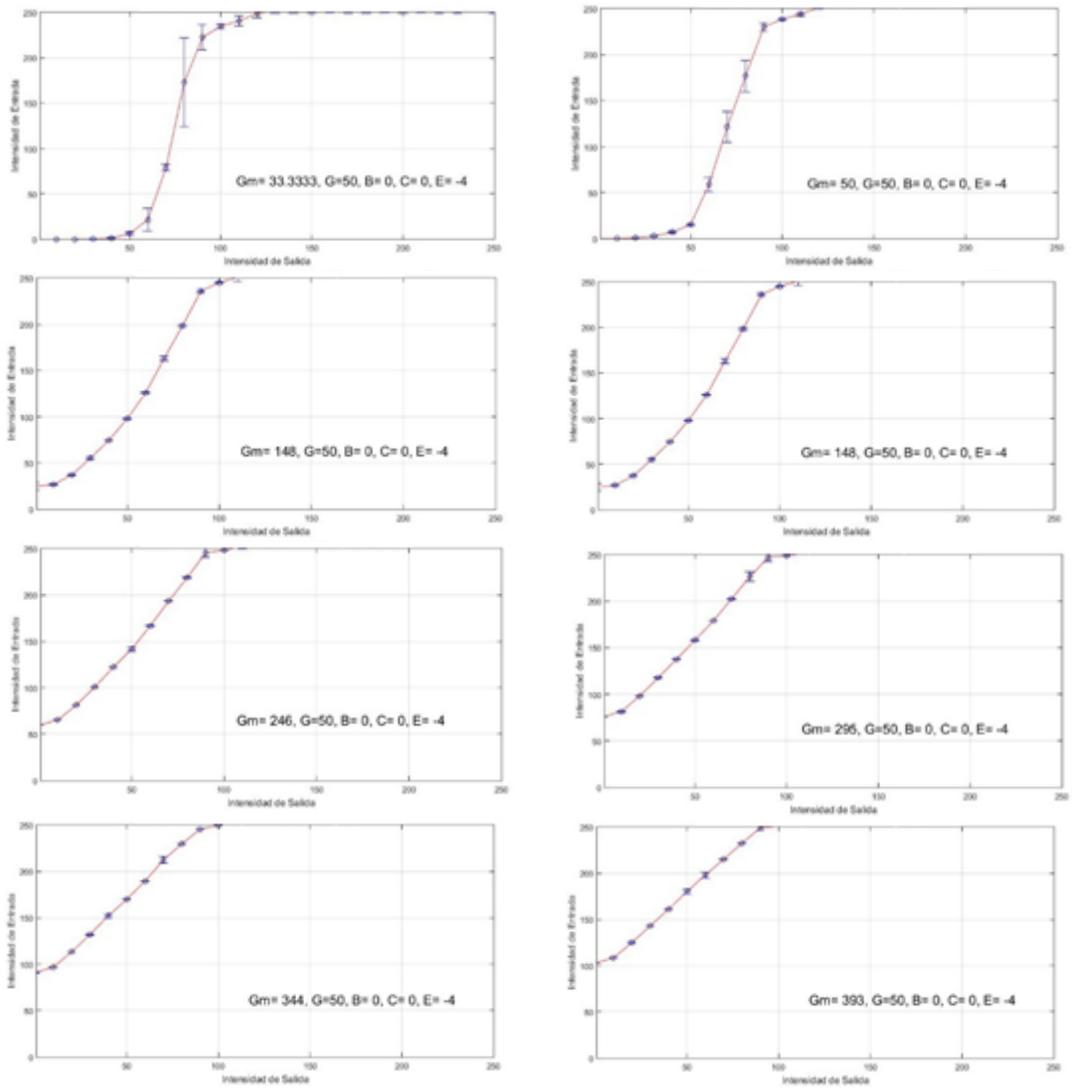


FIGURA 36. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 50, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4

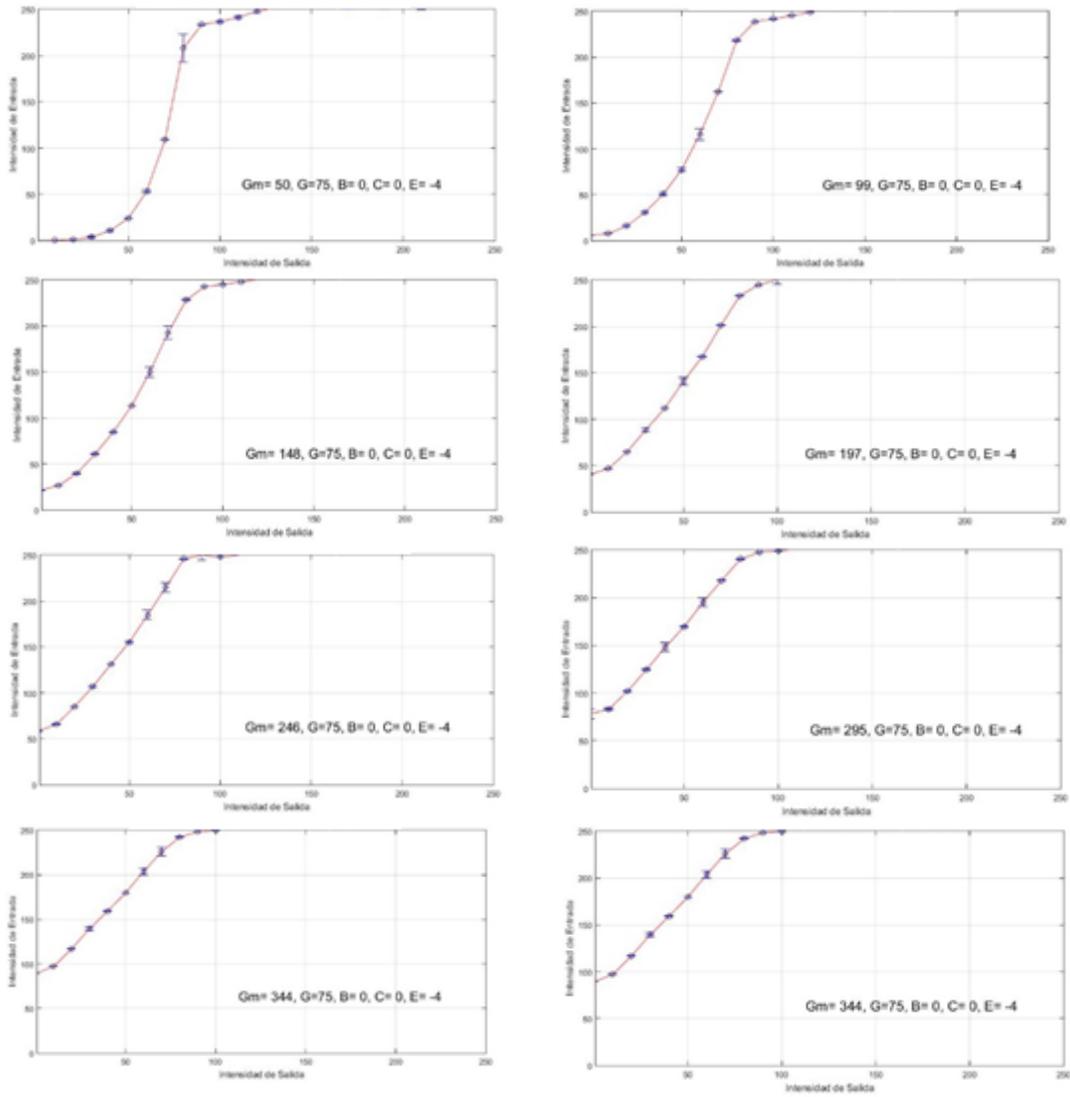


FIGURA 37. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 75, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4

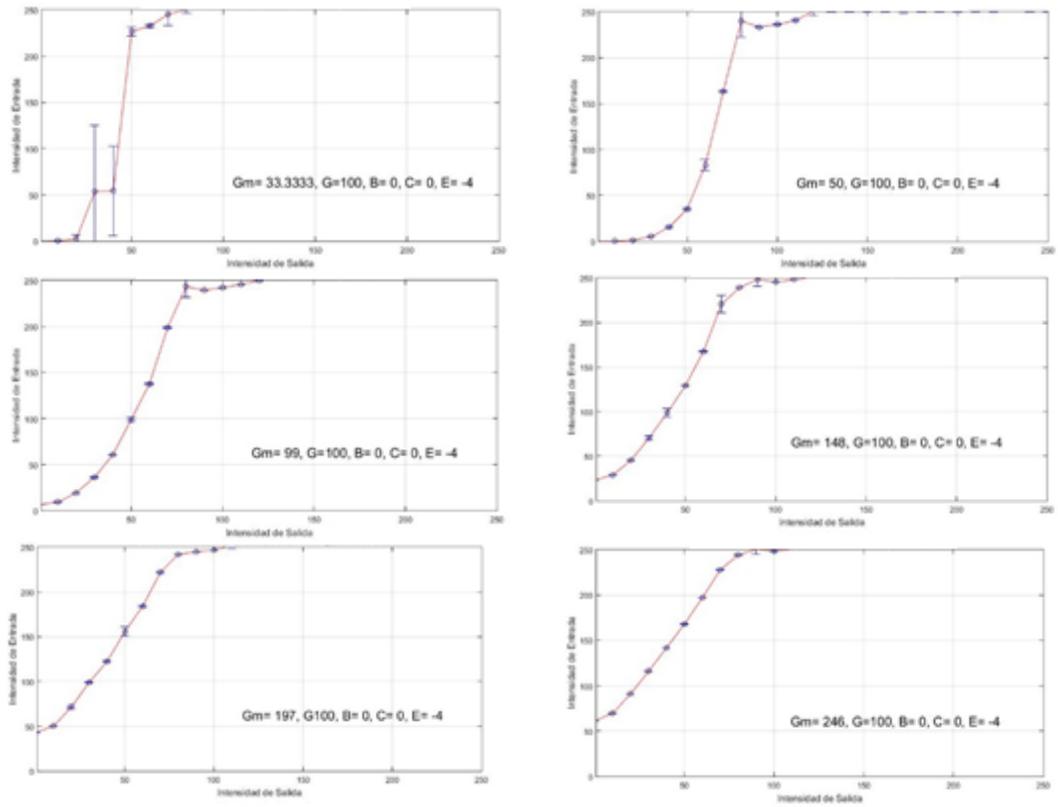


FIGURA 38. Variación del parámetro gamma, dejando los parámetros de ganancia en 100, brillo en 0, contraste en 0, exposición en -4

❖ VARIANDO EXPOSICIÓN

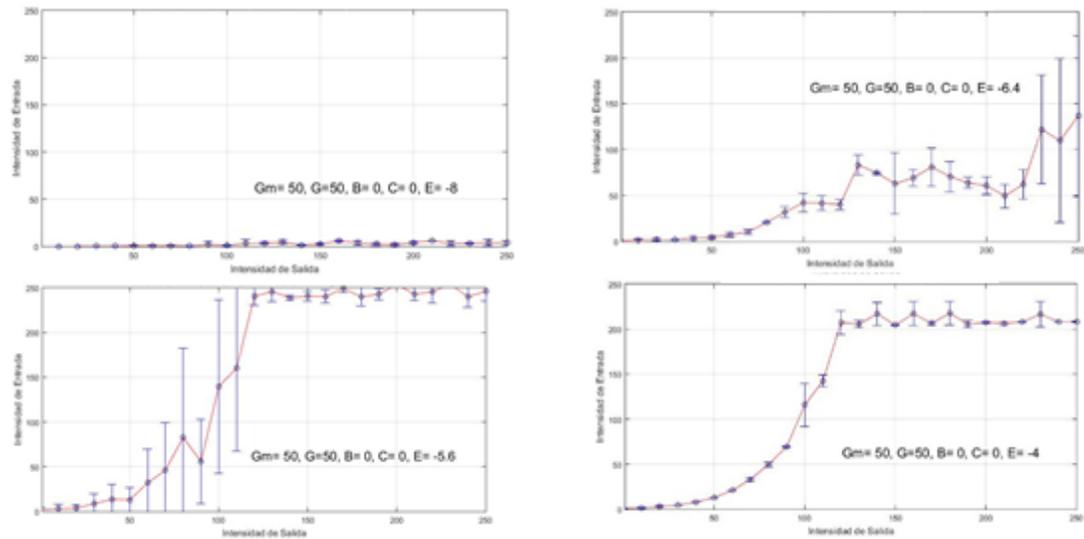


FIGURA 39. Variando del parámetro exposición, dejando los parámetros Gamma y ganancia en 50, brillo y contraste en 0

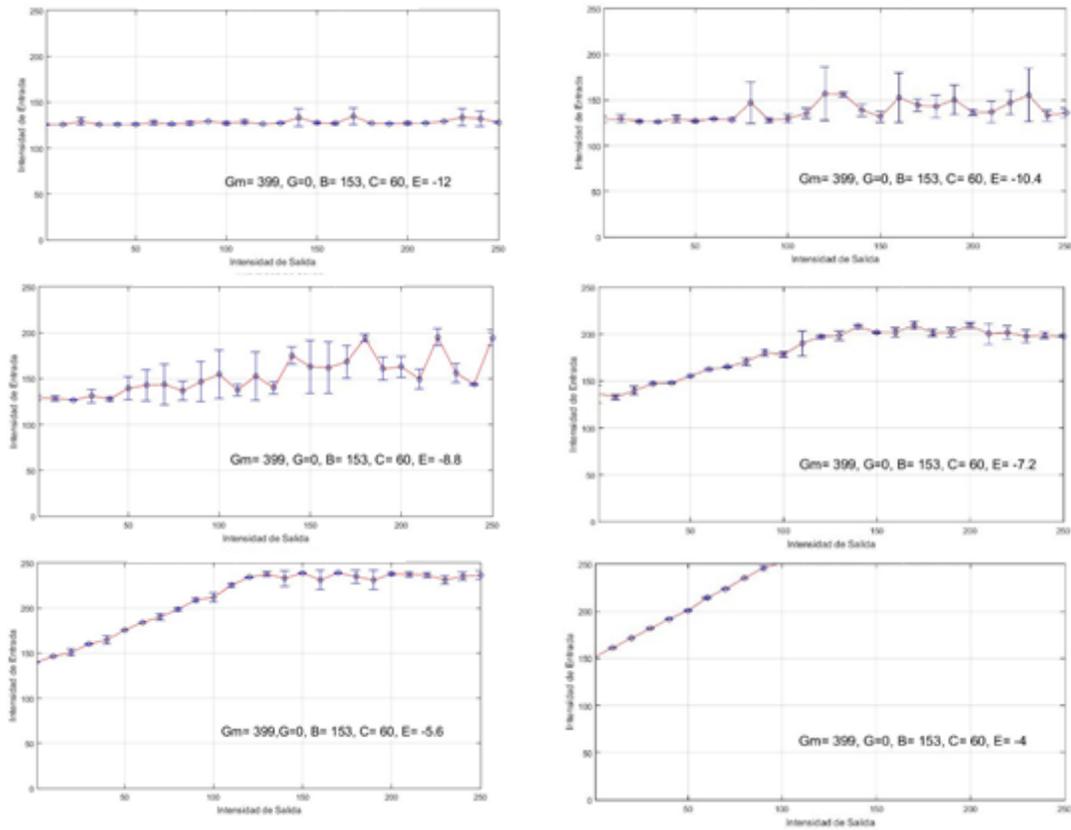


FIGURA 40. Variación del parámetro exposición, dejando los parámetros de gamma en 399, ganancia en 0, brillo en 153, contraste en 60

Finalmente, la curva que mejor comportamiento tiene, es decir que tiene un comportamiento suave y que cubre el mayor rango de intensidades, es con un gamma de 100, ganancia de 0, exposición de -4, contraste y brillo en 0, con estos parámetros la cámara tendrá un mejor comportamiento, dentro del sistema, recordando que el videobeam también influye en este comportamiento. Analizando la curva notamos que es funcional para valores de entrada de 0 a 120 niveles de gris y para valores de salida de 9 a 230 niveles de gris.

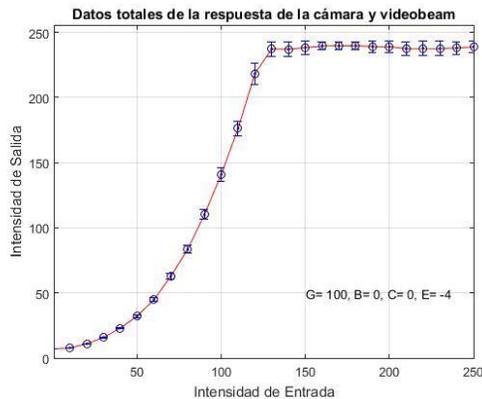


FIGURA 41. Datos totales cámara- videobeam

Ahora el proceso se centrará en realizar corrección al sistema utilizando esta curva. La idea es encontrar una curva de ajuste entre la intensidad de entrada y de salida, que permita despejar la intensidad de entrada, que finalmente es la que realizara la corrección.

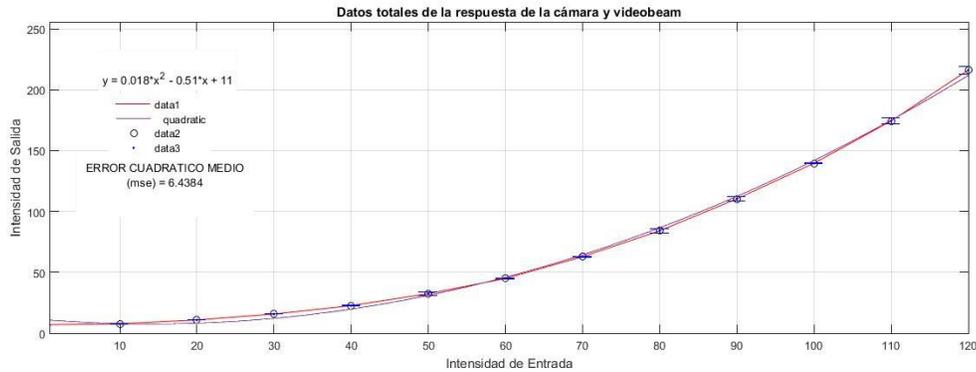


FIGURA 42. Datos óptimos cámara-videobeam

La ecuación de ajuste por mínimos cuadrados obtenida es,

$$I_s = 0.018I_E^2 - 0.51I_E + 11 \tag{Ec. 22}$$

Analizando la ecuación, no es una ecuación adecuada para realizar la corrección gamma, ya que no es uno a uno y no permite realizar el despeje necesario.

Para encontrar una ecuación de corrección lo que haremos es invertir los ejes, para que la curva posea otro tipo de comportamiento, de esta forma encontraremos que estos datos tendrán un comportamiento de tipo logarítmico.

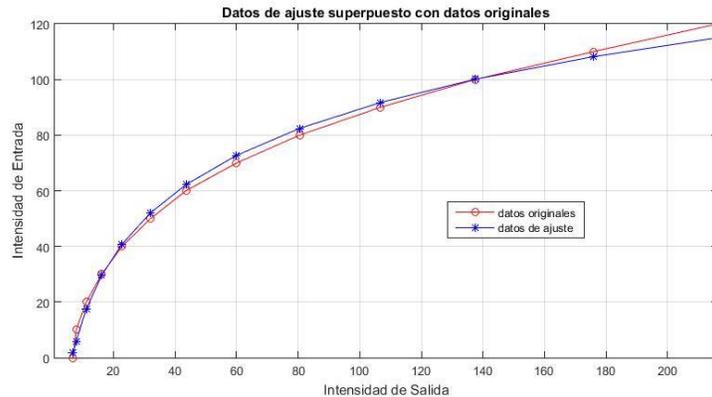


FIGURA 43. Superposición de datos reales con datos de ajuste

Evaluando el comportamiento de los datos, estos son de la forma

$$I_E = a \ln(I_s) \pm c \tag{Ec. 23}$$

Realizamos un ajuste logarítmico se obtiene la siguiente ecuación.

$$I_E = 32.986 \ln(I_s) - 62.3226 \tag{Ec. 24}$$

Esta es la ecuación para realizar la corrección gamma, esta ecuación la implementaremos a cada uno de los métodos de reconstrucción con una opción de utilizarla o no.

La corrección radica que todas las capturas realizadas por la cámara deben pasar por esta función y sus intensidades deben ser modificadas. Para verificar los efectos de la corrección realizamos una captura del sistema de franjas y evaluamos los efectos de la función de corrección. En la figura 42 podemos apreciar la imagen capturada y la imagen corregida, así como el perfil de una de las filas del sistema de franjas en las dos imágenes.

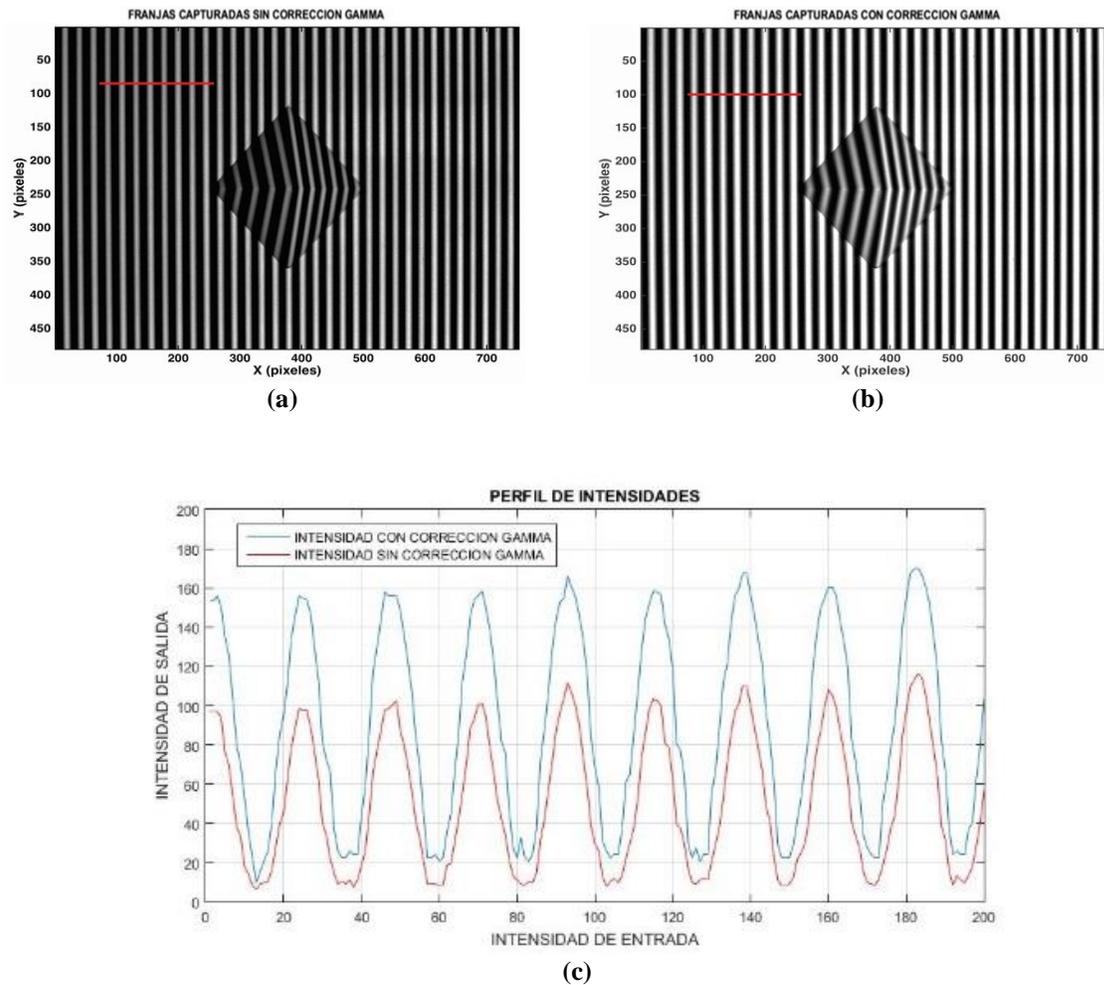


FIGURA 44. (a) *Captura de franjas sin corrección gamma*, (b) *Captura de franjas con corrección gamma*, (c) *Superposición del perfil de intensidad*

Este análisis se realiza en la fila 100 desde la columna 100 a la 300 de cada una de las imágenes capturadas, después visualizamos las intensidades de cada imagen y podemos apreciar el cambio en el patrón de intensidad de los datos capturados sin la utilizar la corrección, con los datos capturados utilizando la corrección gamma.

6. PASOS DE LA RECONSTRUCCIÓN

En el proceso de reconstrucción encontraremos las siguientes fases por las cuales el objeto a reconstruir debe someterse

1. *Proyección de las franjas con su respectiva captura*

➤ PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR

Este método solo se realiza una sola captura con unas franjas proyectadas a color, esta captura trae la información de los 3 planos (RGB) que es necesarias para utilizar el método.

➤ PHASE SHIFTING A 3, 4, 5 CAPTURAS

Estos métodos se diferencian en el número de capturas, ya que para cada método se necesita un número mínimo de información para calcular la fase, en el modo que se realiza la captura de información es el mismo para todos, se realiza la proyección de las franjas sobre el objeto, estas franjas realizan un desplazamiento específico dependiendo del método seleccionado.

➤ TRANSFORMADA DE FOURIER

En este método solo necesitamos la captura de un solo dato para poder obtener la fase de trabajo y en vista de que la fase recuperada presenta saltos de fase de 2π y está contenida entre $-\pi$ y π , se aplica un algoritmo de desdoblamiento de fase

2. *Captura de la información*

Luego de utilizar algunos de los métodos de proyección, estos realizan la captura de cada sistema de franjas luego de su respectivo desfase, esta información será suministrada a las ecuaciones de cálculo de fase de cada método respectivamente.

3. *Wrapping*

Un mapa de fase es lo que obtenemos en este proceso, donde no han sido corregidas las discontinuidades introducidas en el proceso interferométrico.

Aquí nos muestra la fase calculada, recordando que la información de la fase se extrae con una función específica para cada método. Debido al uso de esta función trigonométrica, la fase extraída está comúnmente envuelta dentro del intervalo $(-\pi, \pi)$ donde se presentan discontinuidades y están en el rango de valores de 2π las cuales necesitan ser desenvueltas para poder utilizar la información continua requerida de fase.

La capacidad del algoritmo para corregir las discontinuidades presentes en un patrón de franjas envueltas depende, en general, de la calidad del interferograma mismo: que presente ausencia de ruido, un buen contraste, etcétera

4. *Unwrapping*

El proceso de eliminación de las discontinuidades en la fase recuperada es el proceso que se realiza en el desenvolvimiento de la fase o unwrapping. Antes de obtener la altura del cuerpo, es necesario realizar la conversión de fase discontinua a fase continua. Este procedimiento se realiza adicionando valores enteros de 2π en función de la discontinuidad de la fase. Una transición de π a $-\pi$, requiere de un valor de 2π para corregir la discontinuidad, en caso contrario, se debe adicionar -2π .

Este proceso se encarga de encontrar los valores de fase desenvueltos para integrar la fase a lo largo de una trayectoria determinada, es decir; sigue un camino de integración que cubre la totalidad del volumen de fase envuelta. En otras palabras, es el proceso por el cual se recupera el valor absoluto del ángulo de fase de una función continua que se extiende a lo largo de un rango mayor que 2π . Este valor absoluto se pierde cuando el término de fase se envuelve en sí mismo con una distancia repetitiva de 2π debido a la naturaleza sinusoidal fundamental de las funciones de ondas usadas en la medida de las propiedades físicas de esta, O simplemente puede ser también definido como el proceso de solucionar el problema de ambigüedad causado por el hecho que la fase absoluta está envuelta dentro del intervalo $(-\pi, \pi)$, recuperando la información continua de fase envuelta.

Este algoritmo es una integración de las diferencias de fase envueltas a lo largo de la ruta de desenvolvimiento. Los algoritmos intentan aislar regiones poco fiables en el mapa de fase y minimizar sus efectos sobre el

resultado sin envolver, esto lo hace definiendo la calidad de cada píxel en el mapa de fase con el fin de desenvolver los píxeles de más alta calidad primero y los píxeles de menor calidad últimos. El éxito o el fracaso de estos algoritmos dependen en gran medida de la producción de un mapa de buena calidad. El mapa de calidad se puede definir como una matriz de valores que definen la calidad o bondad de cada píxel del mapa de fase dada, estos mapas proporcionan información adicional sobre el mapa de fase envuelto. Esta información adicional proporciona una medida de la calidad de un píxel en particular en el mapa de fase envuelto.

5. *Resta del plano de referencia*

En este punto, también realizamos la resta del plano de referencia que se obtuvo para cada paso con el resultado del unwrapping, esto con el fin de colocar el plano que contiene la topografía del objeto horizontalmente, ya que gracias a la función lineal de intensidad, esta ira creciendo, obteniendo un plano inclinado.

6. *Conversión de radianes a milímetros*

Después de realizar esta resta, relacionaremos los resultados de la parte de calibración por altura, para que los resultados finales de la topografía del objeto a reconstruir estén con medidas reales (milímetros) y no con las medidas de fase (radianes).

7. *Topografía del objeto vista superior*

Los resultados que se pueden apreciar después de realizar la resta del plano de referencia y de asociar la calibración por altura a los resultados, es una vista superior de la topografía del objeto.

8. *Topografía del objeto en 3D*

Una vez obtenida la topografía del cuerpo en milímetros, se utiliza los parámetros de conversión de píxeles a milímetros. De esta manera se obtiene una figura 3D digital de la superficie del cuerpo. En esta última etapa, podremos visualizar el objeto reconstruido en 3D. Aquí se podrá realizar

- ✓ rotaciones en sus tres ejes
- ✓ zoom
- ✓ datos de puntos específicos

Siguiendo los procedimientos de reconstrucción y el procedimiento de calibración explicados en los capítulos anteriores, se reconstruye un objeto con forma geométrica piramidal, las siguientes figuras muestran las imágenes de cada uno de los pasos realizados desde la proyección de las franjas y su captura hasta la reconstrucción 3D correspondiente.

7. RESULTADOS

En este capítulo se calcula la precisión de los métodos utilizados, comparando las medidas obtenidas por los métodos implementados con las dimensiones del objeto de prueba, también se pueden apreciar los resultados de los métodos de reconstrucción con corrección y sin corrección gamma, comparándolos con las dimensiones del objeto de prueba.

Para evaluar la precisión de los métodos implementados, se construyó un objeto con geometría piramidal con una altura conocida, de esta forma se puede comparar la medida reportada por la reconstrucción la cual es más fácil apreciarla graficándola con el perfil topográfico y las medidas del objeto de prueba, utilizando un vernier.

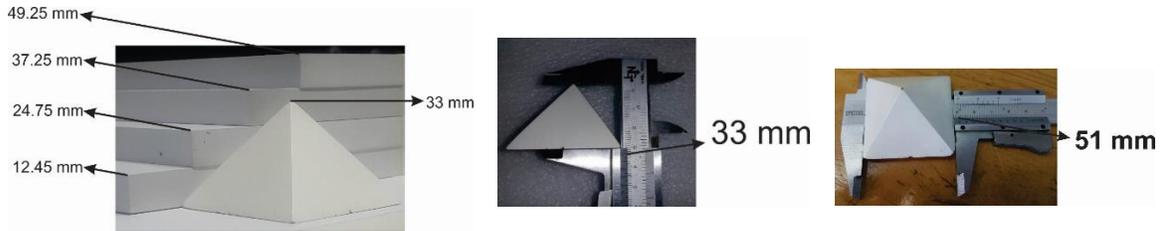


FIGURA 45. Medidas del objeto de prueba

En la primera etapa se aprecia las capturas de cada sistema de franja con sus respectivos desfases, la fase calculada, el resultado del unwrapping y finalmente la topografía del objeto de prueba después de ser sometido a cada método de reconstrucción.

7.1. PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR

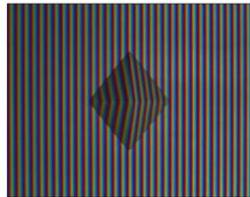


FIGURA 46. Imágenes capturadas franjas a color

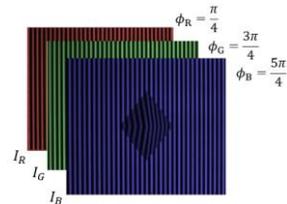


FIGURA 47. Planos RGB de las franjas a color capturadas

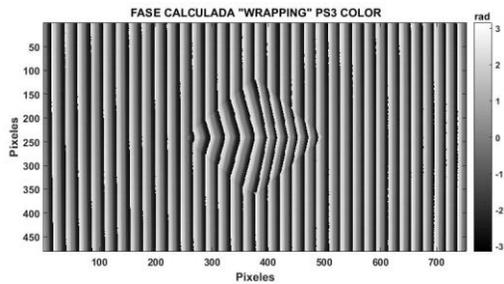


FIGURA 48. Fase calculada PS color

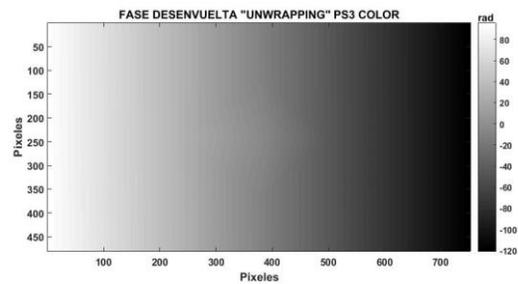


FIGURA 49. Fase desenvuelta PS color

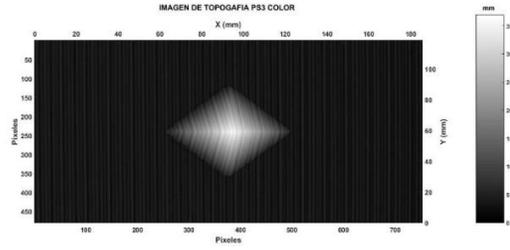


FIGURA 50. Topografía objeto reconstruido vista superior PS color

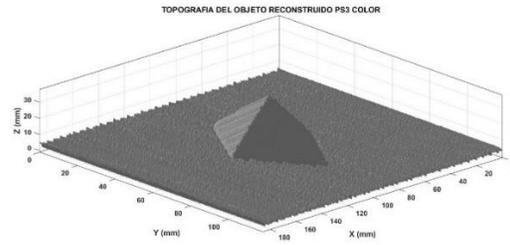


FIGURA 51. Topografía 3D objeto reconstruido PS color

7.2. PHASE SHIFTING 3 CAPTURAS

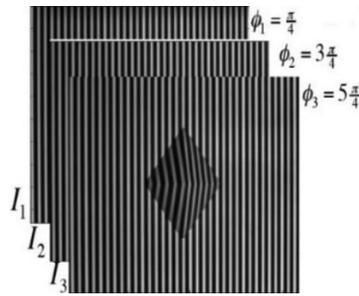


FIGURA 52. Imágenes capturadas PS3

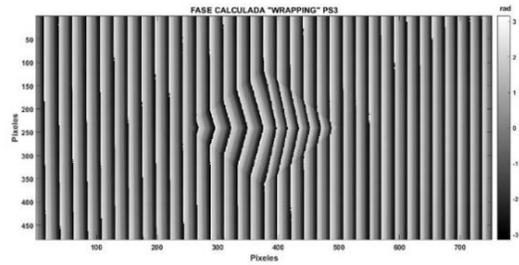


FIGURA 53. Fase calculada PS3

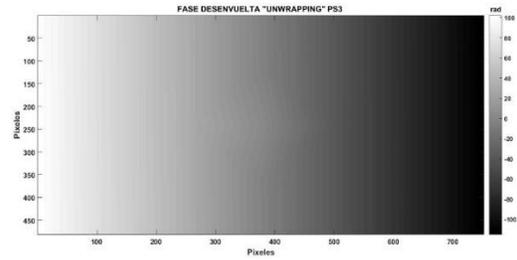


FIGURA 54. Fase desenrollada PS3

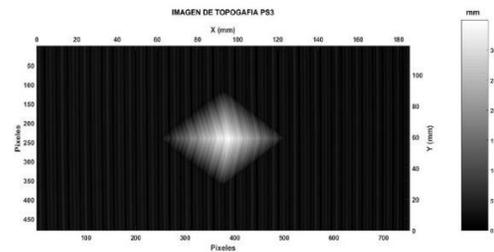


FIGURA 55. Topografía objeto reconstruido vista superior PS3

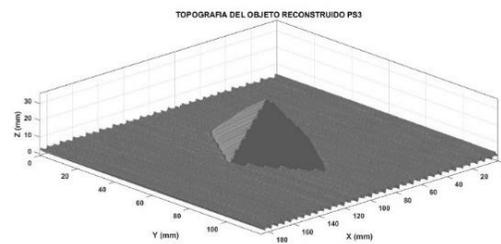


FIGURA 56. Topografía 3D objeto reconstruido PS3

7.3. PHASE SHIFTING 4 CAPTURAS

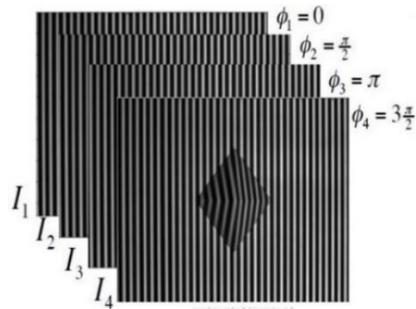


FIGURA 57. Imágenes capturadas PS4

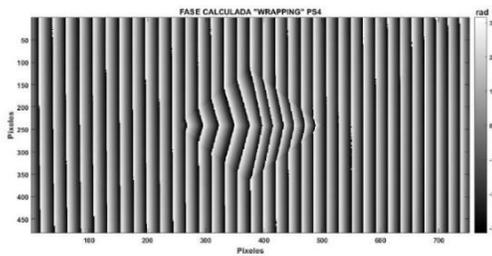


FIGURA 58. Fase calculada PS4

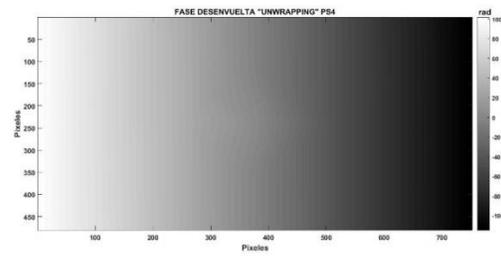


FIGURA 59. Fase desenvuelta PS4

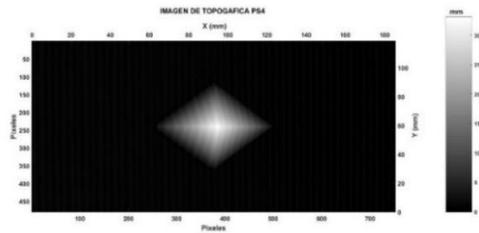


FIGURA 60. Topografía objeto reconstruido vista superior PS4



FIGURA 61. Topografía 3D objeto reconstruido PS4

7.4. PHASE SHIFTING 5 CAPTURAS

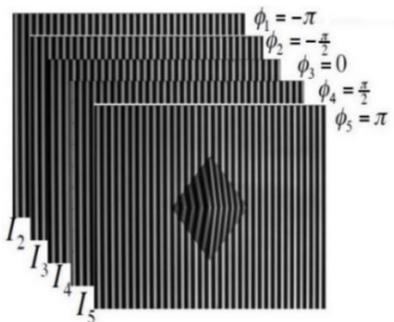


FIGURA 62. Imágenes capturadas PS5

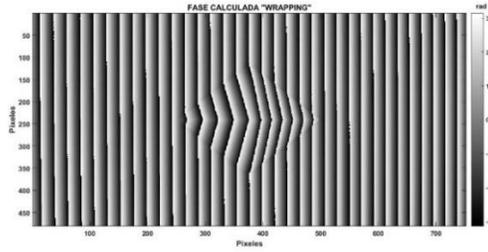


FIGURA 63. Fase calculada PS5

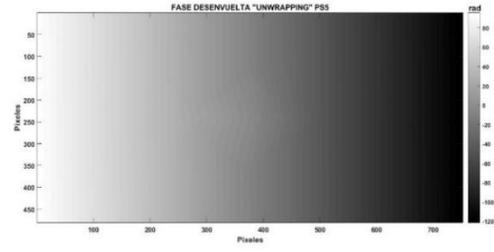


FIGURA 64. Fase desenvuelta PS5

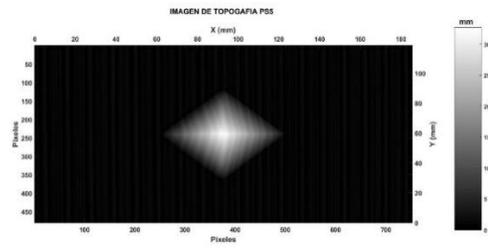


FIGURA 65. Topografía objeto reconstruido vista superior PS5

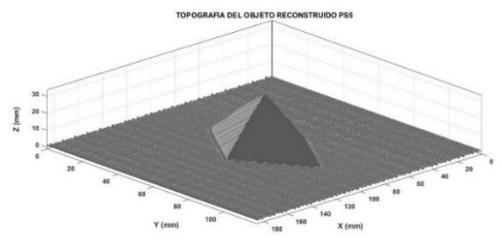


FIGURA 66. Topografía 3D objeto reconstruido PS5

7.5. TRANSFORMADA DE FOURIER

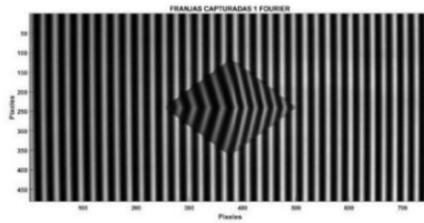


FIGURA 67. Imagen capturada Fourier

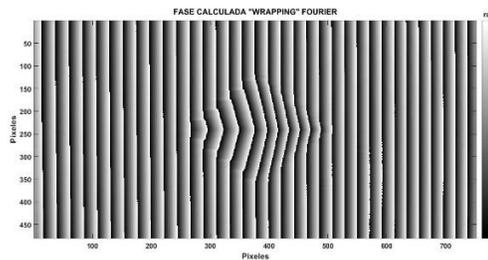


FIGURA 68. Fase calculada Fourier

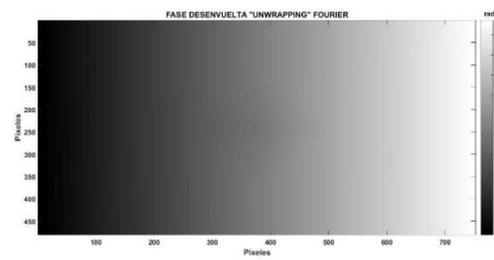


FIGURA 69. Fase desenvuelta Fourier

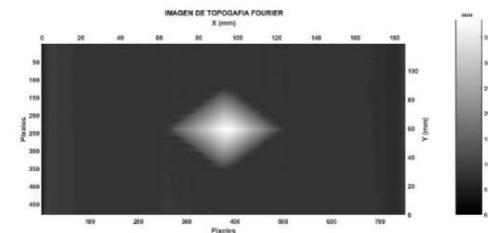


FIGURA 70. Topografía objeto reconstruido vista superior Fourier

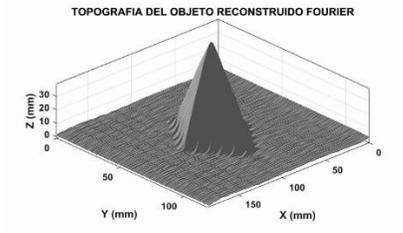


FIGURA 71. Topografía 3D objeto reconstruido Fourier

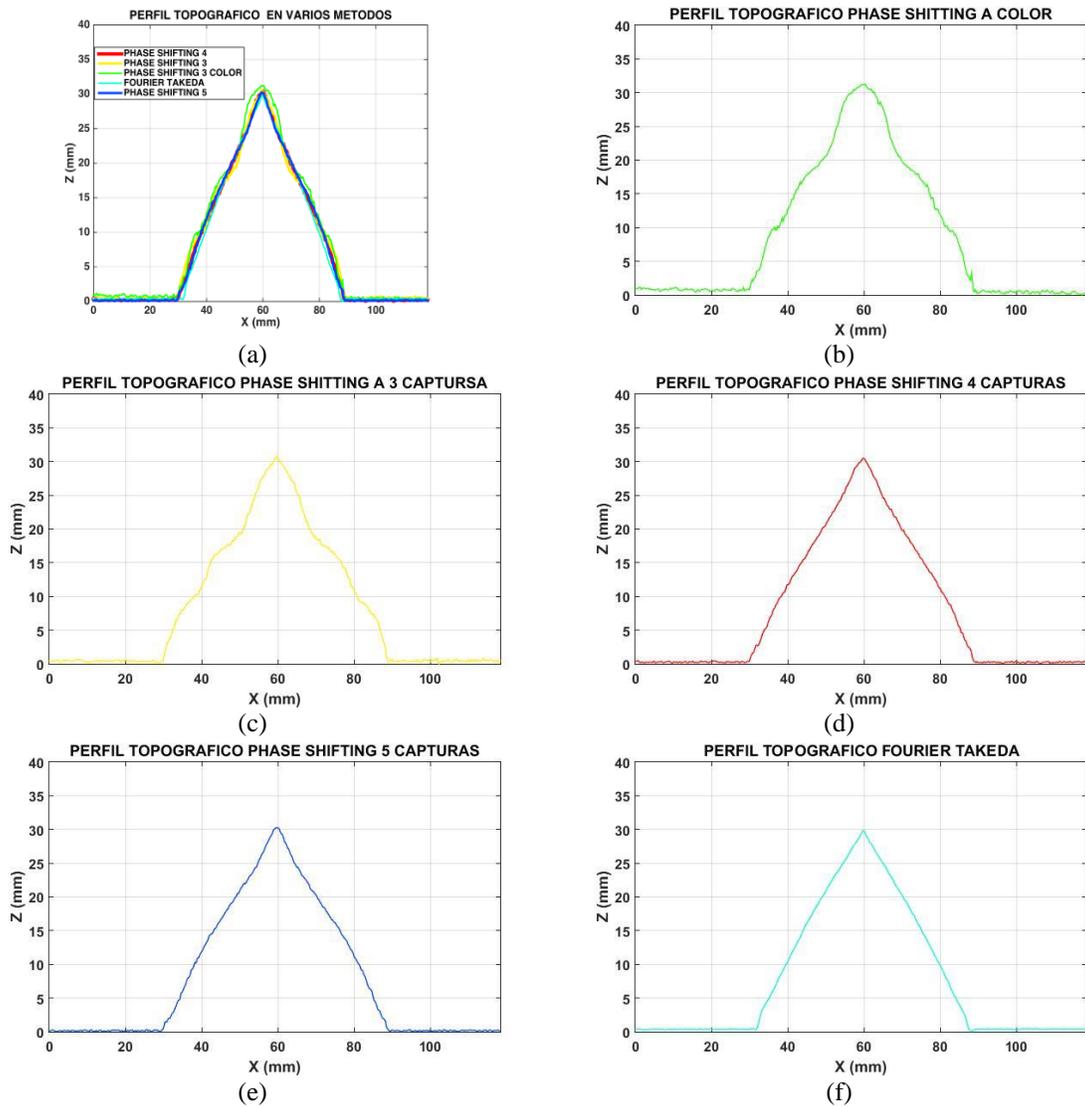


FIGURA 72. (a) Superposición de topografías de cada método de reconstrucción, (b) topografía método PS a color, (c) topografía método PS a 3 capturas, (d) topografía método PS a 4 capturas, (e) topografía método PS a 5 capturas, (f) topografía método de reconstrucción por transformada de Fourier.

En la figura 72 podemos apreciar el resultado de cada método graficando el perfil topográfico de cada método, realizando un análisis a los datos de estos resultados, podremos saber el porcentaje de error de cada método mediante la ecuación:

$$\% \text{ ERROR} = \frac{\text{VALOR TEORICO} - \text{VALOR EXPERIMENTAL}}{\text{VALOR TEORICO}} * 100 \quad \text{Ec. 25}$$

Obteniendo los siguientes resultados:

➤ **PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR**

Para la altura se reportan 31.19 mm, esto nos arroja un % de error de 5,48%; para la base se reporta un ancho de 54,25 mm, esto nos arroja un % de error de 5,99%.

➤ **PHASE SHIFTING A 3 CAPTURAS**

Para la altura se reportan 30,44 mm, esto nos arroja un % de error de 7,75%; para la base se reporta un ancho de 53,83 mm, esto nos arroja un % de error de 5,54%.

➤ **PHASE SHIFTING A 4 CAPTURAS**

Para la altura se reportan 30,54 mm, esto nos arroja un % de error de 7,45%; para la base se reporta un ancho de 53,12 mm, esto nos arroja un % de error de 4,15%.

➤ **PHASE SHIFTING A 5 CAPTURAS**

Para la altura se reportan 30,22 mm, esto nos arroja un % de error de 8,42%; para la base se reporta un ancho de 52,57 mm, esto nos arroja un % de error de 3,07%.

➤ **TRANSFORMADA DE FOURIER**

Para la altura se reportan 29,86 mm, esto nos arroja un % de error de 9,51%; para la base se reporta un ancho de 52,33 mm, esto nos arroja un % de error de 2,60%.

Con estos resultados llegamos a que el mejor método de reconstrucción es phase shifting a 5 capturas, esto debido a que este recolecta mayor información de la topografía del objeto a reconstruir.

En la segunda etapa de los resultados analizaremos la corrección gamma que se implementó donde las 2 primeras figuras de cada método muestran la topografía del objeto de prueba utilizando corrección gamma y sin corrección gamma, y en la tercera se muestra el perfil superpuesto de cada una de las topografías realizadas

7.6. PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR

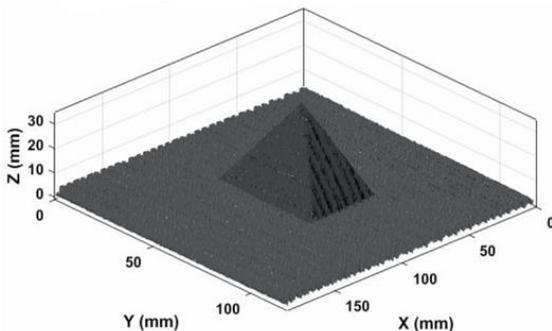


FIGURA 73. Topografía con corrección gamma PS color

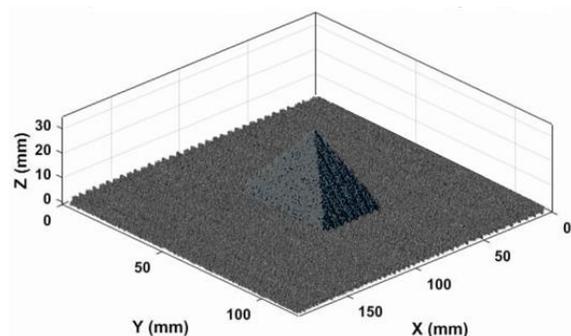


FIGURA 74. Topografía sin corrección gamma PS color

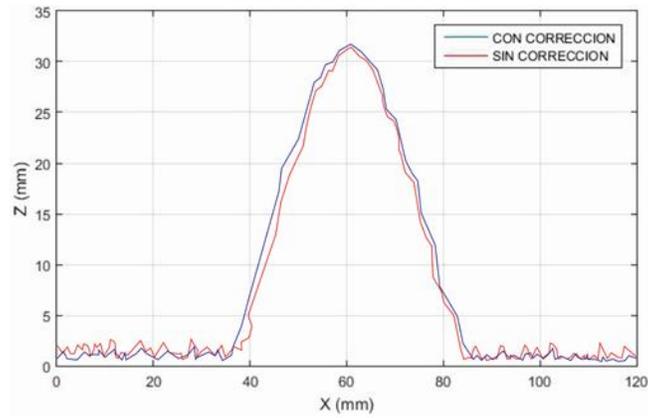


FIGURA 75. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS color

7.7. PHASE SHIFTING 3 CAPTURAS

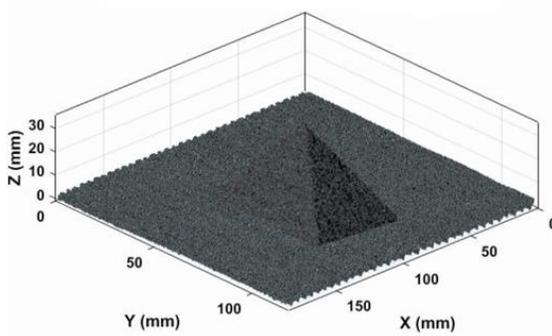


FIGURA 76. Topografía con corrección gamma PS3

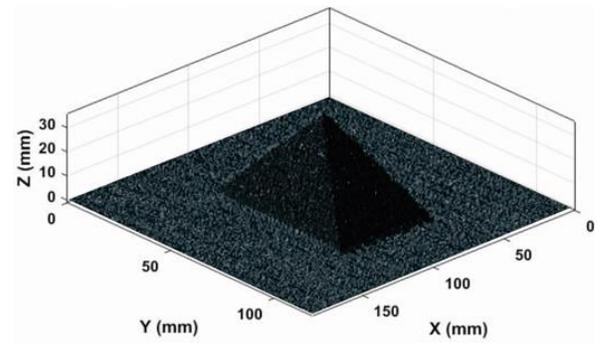


FIGURA 77. Topografía sin corrección gamma PS3

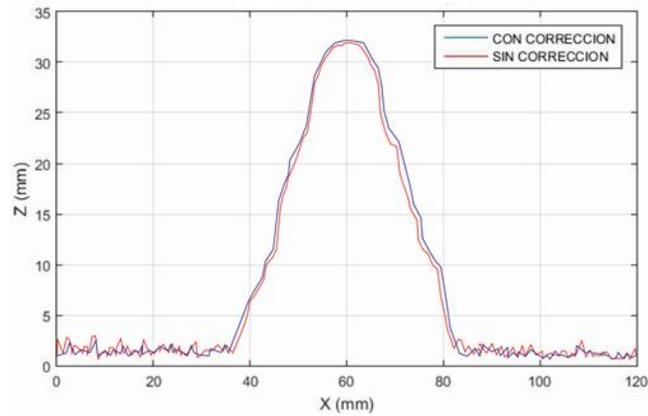


FIGURA 78. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS3

7.8. PHASE SHIFTING 4 CAPTURAS

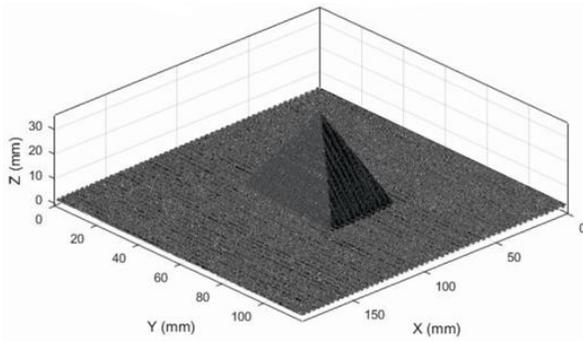


FIGURA 79. Topografía con corrección gamma PS4

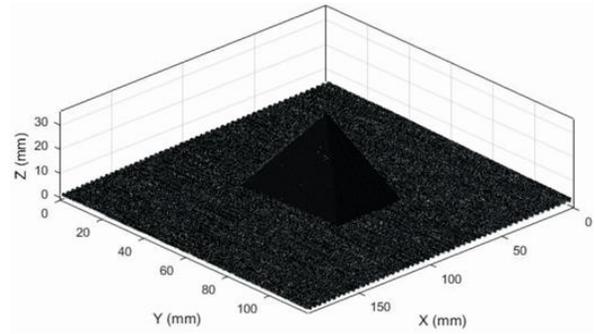


FIGURA 80. Topografía sin corrección gamma PS4

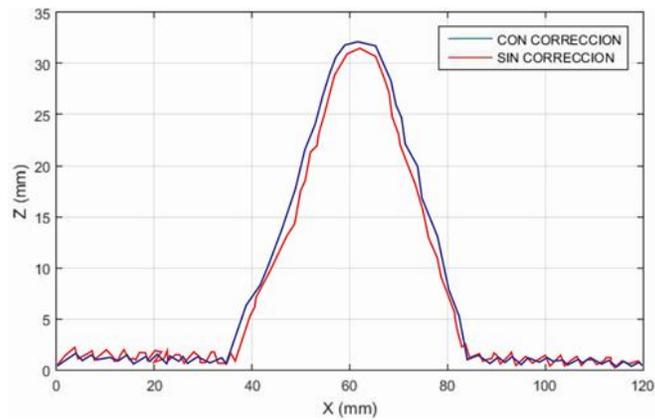


FIGURA 81. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS4

7.9. PHASE SHIFTING 5 CAPTURAS

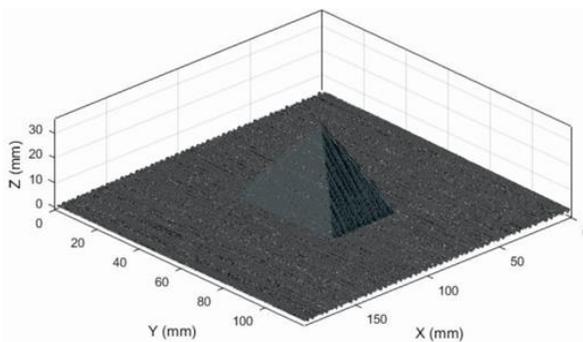


FIGURA 82. Topografía con corrección gamma PS5

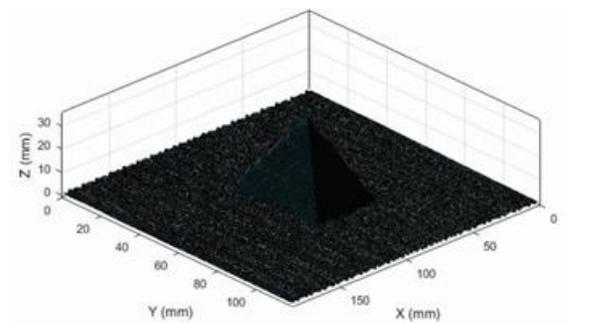


FIGURA 83. Topografía sin corrección gamma PS5

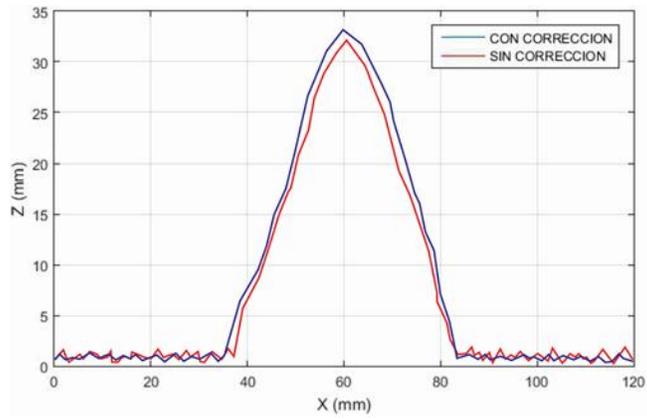


FIGURA 84. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma PS5

7.10. TRANSFORMADA DE FOURIER

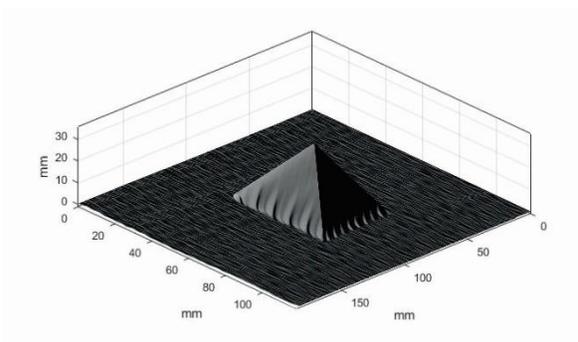


FIGURA 85. Topografía con corrección gamma Fourier

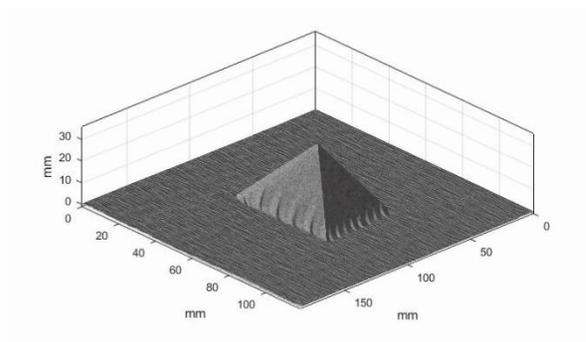


FIGURA 86. Topografía sin corrección gamma Fourier

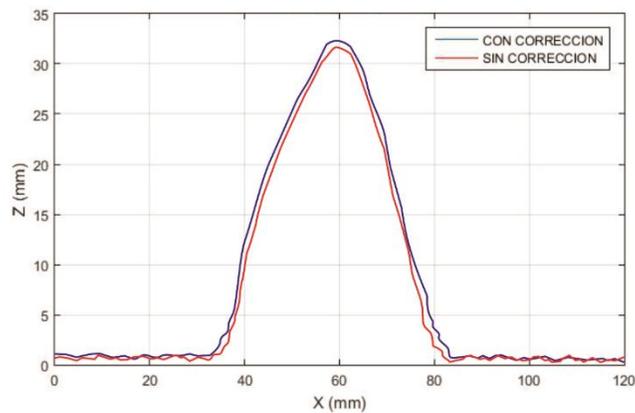


FIGURA 87. Perfil topográfico superpuesto con y sin corrección gamma Fourier

Se podrá apreciar que existe una cierta mejoría en las topografías de las reconstrucciones utilizando la corrección gamma, se aprecia un suavizado en ellas, pero esto se hará más visible viéndolo la superposición del perfil topográfico.

En la figura de la superposición de la topografía del objeto reconstruido utilizando la corrección gamma y sin ella podemos apreciar el resultado de cada método, realizando un análisis a los datos de estos resultados, podremos saber el porcentaje de error de cada método mediante la Ec. 25

➤ ***PHASE SHIFTING 1 CAPTURA A COLOR***

Con corrección gamma: Para la altura se reportan 32.23 mm, esto nos arroja un % de error de 2,33%; para la base se reporta un ancho de 50,15 mm, esto nos arroja un % de error de 1,66%.

Sin corrección gamma: Para la altura se reportan 32.15 mm, esto nos arroja un % de error de 2,15%; para la base se reporta un ancho de 50,45 mm, esto nos arroja un % de error de 1,07%.

➤ ***PHASE SHIFTING A 3 CAPTURAS***

Con corrección gamma: Para la altura se reportan 32.37 mm, esto nos arroja un % de error de 1,90%; para la base se reporta un ancho de 50,35 mm, esto nos arroja un % de error de 1,27%.

Sin corrección gamma: Para la altura se reportan 32.27 mm, esto nos arroja un % de error de 2,21%; para la base se reporta un ancho de 50,30 mm, esto nos arroja un % de error de 1,37%.

➤ ***PHASE SHIFTING A 4 CAPTURAS***

Con corrección gamma: Para la altura se reportan 32.45 mm, esto nos arroja un % de error de 1,66%; para la base se reporta un ancho de 50,43 mm, esto nos arroja un % de error de 1,11%.

Sin corrección gamma: Para la altura se reportan 31,51 mm, esto nos arroja un % de error de 4,39%; para la base se reporta un ancho de 50,94 mm, esto nos arroja un % de error de 0,11%.

➤ ***PHASE SHIFTING A 5 CAPTURAS***

Con corrección gamma: Para la altura se reportan 33,81 mm, esto nos arroja un % de error de 2,45%; para la base se reporta un ancho de 51,15 mm, esto nos arroja un % de error de 0,29%.

Sin corrección gamma: Para la altura se reportan 32.17 mm, esto nos arroja un % de error de 2,51%; para la base se reporta un ancho de 50,30 mm, esto nos arroja un % de error de 1,37%.

➤ ***TRANSFORMADA DE FOURIER***

Con corrección gamma: Para la altura se reportan 32.51 mm, esto nos arroja un % de error de 1,48%; para la base se reporta un ancho de 50,67 mm, esto nos arroja un % de error de 0,64%.

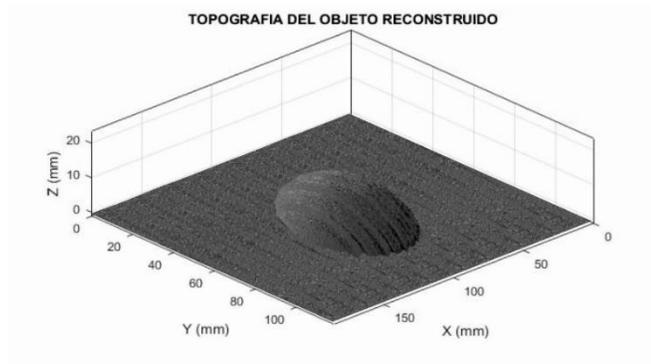
Sin corrección gamma: Para la altura se reportan 31,93 mm, esto nos arroja un % de error de 3,24%; para la base se reporta un ancho de 50,08 mm, esto nos arroja un % de error de 0,64%.

Nuevamente podemos apreciar que el mejor método de reconstrucción es phase shifting 5 capturas utilizando la corrección gamma.

En la última etapa de resultados realizamos la reconstrucción de 3 objetos mediante el mejor método, obteniendo los siguientes resultados:



(a)

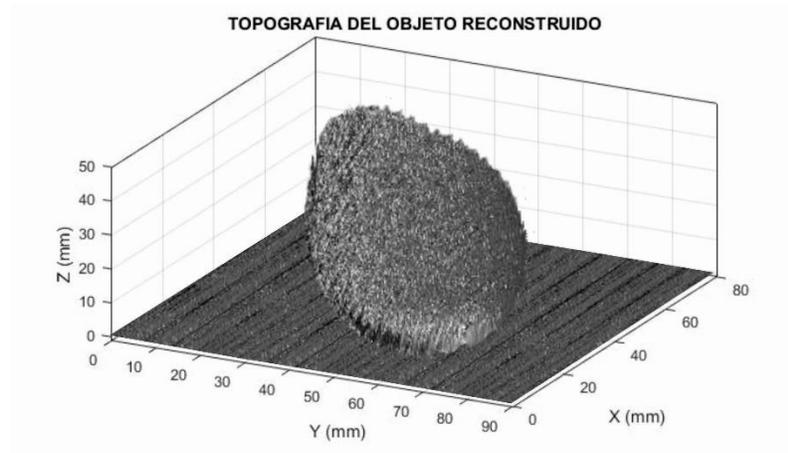


(b)

FIGURA 88. (a) Cuarta parte de una esfera, (b) Reconstrucción de una cuarta parte de una esfera



(a)

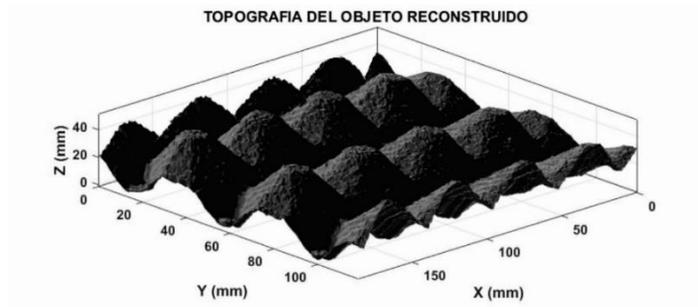


(b)

FIGURA 89. (a) Molde de zapatos, (b) Reconstrucción del molde para zapatos



(a)



(b)

FIGURA 90. (a) Cartón de huevos, (b) Reconstrucción del cartón de huevos

8. CONCLUSIONES

Existen muchos factores que caracterizan el rendimiento técnico de un sistema de reconstrucción de imágenes en 3D. Desde el punto de vista de la aplicación, los tres siguientes aspectos se utilizan a menudo como los índices de rendimiento principales para evaluar los sistemas de imágenes 3D:

- ✓ La precisión: En cuanto a la precisión los métodos desarrollados muestran un gran rendimiento, ya que se acercan bastante a la altura real del objeto reconstruido y esto sucede más cuando se utiliza la corrección gamma.
- ✓ La Resolución: Según los resultados obtenidos, se puede apreciar que los mejores métodos de reconstrucción son phase shifting a 5 capturas y Fourier, estos muestran una fotografía más limpia en comparación con los otros métodos.
- ✓ Velocidad: En cuanto a la velocidad, todos los métodos implementados tienen tiempos muy cortos de captura de datos y muestra de los resultados, estos tiempos oscilan entre 1 a 2 minutos dependiendo del método de reconstrucción seleccionado, recordemos que los métodos dependen de la captura de información.

Esto anterior se pudo lograr gracias al estudio detallado de los métodos de Phase Shifting y Transformada de Fourier para la reconstrucción 3D, dando a este trabajo las bases suficientes para que los métodos sean implementados correctamente para realizar reconstrucciones con éxito.

Se diseñó y construyó un sistema de reconstrucción 3D mediante proyección a partir de la técnica de proyección de franjas. El sistema implementado permite reconstruir objetos en un campo de observación de 215mm x 135mm. Este tipo de sistema posee limitaciones con ciertos objetos, como:

- ✓ La no movilidad del sistema, ya que este es un sistema de tipo fijo, esto quiere decir que no se pueden realizar reconstrucciones a objetos en movimiento y objetos de gran tamaño.
- ✓ El sistema es susceptible a la introducción de parte humana, ya que, si el sistema sufre alguna modificación con respecto a la altura de la cámara al plano de referencia, si se cambia en alguno que posee el proyector con respecto a la cámara, o si la cámara sufre alguna rotación, los resultados se verán afectados.
- ✓ Si no le elije adecuadamente el paso de las franjas los métodos no arrojarán resultados óptimos, esto debido a que para cada objeto al cual se le quiera aplicar alguno de los métodos implementados, el paso de las franjas debe ser adecuado, es decir, para objetos diferentes, no se podrá utilizar el mismo paso de franjas, ya que su geometría cambia.
- ✓ El ambiente donde se realice la reconstrucción debe ser adecuado, es decir, se debe controlar la intensidad lumínica del entorno, ya que como el sistema es basado en la proyección de luz y la adquisición de la deformación de sufre por la topografía de un objeto mediante una cámara, esta es muy susceptible a cambios repentinos en la intensidad lumínica, produciendo una saturación en el sensor, conllevando a un mal registro de la información deseada.

Analizando estas limitantes por el tipo de sistema creado, para futuros trabajos se desarrollará un sistema que sea más versátil frente a objetos con mayor grado de complejidad en su topografía, es decir, objetos con grandes dimensiones, con esto también se podrá reducir el error humano introducido.

Se elaboró una interface de usuario en la plataforma MATLAB, donde se crea un algoritmo único que posee los métodos de reconstrucción Phase Shifting (PS a color, PS a 3 capturas, PS a 4 capturas, PS a 5 capturas) y reconstrucción mediante la transformada de Fourier, esta interfaz es gentil con el usuario permitiendo una fácil interacción entre la interfaz y el usuario. La interfaz cuenta con los parámetros necesarios para realizar la reconstrucción de objetos, como

- ✓ La modificación de las franjas mediante un slider, la modificación del sistema de proyección de blanco-negro a color mediante un solo click, la modificación del sistema de adquisición de blanco-negro a color, mediante un click.

- ✓ La visualización en tiempo real de la modificación de las franjas.
- ✓ La visualización en tiempo real del espacio de trabajo, para la localización adecuada el objeto a reconstruir.
- ✓ La visualización en tiempo real de las fases por las cuales pasa el objeto para su reconstrucción.
- ✓ La automatización de los procesos de calibración y los métodos de reconstrucción, es decir, que al presionar algunos de estos botones, el sistema realizara todo el proceso automáticamente, desde la proyección de las franjas, pasando por la adquisición de los datos necesarios dependiendo del método seleccionado y la visualización de los resultados del proceso.
- ✓ La visualización de todos los datos almacenados durante el proceso de reconstrucción, junto con los datos de los procesos de calibración.

Con lo conseguido mediante este algoritmo, en futuros trabajos se implementará un algoritmo mas robusto para conseguir mejoría en los resultados, poder realizar reconstrucciones a objetos con mayor diversidad geométrica y con topografías con un mayor grado de complejidad, y poder eliminar inconvenientes como la saturación de la cámara por el cambio súbito de la intensidad lumínica del ambiente.

Las diferentes técnicas implementadas nos presentan varias ventajas, como:

- ✓ Tiempos de respuestas cortos.
- ✓ Resultados óptimos, esto los comprobamos sacando el porcentaje de error en cada resultado, dándonos como máximo un error de 5,99%.
- ✓ Posibilidad de realizar reconstrucciones de diferentes tipos de objetos.
- ✓ El algoritmo creado, permite que se pueda implementar en equipos de fácil acceso al público, es decir, con especificaciones normales del equipo, por ejemplo, con una memoria RAM de 4 Gb, un sistema operativo de 32 bits.

Gracias al estudio detallado de Phase Shifting, se puede crear un algoritmo que nos permita realizar reconstrucción de objetos mediante un patrón de franjas a color, con resultados aceptables, reduciendo el tiempo de procesamiento para mostrar resultados más rápidos, aunque los resultados aparezcan en tono de grises, ya que no es necesario que los resultados estén a color ya que el trabajo se centra es en arrojar reconstrucciones para el análisis de las alturas de la topografía de los objetos.

Dependiendo del método de reconstrucción se obtendrán mejores resultados que otros, debido a que a mayor numero de datos adquiridos, mejores resultados, enfatizando que todos los métodos tienen resultados confiables con porcentajes de error por debajo del 6%, esto lo podemos evidenciar en la reconstrucción del objeto de prueba por todos los métodos implementados y de otros 3 objetos (cuarto de esfera, molde de zapatos y sección de un cartón de huevos) con una topografía de mayor dificultad que el objeto de prueba.

Se realizó una corrección gamma a través de una calibración de los dispositivos de proyección y de adquisición de los datos, dando resultados de optimización en los procesos de reconstrucción. Con estos resultados se podrá incursionar mas a fondo en el proceso de corrección gamma, para futuros trabajos, para obtener mejores resultados.

9. REFERENCIAS

- [1] D.M. Meadows, W.O. Johnson, J.B. Allen, Generation of surface contours by moiré patterns, *Applied Optics*. Vol 9, 1970, pp. 942–947.
- [2] M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes, *Applied Optics*. Vol. 22, 1983, pp. 3977–3982.
- [3] V. Srinivasan, H.C. Liu, M. Halioua. Automated phase measuring profilometry of 3D diffuse objects, *Applied Optics*, Vol. 23, 1984, pp. 3105– 3108.
- [4] M. Riorx, Laser range finder based on synchronized scanners. Issue, Vol. 23, 1984, pp. 3837–3844.
- [5] Jason Geng IEEE Intelligent Transportation System Society, 11001 Sugarbush Terrace, Rockville, Maryland 20852, USA, Opt Photonics 2013.
- [6] I. Ishii, K. Yamamoto, K. Doi, and T. Tsuji, “High-speed 3D image acquisition using coded structured light projection,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007 (IEEE, 2007)*, pp. 925–930.
- [7] K. Sato and S. Inokuchi, “Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask,” in *Proceedings of International Conference on Computer Vision (IEEE Computer Society Press, 1987)*, pp. 657–661.
- [8] R. J. Valkenburg and A. M. McIvor, “Accurate 3D measurement using a structured light system,” *Image Vision Comput.* 16(2), 99–110 (1998).
- [9] J. L. Posdamer and M. D. Altschuler, “Surface measurement by space-encoded projected beam systems,” *Comput. Graph. Image Processing* 18(1), 1–17 (1982).
- [10] D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir, “Range imaging with adaptive color structured light,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 20(5), 470–480 (May 1998).
- [11] W. Krattenthaler, K. J. Mayer, and H. P. Duwe, “3D-surface measurement with coded light approach,” in *Proceedings of the 17th Meeting of the Austrian Association for Pattern Recognition on Image Analysis and Synthesis (R. Oldenbourg Verlag, 1993)*, Vol. 12, pp. 103–114.
- [12] W. Krattenthaler, K. J. Mayer, and H. P. Duwe, “3D-surface measurement with coded light approach,” in *Proceedings of the 17th Meeting of the Austrian Association for Pattern Recognition on Image Analysis and Synthesis (R. Oldenbourg Verlag, 1993)*, Vol. 12, pp. 103–114.
- [13] H. Sagan, *Space Filling Curves*. Universitext, Springer, 1994.
- [14] P. S. Huang and S. Zhang, “A fast three-step phase shifting algorithm,” *Appl. Opt.* 45(21), 5086–5091 (2006).
- [15] S. Zhang and S. T. Yau, “High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method,” *Opt. Express* 14, 2644–2649 (2006).
- [16] S. Siva Gorthi and P. Rastogi, “Fringe projection techniques: whither we are?” *Opt. Lasers Eng.* 48(2), 133–140 (2010).
- [17] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Opt. Eng.* 19(1), 134–140 (1980).

- [18] R. Basri and D. Jacobs, "Photometric stereo with general, unknown lighting," in 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001) (IEEE Computer Society, 2001), pp. 374–381.
- [19] A. Treuille, A. Hertzmann, and S. M. Seitz, "Example-based stereo with general BRDFs," in *Computer Vision—ECCV 2004: 8th European Conference on Computer Vision, Part II* (Springer, 2004), pp. 457–469.
- [20] T. Higo, Y. Matsushita, N. Joshi, and K. Ikeuchi, "A hand-held photometric stereo camera for 3-D modeling," in 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (Sept. 2009), pp. 1234–1241.
- [21] Z. J. Geng, "Rainbow three-dimensional camera: new concept of high-speed three-dimensional vision systems," *Opt. Eng.* 35(2), 376–383 (1996).
- [22] J. Geng, "Color ranging method for high speed low-cost 3D surface profile measurement," U.S. patent 5,675,407 (Oct. 7, 1997).
- [23] Z. J. Geng, "Rainbow three-dimensional camera: new concept of high-speed three-dimensional vision systems," *Opt. Eng.* 35(2), 376–383 (1996).
- [24] J. Geng, "3D surface profile imaging method and apparatus using single spectral light condition," U.S. patent 6,556,706 (Apr. 29, 2003).
- [25] K. L. Boyer and A. C. Kak, "Color-encoded structured light for rapid active ranging," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 9(1), 14–28 (1987).
- [26] S. Fernandez, J. Salvi, and T. Pribanic, "Absolute phase mapping for one-shot dense pattern projection," in 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW) San Francisco, Calif. (June 3–18, 2010).
- [27] M. Maruyama and S. Abe, "Range sensing by projecting multiple slits with random cuts," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 15(6), 647–651 (1993).
- [28] M. Maruyama and S. Abe, "Range sensing by projecting multiple slits with random cuts," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 15(6), 647–651 (1993).
- [29] N. G. Durdle, J. Thayyoor, and V. J. Raso, "An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk," in *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998* (IEEE, 1998), Vol. 2, pp. 874–877.
- [30] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, "Pseudorandom sequences and arrays," *Proc. IEEE* 64(12), 1715–1729 (1976).
- [31] H. Fredricksen, "A survey of full length nonlinear shift register cycle algorithms," *Soc. Industr. Appl. Math. Rev.* 24(2), 195–221 (1982).
- [32] H. H'ugli and G. Ma'ÿtre, "Generation and use of color pseudo-random sequences for coding structured light in active ranging," *Proc. SPIE* 1010, 75–82 (1989).
- [33] T. Monks and J. Carter, "Improved stripe matching for colour encoded structured light," in *Computer Analysis of Images and Patterns* (Springer, 1993), pp. 476–485.
- [34] L. Zhang, B. Curless, and S. M. Seitz, "Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming," in *First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings* (IEEE, 2002), pp. 24–36.

- [35] J. Le Moigne and A. M. Waxman, "Structured light patterns for robot mobility," *IEEE J. Robot. Automat.* 4(5), 541–548 (1988).
- [36] T. Pajdla, "Bcrf—binary-coded illumination range finder reimplementaion," in Technical Report KUL/ESAT/MI2/9502 (Katholieke Universiteit Leuven, 1995).
- [37] P. M. Grin, L. S. Narasimhan, and S. R. Yee, "Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition," *Pattern Recog.* 25(6), 609–616 (1992).
- [38] P. M. Grin, L. S. Narasimhan, and S. R. Yee, "Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition," *Pattern Recog.* 25(6), 609–616 (1992).
- [39] E. M. Petriu, Z. Sakr, H. J.W. Spoelder, and A. Moica, "Object recognition using pseudo-random color encoded structured light," in Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000 (IEEE, 2000), Vol. 3, pp. 1237–1241.
- [40] J. Pagès, J. Salvi, and C. Matabosch, "Robust segmentation and decoding of a grid pattern for structured light," in *Pattern Recognition and Image Analysis, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2652/2003 (Springer, 2003), 689–696.
- [41] A. Osman Ulusoy, F. Calakli, and G. Taubin, "Robust one-shot 3D scanning using loop belief propagation," in 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW) (IEEE Computer Society, 2010), pp. 15–22.
- [42] Spidell E. Selecting the optimum image sensors camera tubes vs solid state arrays. Vol 23(1). 1987. P. 158-163
- [43] IDS Imaging Development Systems GmbH [DE],EU. <https://es.ids-imaging.com/store/products/cameras/usb-3-0-cameras/ueye-cp.html>
- [44] Barbe D. F. Imagen device using the charge-coupled concept. Proceedings of the IEEE. Vol. 63(1). 1975. P.38-67
- [45] Meneses J. E. Análisis de sistemas de sistemas de franjas n tiempo real con aplicación a la interferometría y la topología de formas estructuras. Propuesta de tesis. Universidad industrial de Santander. Facultad de ciencias básicas. Departamento de física. Bucaramanga 1990
- [46] Jack D. Gaskill. Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics. Optical Sciences Center, University of Arizona. 1978
- [47] Takeda M, Motoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *ApplOpt*, 22(24):3977-82, 1983.
- [48] Philipp O.J. Scherer. *Computational Physics, Simulation of Classical and Quantum Systems*. Springer. 2010
- [49] Hussein S. Abdul-Rahman, Munther A. Gdeisat, David R. Burton, Michael J. Lalor, Francis Lilley, Abdulbasit Abid. Tree-dimensional Fourier Fringe Analysis. *Optics and laser in Engineering*. 2008.
- [50] Abdul-Rahman H, Gdeisat M, Burton D, Lalor M. Fast threedimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. In: *Optical measurement systems for industrial inspection*, vol. IV. Munich, Germany: SPIE. Soc. Opt. Eng.; 2005.
- [51] Abdul-Rahman H, Gdeisat M, Burton D, Lalor M, Lilley F, Moore C. *Appl Opt* 2007;46(26):662335. Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm.

- [52] R. Cusack and N. Papadakis. New Robust 3-D Phase Unwrapping Algorithms: Application to Magnetic Field Mapping and Undistorting Echoplanar Images. *NeuroImage* 16, 754764 (2002).
- [53] N. A. Arias, Jaime Meneses, Miguel Angel Suarez and Tijani Gharbi. . Medida De La Orientación, Posición Y Desplazamiento En El Plano De Un Objeto Por Codificación De Fase. *Revista BISTUA Universidad de Pamplona* ISSN 0120-4211 Volumen 7(2) pp. 70-76. 2009.
- [54] Nestor Arias, Nestor Meneses, Jaime Meneses and Tijani Gharbi. A Hand- held 3d Laser Scanning With Global Positioning System Of Subvoxel Precision. *IOP Publishing, Journal of Physics:ConferenceSeries* ISSN: 17426596, 274 (2011) 012068.
- [55] Nestor A. Arias H., Patrick Sandoz, Jaime E. Meneses, Miguel A. Suarez, and Tijani Gharbi. 3d Localization Of A Labeled Target By Means Of A Stereo Vision Configuration With Subvoxel Resolution. Vol. 18, No. 23 , *OPTICS EXPRESS*, ISSN: 1094-4087, pp. 24152 24162, 2010.
- [56] Kjell J. Gasvik. *Optical metrology*, Third Edition. Spectral vision AS, Trondheim, Norway. 2002 phase-measurement interferometry pag 276
- [57] Wyant, C.J. et al. An Optical profilometer for surface characterization of magnetic media,. *ASLE Transactions*, vol 27, 1984, pp. 101–113.
- [58] Wyant, C.J. Interferometric optical metrology, basic systems and principles. *Laser Focus*, 1982, pp. 65–71.
- [59] Schwider, J. Falkenstorfer, O., Schreiber, H., Zoller, A, and Streibl, N. New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry. *Opt. Eng.*, vol 32, 1993, pp. 1883–1885.
- [60] Hariharan, P., Oreb, B.F., and Eiju, T. Digital phase-shifting interferometry: a simple errorcompensating phase calculation algorithm. *Appl. Opt.*, vol 26, 1987, pp. 2504–2505.
- [61] Schwider, J., Burow, R., Grzanna, R., Spolaczyk, and Merkel, K. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources *Appl. Opt.*, vol 22, 1983, pp. 3421–3432.
- [62] Takeda, M., Ina H and Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Optics society*, Vol 72, 1982, pp. 156-160
- [63] Kjell J. Gasvik. *Optical metrology*, Third Edition. Spectral vision AS, Trondheim, Norway. 2002 Perfilometría por Transformada de Fourier (PTF) pag. 286
- [64] *Optical Metrology*, Third Edition, Kjell J. Gasvik, Spectra Vision AS, Trondheim, Norway. 2002 Fringe Analysis, phase Unwrapping, P. 290
- [65] De Robinson, D. W. y Reid, GT (eds) (1993) Análisis del interferograma. Fringe digital Técnicas patrón de medición, Institute of Physics Publishing. Reproducido con permiso del Instituto de Física Publishing y por cortesía de D. W. Robinson.
- [66] S. Zhang and P. S. Huang. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement system base don the phase shifting method. *Optical Engineering*, vol. 6, no. 46, 2007.