

**RECONSTRUCCIÓN 3D DE OBJETOS CON SIMETRÍA AXIAL A PARTIR DE
TRIANGULACIÓN LÁSER A MULTICAPTOR**

GEORGE ERNEY ARGÜELLO SARMIENTO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2012

**RECONSTRUCCIÓN 3D DE OBJETOS CON SIMETRÍA AXIAL A PARTIR DE
TRIANGULACIÓN LÁSER A MULTICAPTOR**

GEORGE ERNEY ARGÜELLO SARMIENTO

Trabajo de Grado para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Dr. JAIME ENRIQUE MENESES FONSECA

Codirector:

MSc. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos a:

- Dr. Jaime Meneses, por toda su colaboración, paciencia, y orientación profesional en el desarrollo de esta investigación.
- Mis padres por su amor y apoyo incondicional.
- Mis amigos por su respaldo y amistad.
- Todas las personas que de una u otra manera influyeron en el desarrollo y culminación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	17
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	18
1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	20
2. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR VÍA ÓPTICA	21
2.1. INTRODUCCIÓN	21
2.2. COMPONENTES PRINCIPALES DE LA RECONSTRUCCION 3D POR VÍA ÓPTICA	24
2.3. MÉTODO DE TRIANGULACIÓN LÁSER	26
3. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D A MULTICAPTOR IMPLEMENTADO	31
3.1. DIAGRAMA EXPERIMENTAL DEL MONTAJE	31
3.2. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGEN	32
3.2.1. Calibración de las cámaras	33
3.2.1.1. Estructura Teórica	34
3.2.1.1.1. Parámetros extrínsecos	34
3.2.1.1.2. Parámetros intrínsecos	39
3.2.1.2. Procedimiento experimental de calibración de las cámaras	44
3.2.2. Calibración de la línea láser	52

3.2.3. Reconstrucción tridimensional de cada cámara	56
3.2.3.1. Conversión de píxeles a milímetros	58
3.2.4. Unificación del sistema coordenado	59
3.2.5. Reconstrucción tridimensional	64
4. ANÁLISIS DE ERROR	66
5. CONCLUSIONES	76
6. PERSPECTIVAS	78
BIBLIOGRAFIA	79

LISTA DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Resumen de la clasificación de los métodos ópticos más utilizados.	23
Tabla 2. Parámetros intrínsecos de las cámaras utilizadas.	50
Tabla 3. Errores de objetos reconstruidos con diferente contorno.	72
Tabla 4. Valores de error de círculos reconstruidos y valores de grosor de cintas reconstruidas.	74

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Diferentes tipos de cables y sus diferentes contornos: Ovalado, triple circular, circular, doble circular (Superior a inferior).	19
Figura 2. Codificación de la coordenada Z.	22
Figura 3. Componentes de la reconstrucción tridimensional por método óptico.	25
Figura 4. Principio de funcionamiento de la triangulación láser.	27
Figura 5. Geometría general de la triangulación láser.	28
Figura 6. Descripción del proceso de calibración experimental.	30
Figura 7. Diagrama del sistema implementado.	31
Figura 8. Imagen en forma de tablero de ajedrez. (a) Imagen real, (b) Imagen capturada con una cámara.	33
Figura 9. Definición de dos sistemas coordenados (Con respecto a la cámara y con respecto al objeto).	35
Figura 10. Rotación del sistema coordenado en un ángulo θ .	35
Figura 11. Descripción del proceso de translación y sus vectores relacionados.	38
Figura 12. Rayos incidentes en una lente.	39
Figura 13. Punto en el espacio visto en coordenadas del sistema con respecto a la cámara (X_c, Y_c, Z_c) y su proyección a través del lente (X_p, Y_p, Z_p), con su respectiva estimación en coordenadas de la imagen resultante ((u_o, v_o) en pixeles).	40

Figura 14. Vectores que describen un punto con aberraciones geométricas y el mismo punto corregido (sin aberraciones).	42
Figura 15. Imagen del cuadro de ajedrez con el plano láser proyectado en ella en un ambiente sin ningún otro tipo de iluminación a diferentes distancias z . a) Distancia máxima positiva de z , b) $z=0$, c) Distancia máxima negativa de z .	45
Figura 16. Superposición de las imágenes en la Figura 15.	45
Figura 17. Líneas rectas con la tendencia de los extremos de las líneas de las imágenes superpuestas.	46
Figura 18. Imagen binarizada de la región seleccionada.	46
Figura 19. Región elegida de calibración.	47
Figura 20. Imágenes para calibración de la primera cámara.	48
Figura 21. Extracción de esquinas de la región seleccionada.	49
Figura 22. Definición del sistema coordenado del objeto.	51
Figura 23. Posiciones relativas de las redes con respecto a la cámara.	52
Figura 24. Imagen del cuadro de ajedrez con el plano láser proyectado en ella en un ambiente sin ningún otro tipo de iluminación.	53
Figura 25. Gráfica de los niveles de gris en una columna de la imagen.	54
Figura 26. Gráfica de los niveles de gris de los puntos elegidos en varias columnas de la imagen.	54
Figura 27. Gráfica de los niveles de gris de los puntos elegidos de todas las imágenes tomadas a diferentes distancias (z).	55
Figura 28. Gráfica de la interpolación de todos los puntos seleccionados.	56
Figura 29. Imagen de un objeto con contorno circular con la única iluminación de la línea láser.	57

Figura 30. Reconstrucción tridimensional para una cámara de un objeto con contorno circular.	57
Figura 31. Sistemas coordenados del objeto y de la cámara para puntos en el espacio y su proyección en el plano imagen.	58
Figura 32. Reconstrucción tridimensional para una cámara de un objeto con contorno circular con todas sus coordenadas en milímetros.	59
Figura 33. Selección de la cuadrícula para hallar el eje de rotación.	60
Figura 34. Gráfica de todas las esquinas halladas en el cuadro seleccionado para todas las imágenes de rotación.	61
Figura 35. Circunferencia establecida para el mismo punto rotado.	62
Figura 36. Cálculo del eje de rotación con todas las esquinas halladas en todas las imágenes tomadas para el cuadro seleccionado.	63
Figura 37. Sistema coordenado rotado un ángulo θ con respecto al sistema coordenado 1.	63
Figura 38. Reconstrucción tridimensional del contorno de diferentes objetos con sección transversal rectangular, hexagonal y circular.	65
Figura 39. Reconstrucción tridimensional del contorno de diferentes objetos.	65
Figura 40. Reconstrucción de diferentes objetos (contorno circular, rectangular y hexagonal).	67
Figura 41. Proyección de los datos de reconstrucción en el plano que mejor los aproxima.	68
Figura 42. Diferencia de distancia entre los datos hallados y los datos proyectados en el plano para el objeto con contorno circular.	69
Figura 43. Datos reconstruidos del círculo proyectados en 2D y el círculo mejor aproximado.	70

- Figura 44.** Datos reconstruidos del rectángulo proyectados en 2D y el rectángulo mejor aproximado. **70**
- Figura 45.** Datos reconstruidos del hexágono proyectados en 2D y el hexágono mejor aproximado. **71**
- Figura 46.** Distancia entre datos proyectados en el plano y la figura ideal a reconstruir para objeto con contorno circular. **71**
- Figura 47.** Reconstrucción tridimensional del contorno de un objeto con sección transversal circular con una, dos y tres cintas (azul) respectivamente. **73**
- Figura 48.** Datos reconstruidos proyectados en 2D de la región del contorno circular del objeto (ignorando datos de la cinta) y el círculo mejor aproximado del contorno real. **74**
- Figura 49.** Datos reconstruidos proyectados en 2D de la región de la cinta y el círculo mejor aproximado del contorno real. **75**

RESUMEN

TÍTULO: RECONSTRUCCIÓN 3D DE OBJETOS CON SIMETRÍA AXIAL A PARTIR DE TRIANGULACIÓN LÁSER A MULTICAPTOR.*

AUTOR: GEORGE ERNEY ARGÜELLO SARMIENTO.**

PALABRAS CLAVE: Reconstrucción tridimensional, contorno, triangulación láser, calibración de cámaras.

En la industria son creados diferentes materiales que deben poseer ciertas dimensiones estandarizadas exigidas por el consumidor con un mínimo nivel de error. Con el fin de satisfacer las exigencias en las dimensiones del producto se suelen incluir en la línea de producción estaciones de control de calidad, que verifican con dispositivos de medida las dimensiones requeridas. Para este proceso de control se suelen utilizar diferentes métodos de tipo transmisivo, óptico o de contacto. Los métodos más utilizado debido a sus propiedades no invasivas y de alta resolución son los métodos ópticos.

Esta investigación se centra en la implementación y el análisis de un procedimiento para la reconstrucción tridimensional del contorno de un objeto que posee simetría axial, partiendo de un método óptico, más específicamente el método de triangulación láser, a través de un sistema de observación múltiple. El sistema implementado se basa en la disposición de 4 cámaras de digitalización de imágenes ubicadas a 90° entre si alrededor del eje del cable. Junto con un plano láser generado por 4 espejos poligonales rotando a alta velocidad, el dispositivo permite recuperar información 3D del contorno o sección de un objeto a 360°. El procesamiento de datos se realiza a través del software de MATLAB®.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca. Codirector: MSc. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

ABSTRACT

TITLE: THREE DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF OBJECTS WITH AXIAL SYMMETRY BY LASER TRIANGULATION AND MULTICAPTOR. *

AUTHOR: GEORGE ERNEY ARGÜELLO SARMIENTO. **

KEY WORDS: Three-dimensional reconstruction, contouring, laser triangulation, camera calibration.

In the industry are created different materials that must have certain standard dimensions required by the consumer with a minimum level of error. In order to meet the demands on the dimensions of the product are usually used on the production line, quality control stations, where measure devices verified this dimensions. To control this process are often used different methods of transmissive, optical or contact type. The methods most widely used because its noninvasive characteristic and high resolution are the optical methods.

This investigation was focused on the implementation and analysis of a procedure for the reconstruction of three-dimensional contour of an object which has axial symmetry, starting from an optical method, more specifically the laser triangulation method, through a multiple observation system. The system implemented based on the arrangement of four cameras located imaging at 90° to one another about the axis of the cable. Along with a laser plane generated by 4 rotating polygon mirrors at high speed, the device can recover 3D information of the contour of an object or section 360° . Data processing is done through MATLAB[®] software.

* Graduate Project.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications School. Director: Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca. Co-Director: MSc. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

INTRODUCCIÓN

Para los seres humanos el mundo es percibido constantemente en tres dimensiones. Esta capacidad ha sido implementada por la ciencia y la tecnología para generar modelos tridimensionales en interfaces gráficas de computación que facilitan el manejo de las variables que pueden presentarse en la construcción, calibración o verificación de la calidad de un objeto, y en el estudio de cambios físicos de un material, un organismo vivo o parte de él (ej.: un órgano como el páncreas). De esta manera se encuentran en el mercado industrial dispositivos de medida que digitalizan la topografía de una superficie o parte de ella, con precisiones que dependen de la técnica empleada en el dispositivo de medida.

Desafortunadamente, muchos de estos sistemas de medida recuperan información 3D en condiciones específicas, para objetos de formas y dimensiones acordes al campo de exploración del dispositivo. Aunque se pueden obtener resoluciones del orden de cientos de micras para campos transversales de décimas de metros, es muy difícil encontrar en el mercado dispositivos que reconstruyan la topografía de un objeto a 360° de exploración. De igual forma, los dispositivos de medida requieren de cooperación por parte del objeto a medir. Es decir reconstruir el cuerpo humano requiere de condiciones de inmovilización adecuadas, que exigen fijar el cuerpo a soportes exigentes e incómodos. De igual forma, en líneas de manufacturación de productos en serie, es importante realizar operaciones de control de calidad metrológico. Tal es el caso del proceso de extrusión de cable, que exige el control dimensional de la sección transversal del cable en la línea de producción. Tradicionalmente se encuentran en el mercado dispositivos que miden la sombra que genera el cable, con el fin de determinar su dimensión transversal. Aunque estos dispositivos permiten medir el diámetro de un cable de 20 mm con una precisión del orden de 150 micras, no es útil para medir la forma 3D de la sección del cable con perfil no circular (por ejemplo cable dúplex,

oval, perfiles hexagonales, rectangulares etc.). De esta manera surge la necesidad de crear un dispositivo de medida que permita recuperar el perfil 3D de la sección del cable. Se exige que el dispositivo de medida a construir permita recuperar las dimensiones de un cable de 22 mm máximo con una precisión del orden de 150 micras. Este proceso se debe hacer por métodos no invasivos y sin contacto directo con la superficie del material.

De esta manera, esta investigación se centra en la implementación y el análisis de un procedimiento para la reconstrucción tridimensional del contorno de un objeto que posee simetría axial, partiendo de un método óptico, más específicamente el método de triangulación láser, a través de un sistema de observación múltiple. El sistema implementado se basa en la disposición de 4 cámaras de digitalización de imágenes ubicadas a 90° entre si alrededor del eje del cable. Junto con un plano láser generado por 4 espejos poligonales rotando a alta velocidad, el dispositivo permite recuperar información 3D del contorno o sección del cable.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En la industria son creados diferentes materiales que deben poseer ciertas dimensiones estandarizadas exigidas por el consumidor con un mínimo nivel de error. Con el fin de satisfacer las exigencias en las dimensiones del producto se suelen incluir en la línea de producción estaciones de control de calidad, que verifican con dispositivos de medida las dimensiones requeridas. Este proceso se suele hacer o bien empleando dispositivos de medida que entran en contacto con la superficie del producto (Método de contacto) o empleando señales portadoras que son recibidas por el receptor y convertidas en forma tridimensional (Método no invasivo). Diferentes inconvenientes se presentan para incluir un proceso de control dimensional en una línea de producción. Por un lado se debe detener la producción para usar un método de contacto con la superficie, disminuyéndose la efectividad en la producción. Generalmente los métodos de contacto, como galgas comparativas, tornillos micrométricos etc., son de difícil automatización e introducen errores determinísticos generados por el personal que manipula el instrumento de medida. Se pueden emplear dispositivos comerciales no invasivos para obtener información 3D del producto, pero desafortunadamente la mayoría de los dispositivos comerciales son de carácter general, que recuperan ciertos parámetros metrológicos de los objetos medidos. Es decir, el control de calidad de un producto específico en una línea de producción exige de un dispositivo de control previamente diseñado y adaptado a las exigencias en la producción. Básicamente estos dispositivos son construidos empleándose métodos no invasivos, donde se pueden establecer con gran nivel de certeza los errores de las medidas de estos objetos. De esta manera, métodos de proyección de patrones láser con sistemas formadores de imágenes (Cámaras CCD), corresponden a

procedimientos no invasivos que adicionalmente garantizan medidas repetibles con un rango de error ajustable [12].

De manera específica, en el proceso de manufactura en serie de productos con simetría axial, como por ejemplo el caso de conductores eléctricos o telefónicos que tienen forma transversal variada pero idéntica a lo largo del eje, es necesario instalar en la línea de producción un dispositivo que controle la forma de la sección transversal del cable. De esta manera si las dimensiones medidas no corresponden al rango de valores de la sección patrón, se detiene la línea de producción y se procede a corregir el error que produce la alteración de la forma del cable. Actualmente existen en el mercado dispositivos de medida no invasivos para el control del tamaño de cables que proyecta un plano láser perpendicular al eje del cable. El dispositivo “mira y mide” la sombra que produce, obteniéndose un control de la proyección transversal del cable, útil para cables con sección circular. Sin embargo, existen otros tipos de cables con simetría axial (pero no circulares), que hacen totalmente ineficiente a este método en medidas de control.

La presente propuesta de investigación se centra en la necesidad de obtener la información topográfica tridimensional de la sección transversal del objeto, no importando su forma. La justificación del trabajo de investigación se enfoca en la importancia de utilizar la información topográfica en 3D de la sección transversal del cable, evitándose el uso de proyecciones que no tienen en cuenta formas diferentes a la circular.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La visión artificial consiste en crear una imagen digital de un objeto real, para manipular esta imagen estableciendo medidas, errores o realizando observaciones desde cualquier ángulo además de cambios, si fueran necesarios.

Existen diferentes aplicaciones de reconstrucción 3D tanto a nivel macro (Digitalización de un terreno), como a nivel micro (Digitalización de población de células), pasando por un sin número de objetos y terrenos que ocupan una gran importancia en diferentes disciplinas como lo son la medicina, la geología, la mecánica, entre otros [5], [6], [9], [14], [15].

En procesos de creación de diferentes productos es necesaria la reconstrucción 3D del contorno de la superficie transversal de una figura, como es el caso de la creación de los diferentes cables con sus respectivas formas, como circulares, doble círculo, entre otras, vistas en la Figura 1.

Figura 1. Diferentes tipos de cables y sus diferentes contornos: Ovalado, triple circular, circular, doble circular (Superior a inferior).



Fuente: Autor

En los casos de cables circulares, es posible establecer el contorno por medio de un dispositivo que genera un plano láser y al detectar la sombra que este proyecta es posible obtener el diámetro del cable.

Sin embargo para los cables u objetos que tienen un contorno no circular, como el de doble círculo u oval generar esta sombra es totalmente ineficiente para el control dimensional. Por lo tanto se hace necesario establecer otro tipo de método

para obtener información metrológica detallada del contorno, sin importar que forma contenga.

Este método también puede ser utilizado en el control de los contornos de objetos extruidos. Es decir objetos que han sido moldeados según las necesidades y empleándose diferentes materiales (metal, dieléctricos, etc.).

En los casos anteriores, solo es necesario el control de un corte transversal de los objetos para verificar si la medida que se analiza cumple las condiciones del contorno exigido. El problema que se plantea en esta investigación se centra de la siguiente manera: “Para un objeto con simetría axial, como un cable cuya sección transversal es diferente a la circular, ¿cómo es posible determinar el perfil topográfico de la sección transversal del objeto sin recurrir al método tradicional?”

1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente documento se centra en cinco capítulos que describen el progreso y desarrollo del procedimiento para la reconstrucción 3D del contorno de un objeto con simetría axial. El capítulo 2° presenta el marco teórico necesario para comprender el concepto de reconstrucción tridimensional por triangulación láser. Se presentará la estructura teórica que permite recuperar información topográfica de un objeto empleándose la proyección de un plano láser y la adquisición con múltiples sistemas de observación. En el capítulo 3° se presenta el sistema óptico construido para medir la sección transversal de un objeto con simetría axial. Se presentan en detalle los componentes opto-electrónicos empleados. De igual forma se reconstruyen objetos de forma conocidos y objetos de uso corriente. En el capítulo 4° se realiza un análisis de error del dispositivo de medida, obteniéndose el error en dirección axial y el error en dirección transversal. Finalmente se presentan las conclusiones y perspectivas de trabajo de investigación realizado.

2. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR VÍA ÓPTICA

2.2. INTRODUCCIÓN

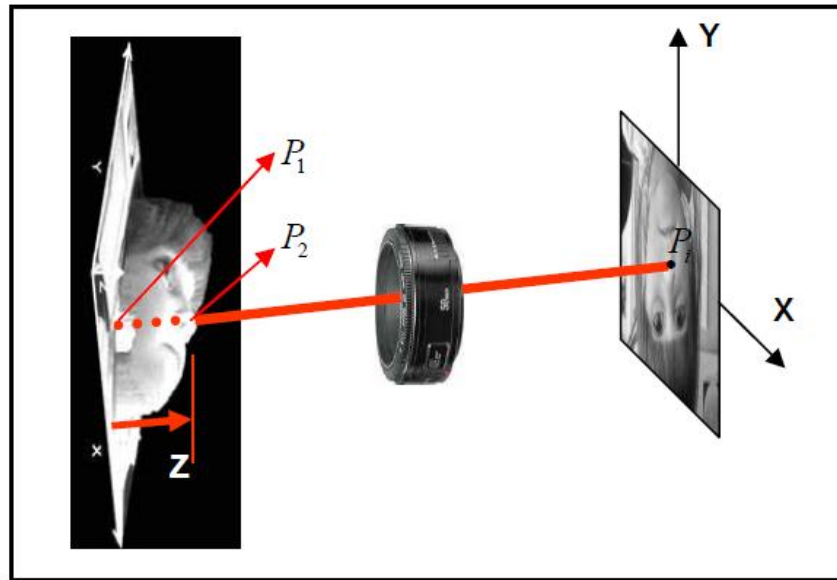
La reconstrucción tridimensional consiste en la digitalización de la topografía de objetos a partir de un sistema coordenado y estableciendo las coordenadas de los puntos de la superficie en dicho sistema coordenado.

En el proceso de reconstrucción tridimensional por medio de una imagen, es necesario recuperar la información de altura o eje Z, ya que los diferentes puntos de la superficie se han hecho converger al plano imagen (véase Figura 2). Según la óptica geométrica, todos los puntos que se encuentren en la misma dirección del eje óptico, serán proyectados al mismo punto sobre la imagen, es decir los puntos P1 y P2 de la Figura 2, son proyectados en la imagen sobre el mismo punto P_i , perdiéndose así la coordenada z. Para recuperar esta información es necesario utilizar estrategias que conlleven a codificar esta distancia en una variable que pueda ser tratada digitalmente [9].

Para lograr esto es necesario implementar un sistema de adquisición de datos y calibrarlo, de forma tal que se puedan obtener las unidades deseadas con el mínimo error posible. Sin embargo la calibración y el sistema en sí, deben adaptarse a las características del proceso.

Existen diferentes formas de codificar la variable z para la posterior reconstrucción tridimensional de objetos. Según el tipo de adquisición pueden dividirse en tres grandes grupos, estos son: los métodos de contacto, los transmisivos y los ópticos [5].

Figura 2.Codificación de la coordenada Z.



Fuente: [9]

Los métodos de contacto, son aquellos que como su nombre lo indica, necesitan tener contacto directo con el objeto a reconstruir tridimensionalmente. Este método es especialmente ineficiente en materiales que pueden ser deformados al momento de ponerse en contacto con ellos, como en el caso de cables de plástico.

Para la obtención de datos de forma transmisiva, se hace uso de propiedades especiales de los materiales a los cuales se les desea hacer el proceso de reconstrucción. Por ejemplo, se puede hacer uso de la transmisividad térmica, sónica, eléctrica, etc. Para este tipo de métodos es necesario tener un profundo conocimiento físico y matemático de la o las propiedades a tener en cuenta en el proceso, pero son utilizadas solamente si se desea hacer la reconstrucción a objetos de materiales específicos.

Tabla 1. Resumen de la clasificación de los métodos ópticos más utilizados.

Clasificación		Método	Principio de Codificación	
A C T I V O S	Luz Estructurada	Láser	El patrón puede ser un punto, una línea, múltiples líneas o un patrón definido.	
		Binaria	Se utilizan patrones binarios bidimensionales que codifican la información en uno ó en dos ejes	
		Nivel de gris	Usa un patrón de iluminación en niveles de gris.	
		Cromática	El patrón de iluminación está asociado a una matriz de color	
	Métodos a medida de fase	Proyección de franjas	La altura del objeto se codifica en la deformación local del paso y orientación de las franjas proyectadas que están contenidas en un término de fase, que se debe recuperar.	
		Moiré	La altura del cuerpo se codifica en curvas de Nivel, obtenidas por efecto Moiré debido a la proyección de sistemas de franjas de paso similar.	
		Interferometría	Consiste en variar el camino óptico y obtener información de fase de las franjas de interferencia. Puede ser a incidencia normal, oblicua o Interferometría a luz blanca	
	Tiempo de Vuelo		Para calcular la distancia absoluta de un punto del objeto se envía un pulso de luz (usualmente láser), y se mide el retardo de tiempo del haz reflejado,	
	Microscopía Confocal		El cuerpo se ubica en un sistema de desplazamiento axial y la altura se determina identificando la posición donde se encuentra el máximo de intensidad del sistema Confocal.	
	P A S I V O S	Visión estéreo		A partir de dos imágenes tomadas en diferentes ángulos, se busca la correspondencia entre características y se halla la profundidad, esto es semejante al modelo binocular humano.
Shape from Shading		La información 3D se encuentra a través del manejo de sombras		

Fuente: [5]

Los métodos ópticos son aquellos que se basan en el proceso y codificación de la topografía por medio de propiedades ópticas, tales como triangulación láser, fase óptica del frente de onda, índice de refracción, tiempo de vuelo de un pulso láser, etc. Estos métodos son ampliamente utilizados debido a su característica no invasiva, los bajos costos que generan y la gran resolución que puede llegar a obtenerse. Es decir, con interferometría láser se puede obtener información de la topografía de un objeto micrométrico; con triangulación láser el tamaño del objeto pasa desde milímetros hasta metros, adaptando sus componentes. La Tabla 1 muestra los métodos ópticos más utilizados.

2.2. COMPONENTES PRINCIPALES DE LA RECONSTRUCCION 3D POR VÍA ÓPTICA

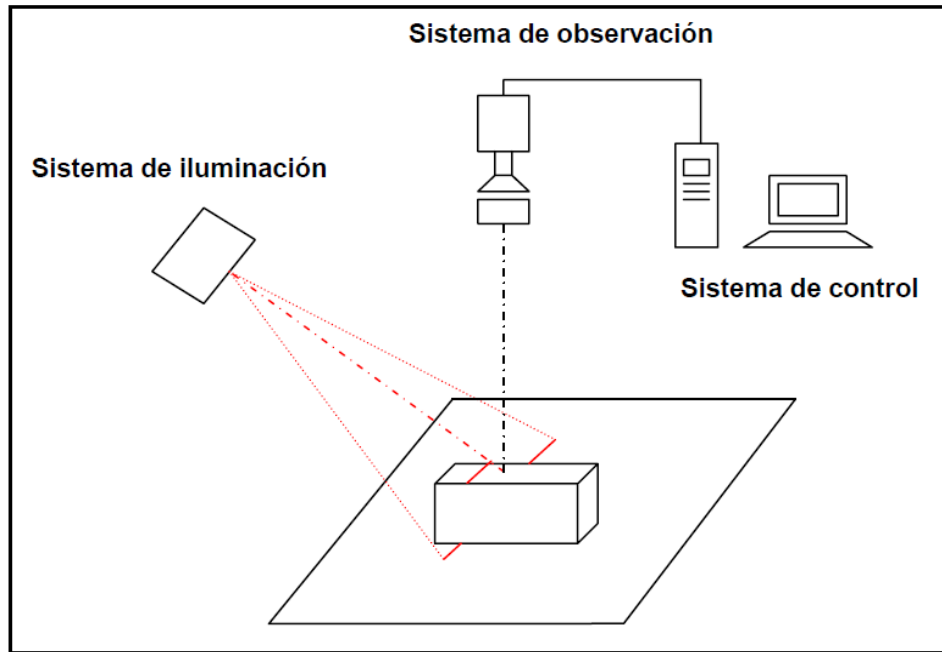
La reconstrucción 3D tomando como referencia los métodos ópticos, que traducen la forma del objeto en parámetros digitales reconocidos y calibrados, en general poseen la misma serie de componentes [5].

Estos componentes son:

- **SISTEMA DE ILUMINACIÓN**

Corresponde al sistema óptico que ilumina la superficie del objeto a medir, puede ser una fuente de luz blanca o un láser. Según la Tabla 1, los métodos activos alteran parámetros del sistema de iluminación del objeto. Dependiendo del método óptico a utilizar se necesitan ciertos parámetros en la fuente de iluminación, como la proyección de líneas o planos láser en el objeto, la variación de intensidad de proyección y posicionamiento para generación de sombras, iluminación uniforme con franjas, para poder determinar propiedades como deformaciones, rango de observación, luminosidad, brillo, tono, etc.

Figura 3. Componentes de la reconstrucción tridimensional por método óptico.



Fuente: [9]

- **SISTEMA DE OBSERVACIÓN**

La adquisición de datos para su posterior procesamiento generalmente se hace a través de dispositivos que traducen la información lumínica en información eléctrica, esto se hace a través de la toma de imágenes o videos, con cámaras CCD (siglas en inglés de charge-coupled device: 'dispositivo de carga acoplada'), digitales o analógicas. Éstas últimas requieren de un proceso de conversión analógico-digital para realizar el proceso digital de las imágenes y obtener la reconstrucción tridimensional del objeto.

Las cámaras CCD pueden utilizarse en forma de matriz de $N \times M$ pixeles o en forma de línea de N pixeles. De igual forma también existen en el mercado sistemas de adquisición de imágenes con tecnología CMOS, que permite el acceso individual de pixeles. Estas cámaras pueden digitalizar las imágenes en

niveles de gris o en verdadero color, útil para la adición de la textura real del objeto a la reconstrucción 3D.

- **SISTEMA DE CONTROL**

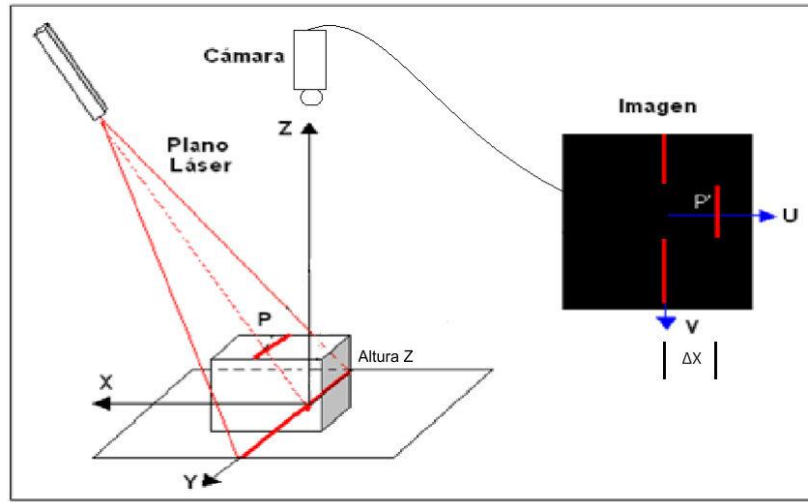
Los datos son procesados con la ayuda de la tarjeta de adquisición de imágenes presente en el computador. Para el análisis en tres dimensiones existen métodos que necesitan diferente número de imágenes, que van desde una (método de transformada de Fourier), cuatro imágenes (método de corrimiento de fase a 4 imágenes) hasta muchas imágenes (videos), pasando por aquellas que necesitan múltiples imágenes (triangulación láser).

Existen diversos procesos intermedios en el procesamiento para la obtención de la reconstrucción 3D como: el almacenamiento, pre-tratamiento y calibración, que son de vital importancia en el correcto y eficiente manejo de datos. La estructura matemática a emplear en el tratamiento depende del método óptico empleado.

2.3. MÉTODO DE TRIANGULACIÓN LÁSER

Uno de los métodos usados en la reconstrucción tridimensional es la triangulación láser, el cual es un método relativamente económico, no invasivo, fiable, consistente y con un alto nivel de resolución [9], [12]. El sistema de iluminación proyecta un punto o una línea láser sobre el objeto en estudio a un ángulo conocido con respecto a la cámara. La cámara se ubica con su eje óptico perpendicular al plano donde se proyecta el láser, llamado plano de referencia.

Figura 4. Principio de funcionamiento de la triangulación láser.

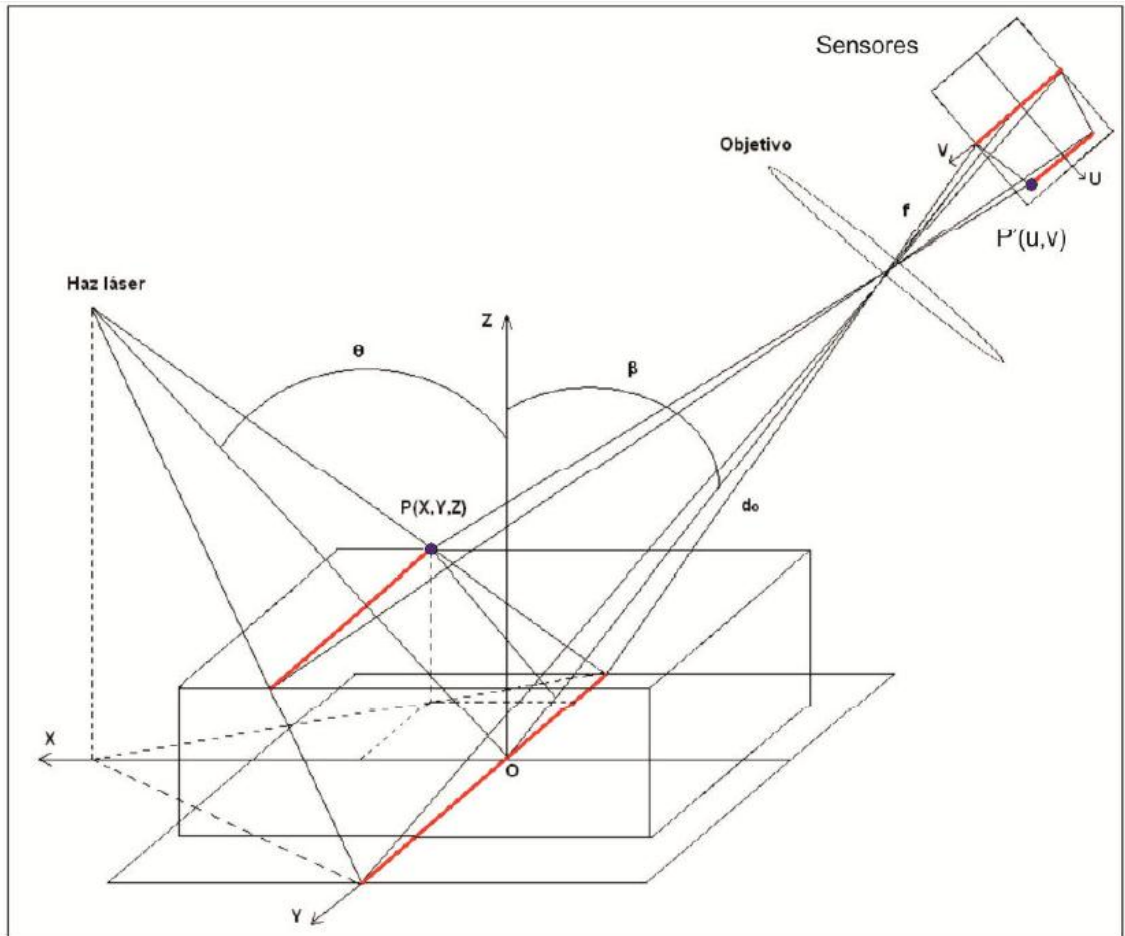


Fuente: [10]

En el caso de la proyección de una línea, como en la Figura 4, al observar la imagen capturada con la proyección sobre el plano de referencia, sin objeto, se podrá obtener una línea recta continua. Sin embargo, al ubicarse un objeto que obstaculice el plano, se percibe una deformación en esta, como es el caso de la imagen mostrada en la Figura 4, que depende del ángulo entre el plano láser y el eje óptico de la cámara. Con la deformación de la línea proyectada es posible establecer la altura de cada punto, ya que la distancia de deformación de la línea con respecto a la línea de base sobre el plano de referencia, es proporcional a la altura a la que se encuentra el punto en el espacio.

Si la cámara no estuviera en el eje Z, el cual determina la altura del objeto, sino a un ángulo β con respecto a este, y el ángulo de proyección del plano láser fuera θ (también con respecto a Z), se tendría el esquema mostrado en la Figura 5.

Figura 5. Geometría general de la triangulación láser.



Fuente: [11]

Si las coordenadas del punto P son (x,y,z) y las coordenadas del punto P' son (u,v) , por relaciones geométricas básicas y la Ley de Gauss para las lentes delgadas, se tiene que la coordenada "z" del punto P está relacionada con la coordenada "u" del punto P', por la ecuación:

$$z = \frac{u \cos \beta}{M \cos(\theta + \beta) [\tan(\theta + \beta) + (u/f)]} \quad (1)$$

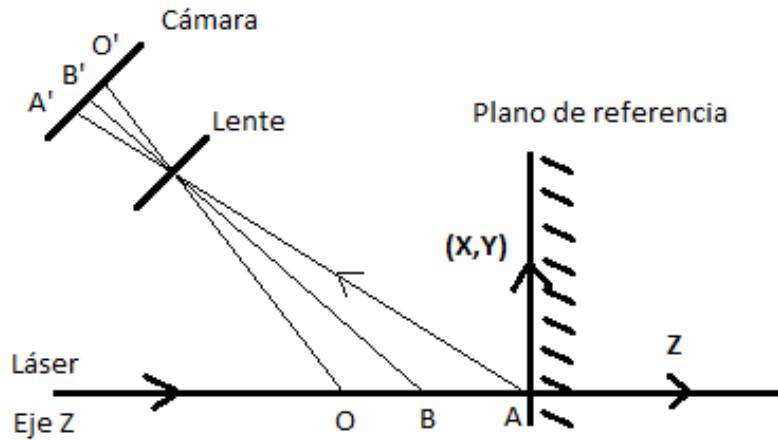
Donde M es el factor de ampliación geométrica, que se puede aproximar como el cociente entre la focal efectiva de la cámara (f) y la distancia desde O hasta el

centro del sistema óptico de la lente (d_0). Según la ecuación 1, calculando la coordenada “u” de un punto sobre la línea láser en la imagen adquirida se puede determinar z para ese punto conociendo θ , β y f . El tratamiento digital de la imagen consiste en extraer las coordenadas en pixeles del centro de la línea láser deformada [10], [11].

Experimentalmente, la determinación de los parámetros del montaje con precisión es difícil, ya que los ejes ópticos de proyección y observación no están bien definidos espacialmente. Por lo tanto, el proceso de reconstrucción requiere de una ecuación de conversión que puede obtenerse de manera experimental.

El procedimiento de calibración experimental consiste en el desplazamiento del plano de referencia en dirección del eje Z en un intervalo alrededor del origen (Desde el punto 0 al punto A en la Figura 6), obteniéndose así el rango de medida del dispositivo. El desplazamiento se realiza a intervalos ΔZ conocidos y empleándose una platina paso a paso de alta resolución. Para cada posición z se adquiere la imagen de la línea láser. Debido al ángulo entre el plano láser y el eje óptico de la cámara, para cada posición z del plano de referencia la posición de la línea en el plano cambia. Así, si el plano de referencia se encuentra en A, su imagen se encuentra en A', pero si se traslada a B la imagen de la línea se encuentra en B'. De esta manera una posición de la imagen de la línea láser representa una coordenada z única. Debido al incremento en ΔZ , existirán posiciones en la imagen que no tienen asociada una coordenada z, un procedimiento de interpolación permitirá asociar para cada pixel en la imagen una única coordenada z. Este procedimiento se explicará en detalle experimentalmente en el Capítulo 3.

Figura 6. Descripción del proceso de calibración experimental.



Fuente: [12]

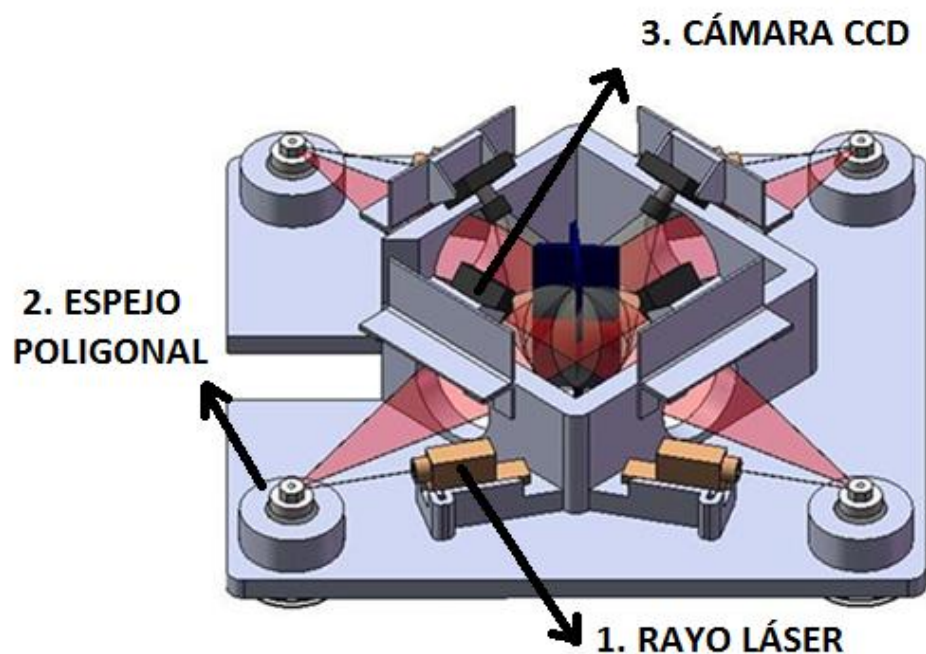
De esta manera, la reconstrucción tridimensional de un objeto se realiza de la siguiente manera: se adquiere una imagen deformada de la línea láser, como se indica en el montaje de la Figura 5, se realiza un procesamiento digital a la imagen para calcular las coordenadas en píxeles del centro de la línea láser y se determina para cada coordenada calculada su valor de la coordenada “z”, encontrada en el proceso de calibración. Si se desea reconstruir toda la superficie del objeto, se debe barrer la línea láser a intervalos ΔX , según la Figura 5. Alternativamente, el procedimiento se puede realizar empleando un haz láser que genera un punto sobre la superficie, pero se requiere de los barridos en “x” y “y”, para reconstruir la superficie del objeto. En el caso que el objeto tiene simetría axial, solo interesa extraer una sección transversal, no es necesario hacer barridos pero si se requiere observar a 360° alrededor del eje axial.

3. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D A MULTICAPTOR IMPLEMENTADO

3.1. DIAGRAMA EXPERIMENTAL DEL MONTAJE

Con el fin de extraer información completa de la sección transversal es necesario ubicar varias cámaras alrededor del objeto, proyectando de esta manera un plano láser generado de diferentes posiciones angulares para obtener un corte transversal de la sección del cable. Las cámaras ubicadas estratégicamente alrededor permiten, una vez unidas sus imágenes en un solo sistema coordinado, obtener información completa de la sección transversal. La Figura 7 muestra un diagrama del sistema implementado.

Figura 7. Diagrama del sistema implementado.



Fuente: [12]

El montaje fue desarrollado como parte de un proyecto de maestría de ingeniería electrónica [12] y cuenta con los siguientes componentes:

- Chasis de aluminio laminado.
- 4 Motores de paso 3600 rpm
- 4 Láseres.
- 4 Lentes.
- 4 Cámaras CCD de 640*480 pixeles con lentes focales de 8 mm.
- Tarjeta electrónica para controlar motores de paso.
- Fuente de alimentación de 5 V_{DC}.
- Tarjeta digitalizadora monocromática multicanal.
- Computador.

Básicamente el dispositivo consta de cuatro unidades de proyección y observación independientes. Al incidir un rayo láser sobre un espejo poligonal que gira a alta velocidad se genera un plano láser horizontal con un ángulo de dispersión del orden de 20°. Al ubicar el objeto con su eje axial vertical, la superficie del objeto intercepta al plano láser formándose una línea láser distorsionada, que es adquirida por una cámara CCD. Los elementos 1, 2 y 3 mostrados en la Figura 7, permiten recuperar información topográfica de la sección transversal del objeto que intercepta al plano láser. Al ubicar cuatro unidades alrededor del eje axial del objeto, formando aproximadamente 90°, es posible extraer información topográfica de toda la sección transversal, después de la calibración de cámaras y procesamiento digital de las imágenes.

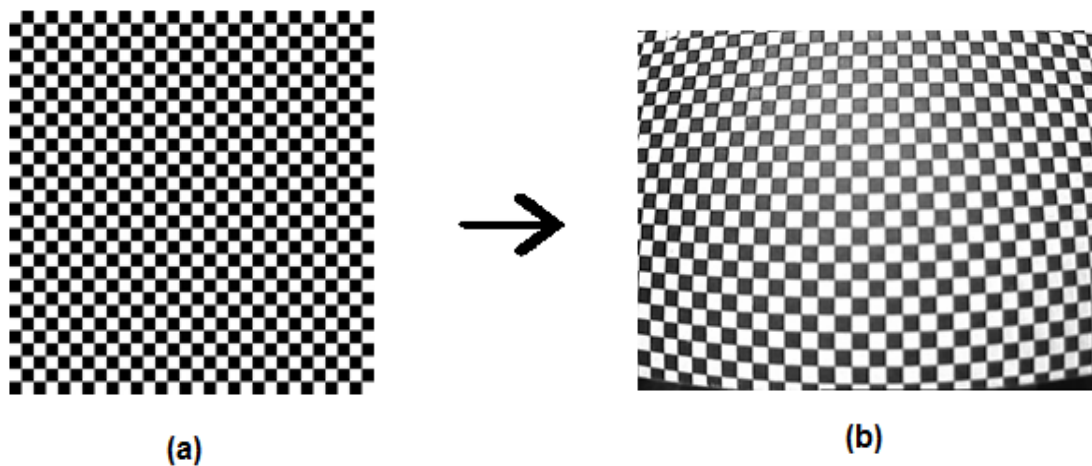
3.2. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGEN

Para obtener la reconstrucción total de la sección transversal, es necesario hacer diferentes procedimientos de calibración y procesamiento de las imágenes, los cuales se describen a continuación.

3.2.1. Calibración de las cámaras

El proceso de calibración del sistema de adquisición de imágenes ocupa un lugar muy importante para acceder a una aproximación tridimensional de un objeto. Para esto, es necesario reducir todas las aberraciones que se encuentren en las imágenes tomadas. La Figura 8 muestra la influencia de la distorsión geométrica de la lente al formar la imagen de un objeto plano con textura similar a la de un tablero de ajedrez para las cámaras empleadas.

Figura 8. Imagen en forma de tablero de ajedrez. (a) Imagen real, (b) Imagen capturada con una cámara.



Fuente: Autor.

Tradicionalmente la distorsión geométrica es modelada teóricamente de manera polinomial, donde los coeficientes son parámetros constantes del sistema formador de imágenes utilizado [16]. De igual forma la imagen adquirida tiene unidades dimensionales arbitrarias llamadas pixeles y deben ser convertidas a milímetros sobre el objeto. Este factor de conversión depende del factor de ampliación y focal del objetivo utilizado. Estos parámetros son calculados a partir

de procedimientos típicos de calibración de cámaras, comúnmente llamados parámetros intrínsecos.

3.2.1.1. Estructura Teórica

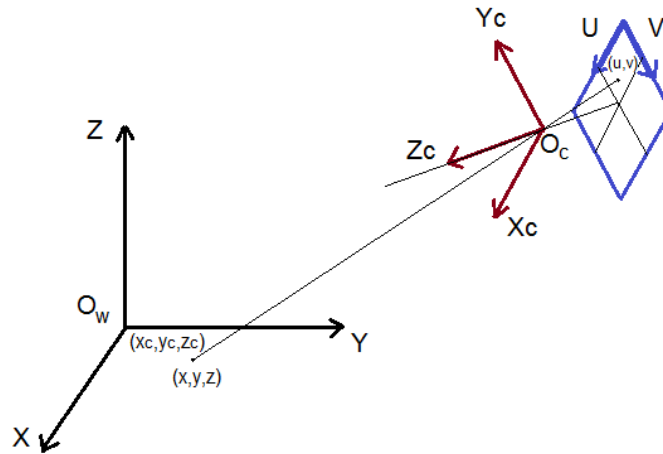
La formación de una imagen es un proceso de transformación tridimensional a bidimensional, a través de un proceso de proyección en perspectiva puntual. La Figura 9 muestra los sistemas coordenados empleados en este proceso de transformación. El objeto se encuentra ubicado en el sistema coordenado $O_w(X, Y, Z)$, llamado sistema coordenado del objeto. La cámara posee otro sistema coordenado con su eje Z_c paralelo al eje óptico de la lente y el origen O_c se ubica en la pupila de entrada. Los ejes X_c y Y_c son paralelos al plano del captor CCD o plano imagen ubicado a una distancia aproximada f , focal de la lente. Cualquier punto en el espacio del objeto es proyectado sobre el plano imagen siguiendo una línea recta que une al plano con el origen O_c e intercepta el punto imagen.

Los parámetros de calibración se dividen en dos grandes grupos, los cuales son: extrínsecos e intrínsecos.

3.2.1.1.1. Parámetros extrínsecos

La ubicación del punto tridimensional en la imagen depende de la posición relativa del sistema coordenado de la cámara con respecto al sistema coordenado del objeto. La primera transformación del sistema coordenado que se realiza en la proyección puntual es la conversión del sistema coordenado del objeto al sistema coordenado de la cámara a través de una operación de rotación y una traslación. Las constantes que se involucran en esta transformación entre sistemas coordenados son llamados parámetros extrínsecos.

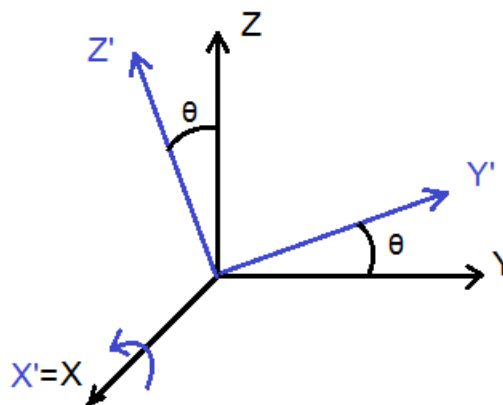
Figura 9. Definición de dos sistemas coordenados (Con respecto a la cámara y con respecto al objeto).



Fuente: Autor.

Para establecer la transformación entre sistemas coordenados es necesario realizar ciertos procesos matemáticos básicos como lo son la rotación y la traslación. Primero se puede hacer una rotación en cada uno de los ejes coordenados (X , Y y Z), y luego trasladarlos la distancia entre los orígenes de los dos sistemas.

Figura 10. Rotación del sistema coordenado en un ángulo θ .



Fuente: Autor.

Para rotar un eje un ángulo θ , por ejemplo en torno al eje X, matemáticamente se modelaría:

$$Y' = Y \cdot \text{Cos } \theta + Z \cdot \text{Sen } \theta \quad (2)$$

$$Z' = Z \cdot \text{Cos } \theta - Y \cdot \text{Sen } \theta \quad (3)$$

$$X' = X \quad (4)$$

Es decir,

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos } \theta & \text{Sen } \theta \\ 0 & -\text{Sen } \theta & \text{Cos } \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Si después de haber rotado el eje X se rota el eje Y un ángulo α , se tendrá:

$$Z'' = Z' \cdot \text{Cos } \alpha + Y' \cdot \text{Sen } \alpha \quad (6)$$

$$X'' = X' \cdot \text{Cos } \alpha - Z' \cdot \text{Sen } \alpha \quad (7)$$

$$Y'' = Y' \quad (8)$$

Es decir,

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \alpha & 0 & -\text{Sen } \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{Sen } \alpha & 0 & \text{Cos } \alpha \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (9)$$

Y finalmente al rotar el eje Z del sistema coordinado resultante, se tendrá:

$$X''' = X'' \cdot \text{Cos } \beta + Y'' \cdot \text{Sen } \beta \quad (10)$$

$$Y''' = Y'' \cdot \text{Cos } \beta - X'' \cdot \text{Sen } \beta \quad (11)$$

$$Z''' = Z'' \quad (12)$$

Resultando,

$$\begin{pmatrix} X''' \\ Y''' \\ Z''' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \beta & \text{Sen } \beta & 0 \\ -\text{Sen } \beta & \text{Cos } \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} \quad (13)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones se obtendrá el siguiente resultado:

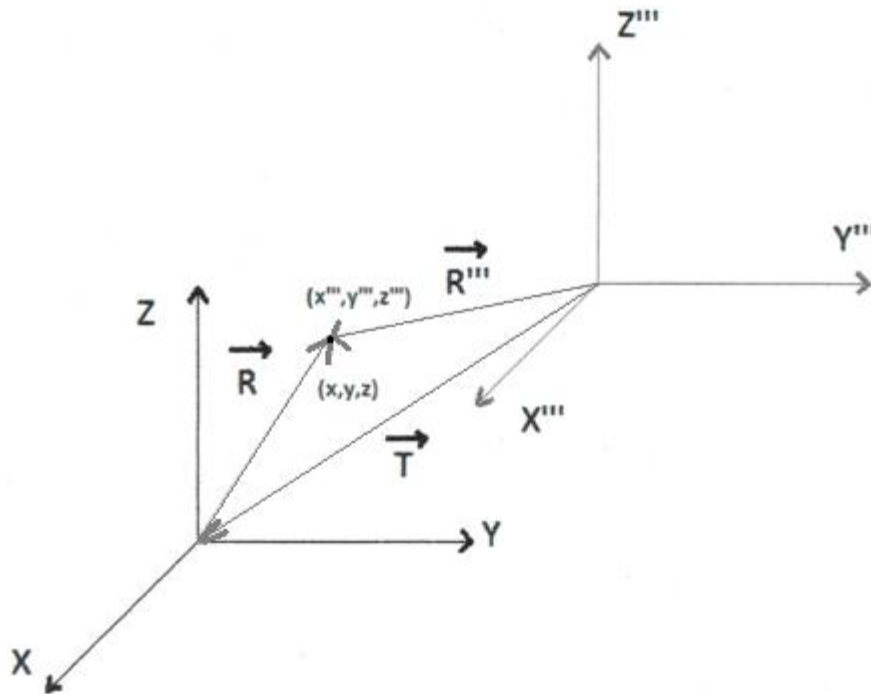
$$\begin{pmatrix} X''' \\ Y''' \\ Z''' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \beta \cdot \text{Cos } \alpha & \text{Cos } \beta \cdot \text{Sen } \alpha \cdot \text{Sen } \theta + \text{Sen } \beta \cdot \text{Cos } \theta & -\text{Sen } \alpha \cdot \text{Cos } \theta \cdot \text{Cos } \beta + \text{Sen } \theta \cdot \text{Sen } \beta \\ -\text{Sen } \beta \cdot \text{Cos } \alpha & -\text{Sen } \beta \cdot \text{Sen } \theta \cdot \text{Sen } \alpha + \text{Cos } \beta \cdot \text{Cos } \theta & \text{Sen } \beta \cdot \text{Sen } \alpha \cdot \text{Cos } \theta + \text{Sen } \theta \cdot \text{Cos } \beta \\ \text{Sen } \alpha & -\text{Cos } \alpha \cdot \text{Sen } \theta & \text{Cos } \alpha \cdot \text{Cos } \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} X''' \\ Y''' \\ Z''' \end{pmatrix} = M_{rt} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (15)$$

Donde M_{rt} es la matriz de rotación total.

La traslación de un sistema coordinado a otro puede ser descrita gráficamente como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Descripción del proceso de translación y sus vectores relacionados.



Fuente: Autor.

Pudiéndose observar que $\vec{R}''' = \vec{T} + \vec{R}$. Adecuando todos estos procesos en los sistemas coordenados descritos en la Figura 9, se tiene que:

$$\vec{RC} = \vec{T} + \vec{R} = \vec{T} + M_{rt} \cdot \vec{r} \quad (16)$$

Donde \vec{RC} , es el vector posición de un punto en coordenadas de la cámara; M_{rt} es la matriz de rotación previamente hallada; \vec{r} es el vector posición en coordenadas del objeto y \vec{T} es el vector translación en coordenadas de la cámara.

Conociendo las coordenadas del punto sobre el objeto es posible calcular sus coordenadas en el sistema coordenado de la cámara, para esto es necesario hallar los 9 elementos que componen la matriz de rotación total, más los 3 valores

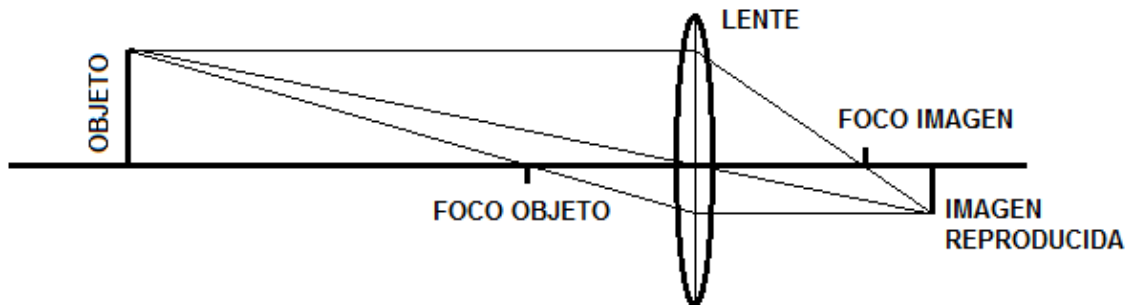
de la matriz de traslación, a estos parámetros se les conoce como extrínsecos, ya que son propios del entorno.

3.2.1.1.2. Parámetros intrínsecos

Todas las cámaras fotográficas poseen una lente, esta lente no es más que una serie de objetos curvados hechos generalmente de vidrio el cual es capaz de desviar rayos de luz de tal manera que pueda formar una imagen, la cual es registrada por medio del sensor.

Los rayos paralelos que inciden en la lente, convergen en un punto llamado foco, si el objeto se encuentra una distancia posterior el foco la imagen reproducida en la cámara será más pequeña e invertida. El tamaño del objeto puede ser calculado si se conoce la distancia focal, la posición del objeto y la imagen captada por el sensor.

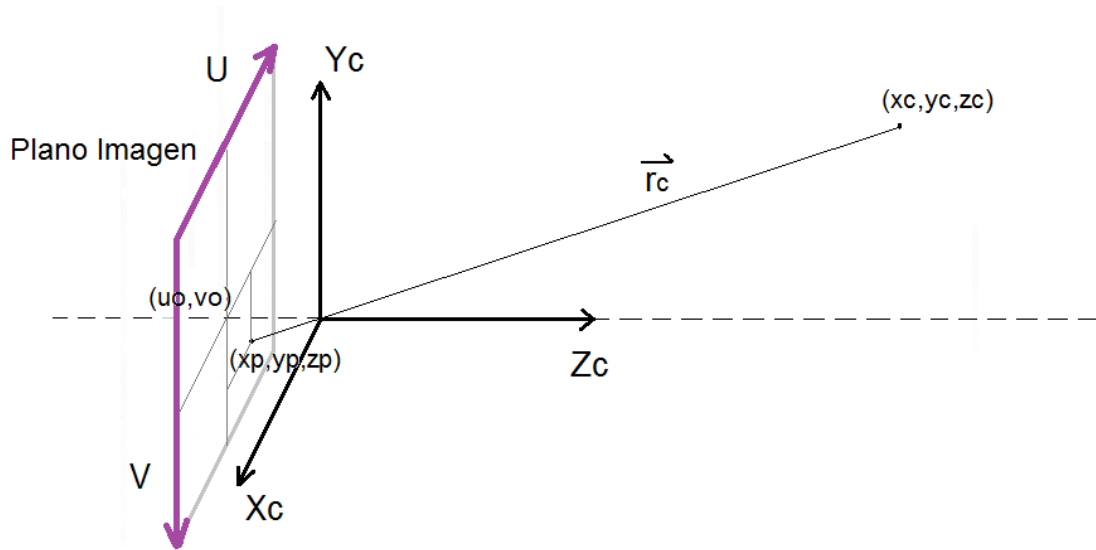
Figura 12. Rayos incidentes en una lente.



Fuente: Autor.

La Figura 13 muestra el proceso de proyección puntual de un punto en el espacio con coordenadas (X_c, Y_c, Z_c) al sistema coordenado en pixeles del plano imagen (u, v) .

Figura 13. Punto en el espacio visto en coordenadas del sistema con respecto a la cámara (X_c, Y_c, Z_c) y su proyección a través del lente (X_p, Y_p, Z_p), con su respectiva conversión en coordenadas de la imagen resultante ((u, v) en pixeles).



Fuente: Autor.

Por medio de las relaciones básicas de triángulos se tiene que:

$$\frac{x_c}{z_c} = \frac{x_p}{z_p} \quad (17)$$

Sin embargo la distancia z_p es aproximadamente la distancia focal f . Luego se tiene:

$$\frac{x_c}{z_c} = \frac{x_p}{f} \quad (18)$$

$$x_p = \frac{f}{z_c} \cdot x_c \quad (19)$$

Y por relaciones similares,

$$y_p = \frac{f}{z_c} \cdot y_c \quad (20)$$

Si se establece que $x_c/z_c = x_n$ y $y_c/z_c = y_n$, se tendrá,

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 \\ 0 & f \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} \quad (21)$$

Otra notación de este mismo resultado que será útil más adelante es:

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Los ejes coordenados U y V presentes en la Figura 13, son las coordenadas en pixeles que se obtienen al tomar la imagen y digitalizarla, en donde las coordenadas del punto en estudio serán:

$$u = D_x \cdot x_p + u_0 \quad (23)$$

$$v = D_y \cdot y_x + v_0 \quad (24)$$

Donde D_x y D_y son los factores de la conversión en pixeles/milímetros y (u_0, v_0) es la posición del eje Z_c en la imagen medido en pixeles (Es importante tener en cuenta el signo debido a la inversión de la imagen). Tomando en cuenta las ecuaciones 22, 23 y disponiendo que $f_x = D_x \cdot f$ y $f_y = D_y \cdot f$, se obtendrá:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

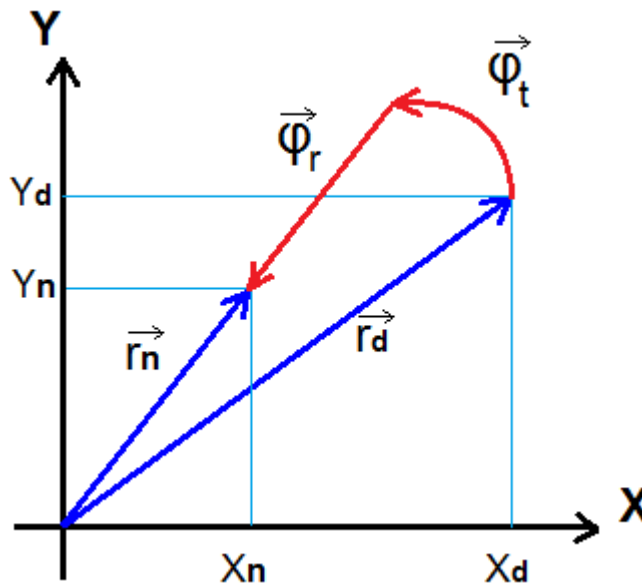
Es decir,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K * \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Donde K , es la matriz resultante. Los elementos que conforman (f_x, f_y, u_0, v_0) , son parte de los parámetros intrínsecos de la cámara.

Al tener una imagen de cualquier cámara, esta va a poseer ciertas aberraciones que es posible minimizar. Si se tiene un punto con aberraciones (x_d, y_d) y se desea corregirlas, se tendrá que establecer la distorsión radial ($\vec{\varphi}_r$) y la distorsión tangencial ($\vec{\varphi}_t$) para llegar a las coordenadas del punto sin aberraciones (x_n, y_n) , como se muestra en la Figura 14. Es decir, los defectos de las lentes desvían la posición ideal geométrica \vec{r}_n a la posición real \vec{r}_d .

Figura 14. Vectores que describen un punto con aberraciones geométricas y el mismo punto corregido (sin aberraciones).



Fuente: Autor.

La distorsión total está dada por la suma de las distorsiones radiales y tangenciales:

$$\vec{\varphi}_t = \vec{\varphi}_r + \vec{\varphi}_t \quad (27)$$

$$\vec{\varphi}_r = \varphi_r^x \hat{i} + \varphi_r^y \hat{j} \quad (28)$$

$$\vec{\varphi}_t = \varphi_t^x \hat{i} + \varphi_t^y \hat{j} \quad (29)$$

Donde \hat{i} y \hat{j} son los vectores unitarios en las direcciones de los ejes X y Y, respectivamente. Matemáticamente las aberraciones geométricas más comunes que generan $\vec{\varphi}_t$ y $\vec{\varphi}_r$ han sido descritas por relaciones polinomiales, a través de coeficientes matemáticos. Si se agrupan los coeficientes de la distorsión radial y tangencial en un solo vector $k_c = \{k_c(1), k_c(2), k_c(3), k_c(4), k_c(5)\}$, se complementan todos los parámetros intrínsecos con los demás componentes previamente nombrados se tendrá (observar que el coeficiente de distorsión de sexto orden radial es la quinta entrada del vector):

$$\varphi_r^x = k_c(1) x_n^2 + k_c(2) x_n^4 + k_c(5) x_n^6 \quad (30)$$

$$\varphi_r^y = k_c(1) y_n^2 + k_c(2) y_n^4 + k_c(5) y_n^6 \quad (31)$$

$$\varphi_t^x = 2 k_c(3) x_n y_n + k_c(4) (r_n^2 + 2 x_n^2) \quad (32)$$

$$\varphi_t^y = k_c(3) (r_n^2 + 2 y_n^2) + 2 k_c(4) x_n y_n \quad (33)$$

Por lo tanto,

$$x_d = x_n + \varphi_r^x + \varphi_t^x \quad (34)$$

$$y_d = y_n + \varphi_r^y + \varphi_t^y \quad (35)$$

Vale la pena señalar que este modelo de distorsión planteado en las ecuaciones 30 y 33, se introdujo por primera vez por Brown en 1966 llamado modelo “Plumb Bob” (polinomio radial + “prisma delgado”). La distorsión tangencial se debe a la “descentralización”, o imperfecto de centro de los componentes del lente y otros defectos de fabricación en un lente compuesto.

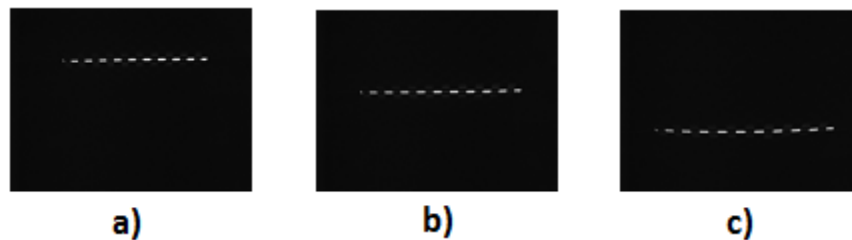
3.2.1.2. Procedimiento experimental de calibración de las cámaras

Según las anteriores ecuaciones, la posición en pixeles de un punto en la imagen (u,v) proveniente de un punto del objeto (x,y,z) , están relacionados por 12 coeficientes extrínsecos y 9 coeficientes intrínsecos. El objetivo de un procedimiento de calibración de una cámara es encontrar los 21 coeficientes a través de un procedimiento de optimización no lineal que asocie coordenadas (x,y,z) y su correspondiente (u,v) de N puntos conocidos llamados puntos de control. Estos puntos de control son obtenidos de patrones de calibración con dimensiones conocidas. El patrón de calibración empleado tiene la forma de tablero de ajedrez con una distancia entre cuadros conocida. El patrón fue impreso en una hoja y adherido a una superficie plana. Las esquinas de cada cuadro definen los puntos de control.

Para hallar los parámetros de calibración de las cámaras (intrínsecos y extrínsecos), se hace uso del software MATLAB[®], con ayuda de la herramienta “Camera CalibrationToolbox” la cual permite calibrar cámaras y es de libre acceso en internet [13]. Sin embargo para comenzar a calcular estos parámetros, primero se debe elegir la zona de calibración; esta zona es donde se centra la corrección de aberraciones, se elige una zona y no toda la imagen de la fotografía, debido a que las aberraciones son menores en el centro de ella y más fuertes a medida que se acerca a las esquinas. De igual forma, la zona de calibración está definida por el área donde se ubica el objeto a medir. Como se explicó en el capítulo 2, al mover el plano de referencia entre la distancia máxima y mínima en z , la línea

láser se desplazará en el plano imagen en posiciones extremas, como se observa en la Figura 15 o en la Figura 16. Esto quiere decir que la topografía de cualquier objeto va a generar una línea láser deformada que no se sale de límite definido por las líneas extremas de la Figura 16. Es decir, puntos fuera de esta región no son usados por el sistema de triangulación láser; de ahí la importancia de calibrar y corregir aberraciones al interior de esta zona.

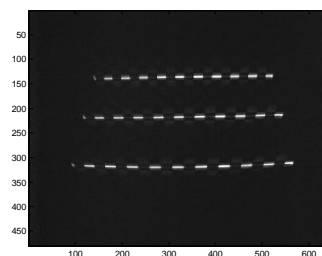
Figura 15. Imagen del cuadro de ajedrez con el plano láser proyectado en ella en un ambiente sin ningún otro tipo de iluminación a diferentes distancias z . a) Distancia máxima positiva de z , b) $z=0$, c) Distancia máxima negativa de z .



Fuente: Autor.

Para elegir esta zona de calibración se toman en cuenta las imágenes de valores extremos de z , tomadas con el método alternativo de calibración experimental del método de triangulación láser explicado en el capítulo 2.

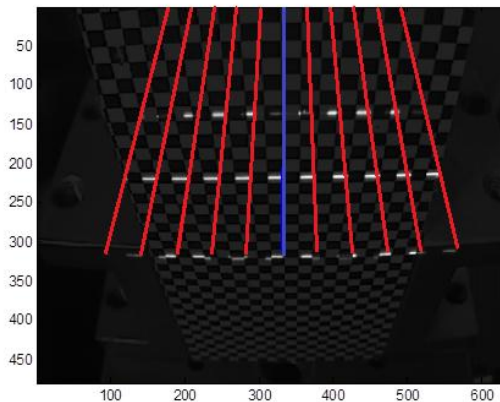
Figura 16. Superposición de las imágenes en la Figura 15.



Fuente: Autor.

Eligiendo los seis puntos extremos de esta figura, se pueden establecer líneas rectas en cada uno de los lados, de los cuales se puede obtener la tendencia para establecer otras líneas rectas de la forma en que lo muestra la imagen de la Figura 17.

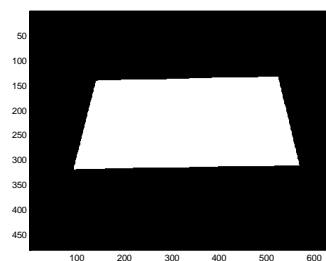
Figura 17. Líneas rectas con la tendencia de los extremos de las líneas de las imágenes superpuestas.



Fuente: Autor.

Estas líneas superpuestas en una ilustración semejante a un tablero de ajedrez tomada de frente a la cámara, ayuda a elegir la mejor zona para calibrar. La imagen escogida se binariza, obteniendo la región de interés mostrada en la Figura 18.

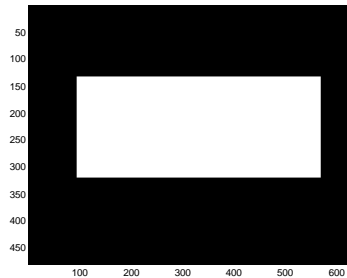
Figura 18. Imagen binarizada de la región seleccionada.



Fuente: Autor.

Tomando los puntos extremos de la imagen binarizada se puede construir una región rectangular que encierre de mejor forma toda la región elegida, Figura 19.

Figura 19. Región elegida de calibración.

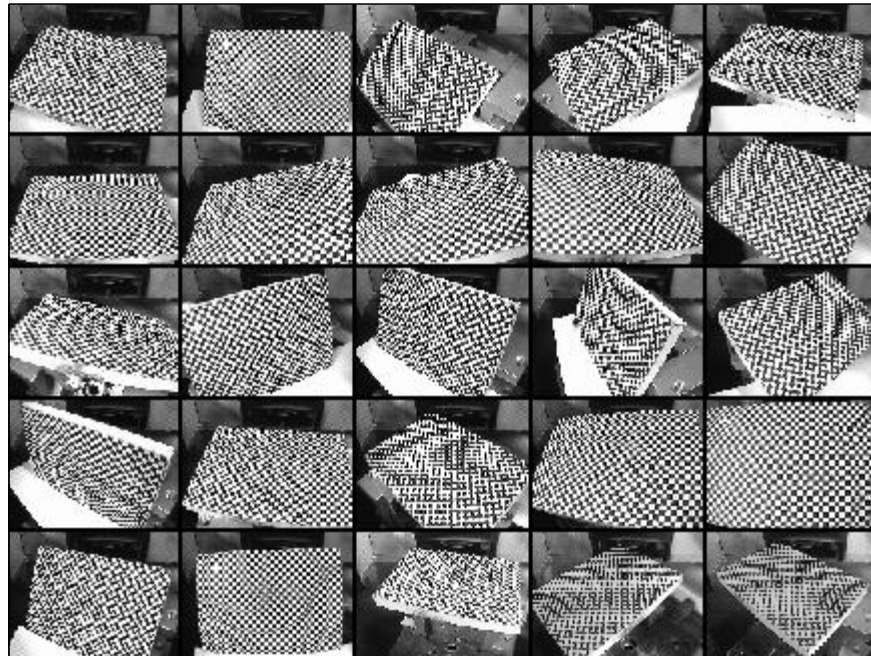


Fuente: Autor.

Al final se guardan las dos imágenes binarias, junto con las coordenadas en x e y de los puntos extremos de cada una de las imágenes. Teniendo el área de trabajo se prosigue a hallar los parámetros de calibración.

Para obtener los parámetros intrínsecos se deben tomar de 20 a 25 imágenes de un patrón de calibración en diferentes posiciones con respecto a la cámara, estas imágenes son cargadas en la herramienta de calibración del software utilizado. El procesamiento digital de las imágenes que realiza el software consiste inicialmente en calcular las coordenadas en píxeles de las esquinas de cada cuadro que se encuentra al interior de la zona útil de calibración.

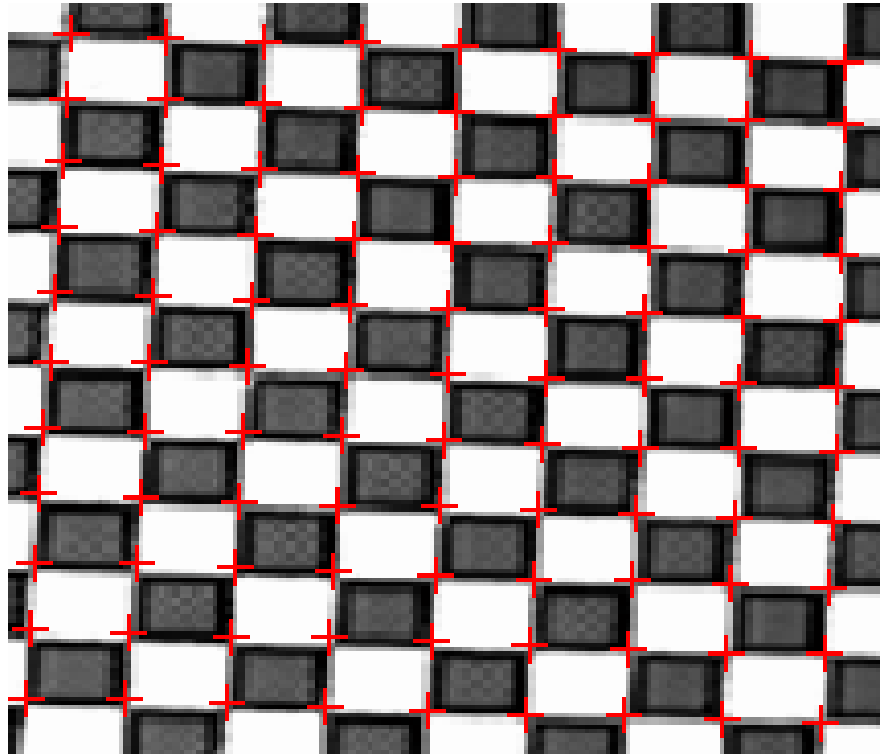
Figura 20. Imágenes para calibración de la primera cámara.



Fuente: Autor.

Para cada una de las imágenes tomadas se selecciona un número de cuadros en “x” y en “y”, de tal forma que se encuentre la zona que se desea calibrar. El primer punto a seleccionar siempre debe estar referenciado a un punto de origen común para todas las imágenes, es decir no se debe elegir necesariamente el mismo punto siempre, pero si se debe conocer la cantidad de cuadros en ambas direcciones de un punto considerado como el origen; la cantidad de cuadros es solicitada por el software, además del tamaño de los cuadros (La cuadrícula utilizada tiene una longitud de 2 x 2 mm por cuadro). Con los datos recolectados el software puede hallar las esquinas de los cuadros de la región seleccionada, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Extracción de esquinas de la región seleccionada.



Fuente: Autor.

Para cada punto de control se conoce (x,y,z) y (u,v) donde $z=0$ ya que los puntos de control se ubican en un plano. Con un total de cerca de 10000 puntos se realiza un proceso de optimización no lineal. Asignando valores a los 21 coeficientes se calcula (u_t, v_t) para cada punto a partir de $(x,y,0)$ y las ecuaciones de modelización, descritas anteriormente. La función de error que guía el proceso de optimización se define como:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(u_{it} - u_{ie})^2 + (v_{it} - v_{ie})^2] \quad (36)$$

Donde (u_e, v_e) son las coordenadas experimentales en pixeles de cada punto de control encontrados en cada imagen.

Para cada una de las cámaras se obtuvieron los parámetros intrínsecos mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros intrínsecos de las cámaras utilizadas.

PARÁMETRO	CÁMARA 1	CÁMARA 2	CÁMARA 3	CÁMARA 4
u_0 (Pixel)	362.0439	335.1135	322.0633	378.0938
v_0 (Pixel)	170.2059	169.9911	325.7372	199.6236
f_x (Pixel)	684.5256	713.2547	692.5706	697.1253
f_y (Pixel)	684.7793	714.8941	695.0895	698.5021
$K_C(1)$	-0.3828	-0.3970	-0.3944	-0.3914
$K_C(2)$	0.1526	0.2000	0.2205	0.1920
$K_C(3)$	0.0010	3.0426E-4	4.2304E-4	0.0018
$K_C(4)$	0.0019	1.6299E-5	-9.3170E-5	1.1139E-4
$K_C(5)$	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Autor.

Para calcular los parámetros extrínsecos el software requiere de una imagen del patrón de calibración. Esta imagen define el sistema coordenado del objeto como se indica en la Figura 22 y que va a definir el sistema coordenado de reconstrucción tridimensional de cada cámara, donde el eje z debe coincidir con el eje de calibración de cada sistema de triangulación láser, como se explicará a continuación. Los parámetros extrínsecos para cada cámara fueron:

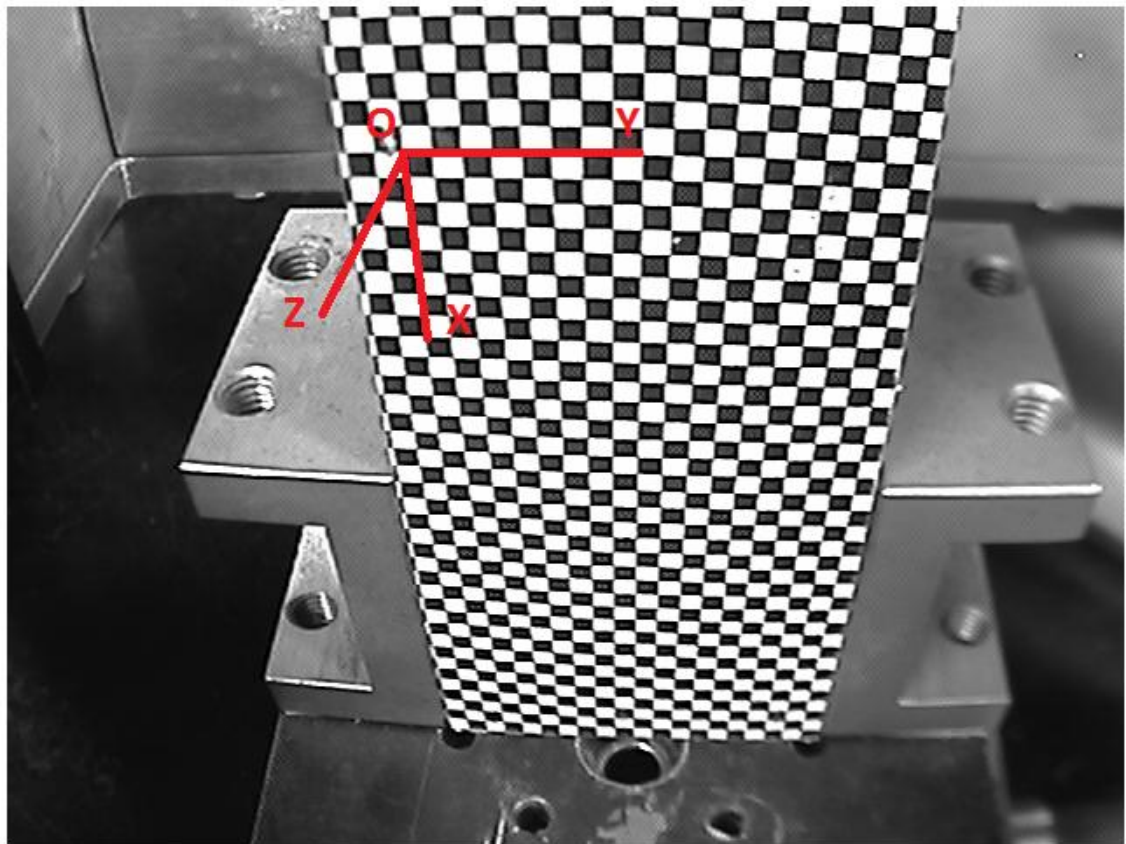
$$M_{rt}(\text{Cámara 1}) = \begin{bmatrix} -0.0139 & 0.9996 & -0.0232 \\ 0.7820 & 0.0253 & 0.6228 \\ 0.6231 & -0.0095 & -0.7821 \end{bmatrix}; T_1 = [-19.9308 \quad -4.0441 \quad 82.8000]$$

$$M_{rt}(\text{Cámara 2}) = \begin{bmatrix} 0.0076 & 1.0000 & 0.0030 \\ 0.7121 & -0.0075 & 0.7021 \\ 0.7021 & -0.0032 & -0.7121 \end{bmatrix}; T_2 = [-20.4353 \quad -3.4868 \quad 57.3062]$$

$$M_{rt}(\text{Cámara 3}) = \begin{bmatrix} -0.0124 & 0.9999 & -0.0035 \\ 0.6824 & 0.0110 & 0.7309 \\ 0.7309 & 0.0067 & -0.6824 \end{bmatrix}; T_3 = [-17.0536 \quad -21.8534 \quad 85.8971]$$

$$M_{rt}(\text{Cámara 4}) = \begin{bmatrix} -0.0519 & 0.9985 & -0.0160 \\ 0.6710 & 0.0467 & 0.7400 \\ 0.7397 & 0.0277 & -0.6724 \end{bmatrix}; T_4 = [-23.2082 \quad -8.4295 \quad 53.3877]$$

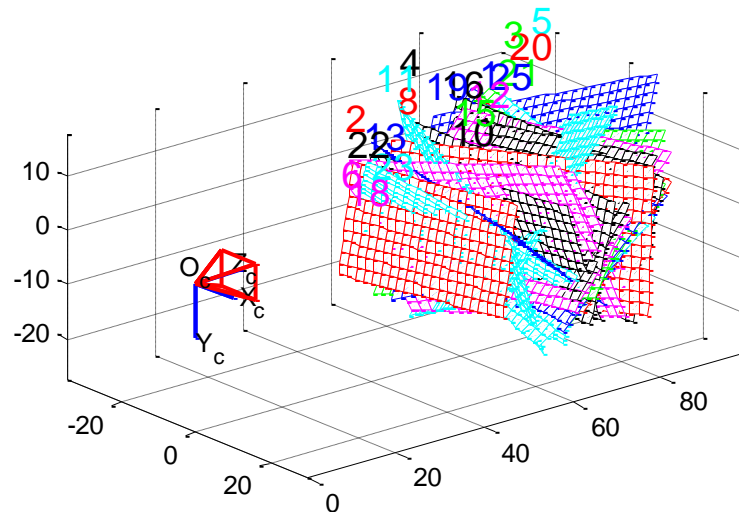
Figura 22. Definición del sistema coordenado del objeto.



Fuente: Autor.

La Figura 23 muestra las posiciones relativas del tablero de ajedrez con respecto al sistema coordenado de la cámara.

Figura 23. Posiciones relativas de las redes con respecto a la cámara.



Fuente: Autor.

3.2.2. Calibración de la línea láser

Para establecer la altura de cada uno de los puntos vistos en las imágenes tomadas por las cámaras se hace uso del sistema de calibración experimental con ayuda del método de triangulación láser. Como el sistema coordenado de reconstrucción debe coincidir con el sistema coordenado del objeto en el proceso de calibración de cada cámara, se usa el tablero de ajedrez en la posición empleada para definir los parámetros extrínsecos para calibrar la triangulación láser, con el procedimiento que se indicó en el capítulo 2. La Figura 24 muestra la línea láser de la cámara 1 para la posición $z=0$ mm. El tablero de ajedrez, que define el plano de referencia se desplaza de -11 mm a +11 mm a intervalos de 1 mm, con una platina de traslación que tiene una resolución de 10 μ m. Cada imagen es almacenada y procesada para calcular la línea central de cada imagen de la línea láser. Las imágenes tienen una resolución de 640 x 480 píxeles con 256 niveles de gris.

Figura 24. Imagen del cuadro de ajedrez con el plano láser proyectado en ella en un ambiente sin ningún otro tipo de iluminación.



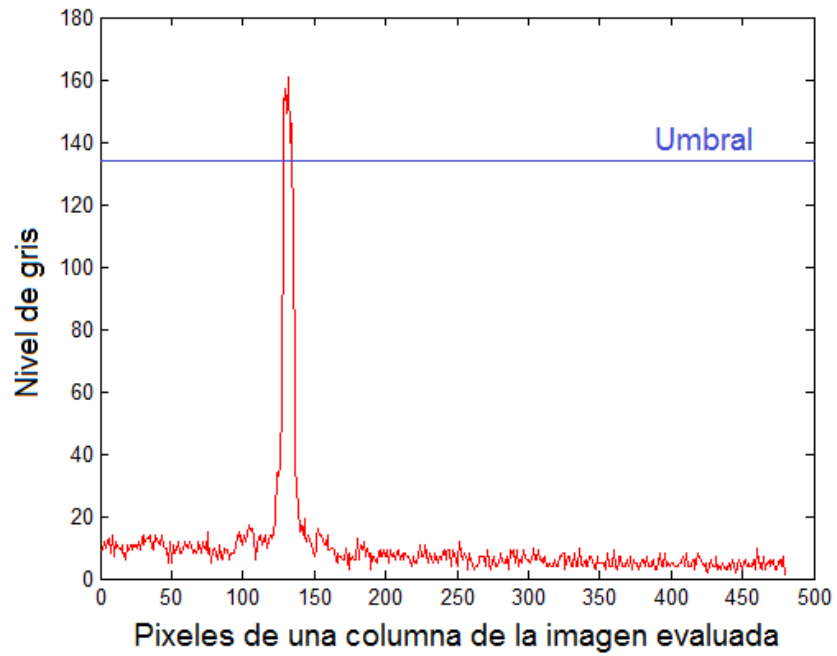
Fuente: Autor.

La Figura 25 muestra la lectura de los niveles de gris de una columna de la imagen a $z=0$. El centro de la línea láser se calcula binarizando la imagen, con un valor de umbral que corresponde a:

$$Umbral = I_{mín} + 0.85(I_{máx} - I_{mín}) \quad (37)$$

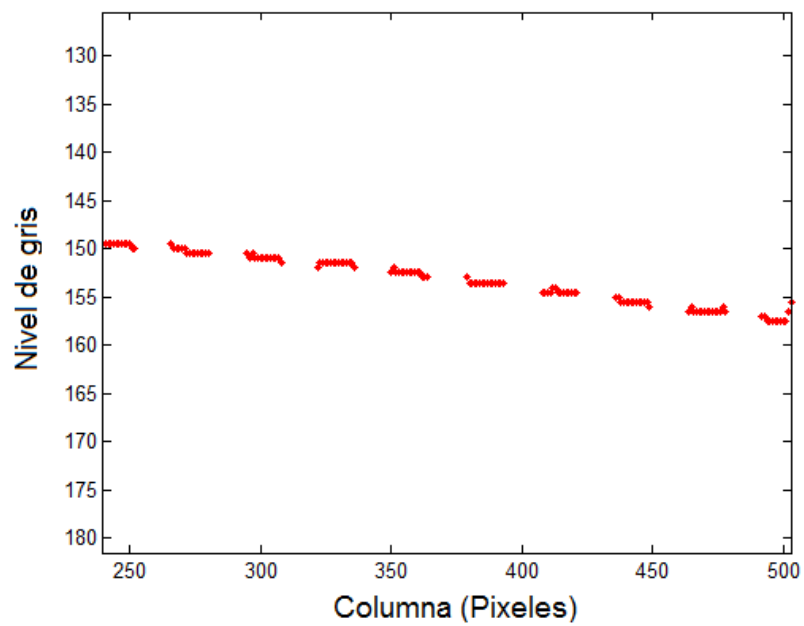
Donde $I_{máx}$ e $I_{mín}$ son los valores máximo y mínimo de intensidad de la imagen. A la imagen binarizada se le calcula el centro de masa columna por columna (Figura 26), de esta manera para cada posición z del intervalo se obtiene la línea central con una precisión de ± 1 pixel.

Figura 25. Gráfica de los niveles de gris en una columna de la imagen.



Fuente: Autor.

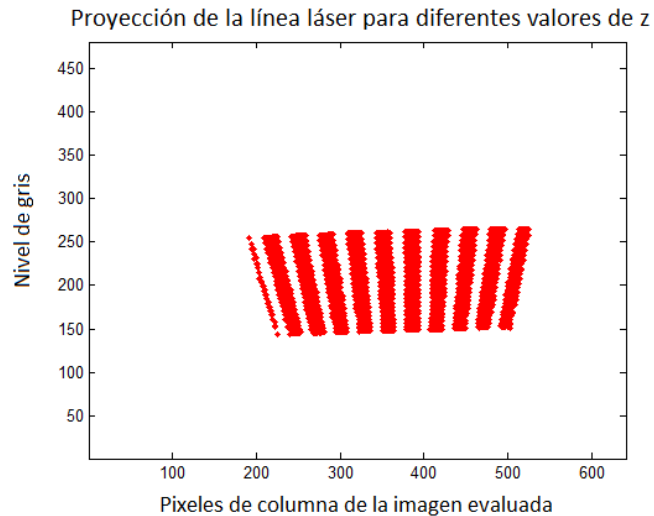
Figura 26. Gráfica de los niveles de gris de los puntos elegidos en varias columnas de la imagen.



Fuente: Autor.

Este proceso se debe realizar para cada imagen tomada a diferentes posiciones de z, las cuales fueron calculadas a medida que se tomaron las imágenes. La Figura 27 muestra la superposición de todas las líneas centrales de la línea láser para las diferentes posiciones z del plano de referencia.

Figura 27. Gráfica de los niveles de gris de los puntos elegidos de todas las imágenes tomadas a diferentes distancias (z).



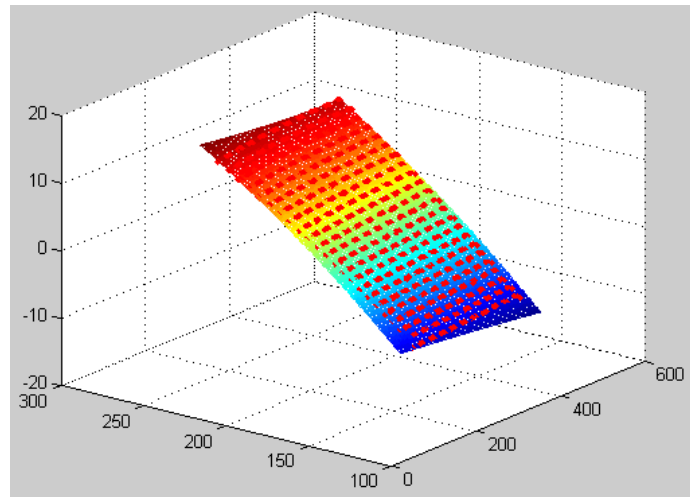
Fuente: Autor.

La Figura 28 muestra las coordenadas tridimensionales del proceso de calibración. Es decir, cada línea láser central tiene una coordenada z, al realizar un ajuste por mínimos cuadrados se obtiene un polinomio de interpolación dado por:

$$z = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F \quad (38)$$

Donde (x,y) corresponde a las coordenadas en píxeles y z la coordenada en milímetros. La ecuación es llamada curva de calibración del sistema de triangulación láser y los coeficientes son función de los parámetros del montaje.

Figura 28. Gráfica de la interpolación de todos los puntos seleccionados.



Fuente: Autor.

3.2.3. Reconstrucción tridimensional de cada cámara

Teniendo los parámetros intrínsecos, extrínsecos y la curva de calibración para cada cámara, se puede obtener la reconstrucción tridimensional por separado. El proceso de reconstrucción consiste en ubicar el objeto dentro de la zona de calibración y adquirir las imágenes de cada cámara. Sobre cada imagen se calculan las coordenadas (x,y) en píxeles del centro de la línea láser. Empleando la curva de calibración se obtiene el valor z de cada punto central de la línea láser.

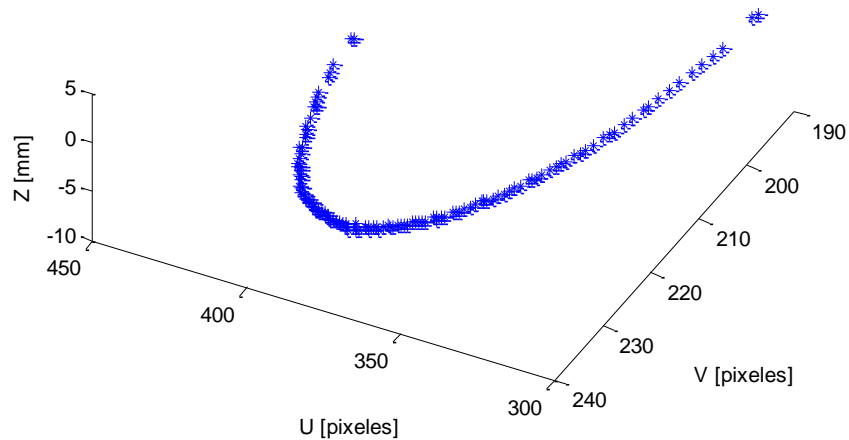
La Figura 29 muestra una imagen adquirida de la línea láser y la Figura 30 muestra la reconstrucción tridimensional empleando la curva de calibración.

Figura 29. Imagen de un objeto con contorno circular con la única iluminación de la línea láser.



Fuente: Autor.

Figura 30. Reconstrucción tridimensional para una cámara de un objeto con contorno circular.



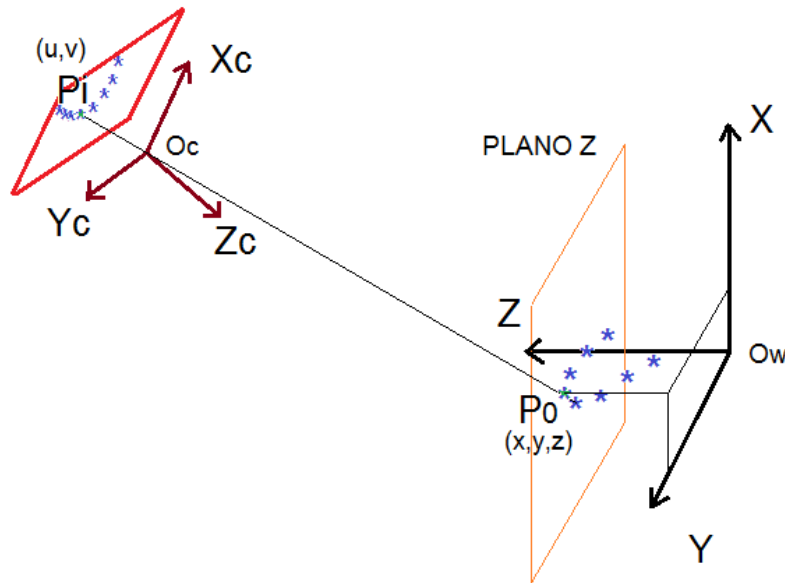
Fuente: Autor.

Se obtiene una imagen similar para cada una de las cámaras, sin embargo con los datos hasta ahora obtenidos no es posible establecer la reconstrucción tridimensional completa, ya que cada reconstrucción tridimensional se hace por separado con sus propios sistemas coordenados independientes.

3.2.3.1. Conversión de píxeles a milímetros

La imagen obtenida de reconstrucción tridimensional por cada cámara tiene coordenadas z en milímetros y coordenadas (u,v) en píxeles. Es necesario convertir los píxeles (u,v) del plano imagen de la cámara a milímetros en (x,y) en el espacio del objeto.

Figura 31. Sistemas coordenados del objeto y de la cámara para puntos en el espacio y su proyección en el plano imagen.

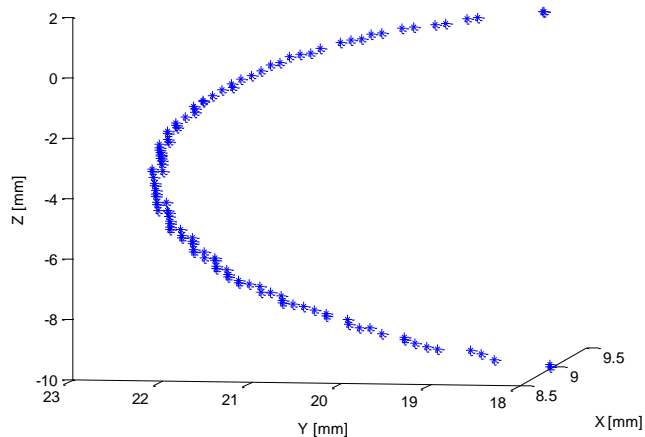


Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta la Figura 31 y conociendo los coeficientes k_c de la distorsión radial y tangencial y las coordenadas (u,v) distorsionadas, se calculan las coordenadas en píxeles del punto no distorsionado que se convierten en coordenadas normalizadas (x_n, y_n) . De esta manera, la línea $(\overline{O_c, P_0})$ se conoce espacialmente. Para el punto P_0 también se conoce la coordenada z que define el plano mostrado en la figura con la coordenada z del punto P_0 calculado con la curva de calibración. La intersección de la línea con el plano permite calcular las

coordenadas (x,y) en milímetros. La Figura 32 muestra la reconstrucción tridimensional para la cámara 1 de la imagen mostrada en la Figura 29.

Figura 32. Reconstrucción tridimensional para una cámara de un objeto con contorno circular con todas sus coordenadas en milímetros.



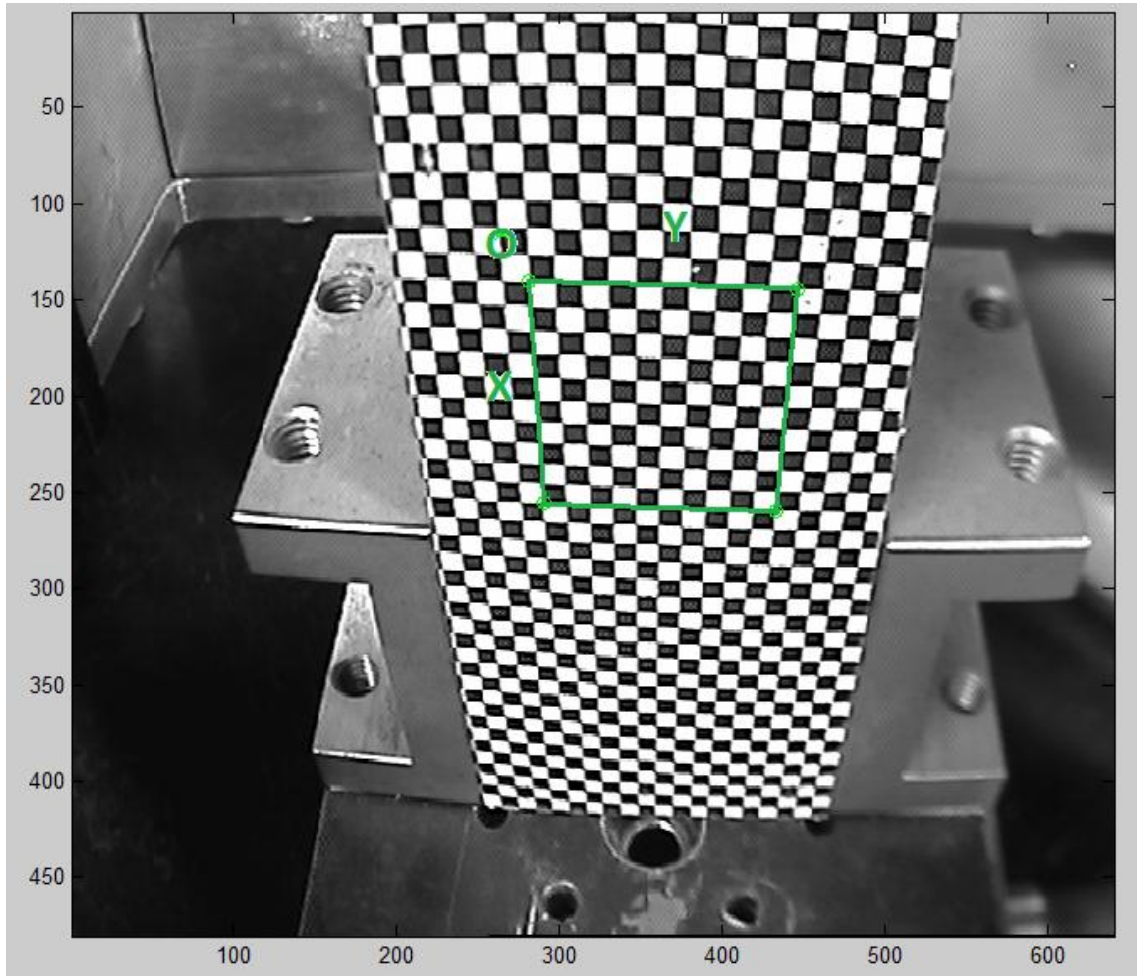
Fuente: Autor.

3.2.4. Unificación del sistema coordenado

Cada reconstrucción tridimensional que se obtiene de cada cámara tiene sistemas coordenados (X,Y,Z) independientes. Con el fin de obtener una única sección transversal completa se debe hacer un proceso de conversión de sistemas coordenados. Se define el sistema coordenado de reconstrucción de la cámara 1 como sistema coordenado global; se deben buscar las ecuaciones de transformación de los sistemas coordenados de reconstrucción de las cámaras 2, 3 y 4 al sistema coordenado de la cámara 1. Los sistemas coordenados de las cámaras 2, 3 y 4 se fijaron ubicando el tablero de ajedrez sobre una platina de rotación de resolución 1' (un minuto de arco) y rotando secuencialmente 90°. Es decir, se sabe que entre sistemas coordenados hay 90° de rotación pero no se conoce la ubicación del eje de rotación de la platina en el sistema coordenado de la cámara 1. El siguiente procedimiento permite determinar el eje de rotación en el

sistema coordinado de la cámara 1. La Figura 33 muestra el tablero de ajedrez en posición angular $\theta=0^\circ$ visto por la cámara 1. Esta posición corresponde a la misma posición que sirvió para definir el sistema coordinado de reconstrucción de la cámara 1 (Figura 22).

Figura 33. Selección de la cuadrícula para hallar el eje de rotación.

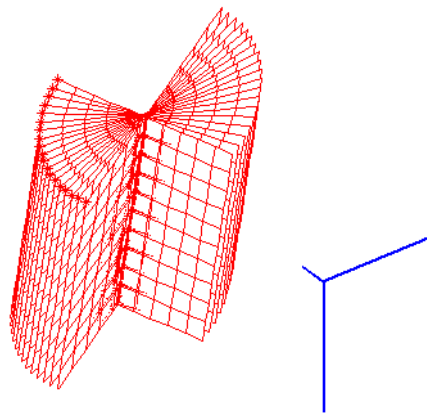


Fuente: Autor.

Se toman secuencialmente imágenes variando θ entre -45° y 45° cada 5° y se hace un proceso de búsqueda de puntos de control de la región de cuadros indicada en el rectángulo verde de la Figura 33, de esta manera se tiene el mismo origen O en cada imagen. Como se conocen los parámetros extrínsecos y

sabiendo que el sistema coordenado de la cámara no cambia, se calculan las coordenadas tridimensionales de cada punto de control en cada imagen. La Figura 34 muestra la totalidad de puntos encontrados en el espacio tridimensional del sistema coordenado de la cámara 1. Se observa que existe un eje de rotación que corresponde al eje de rotación de la platina rotatoria.

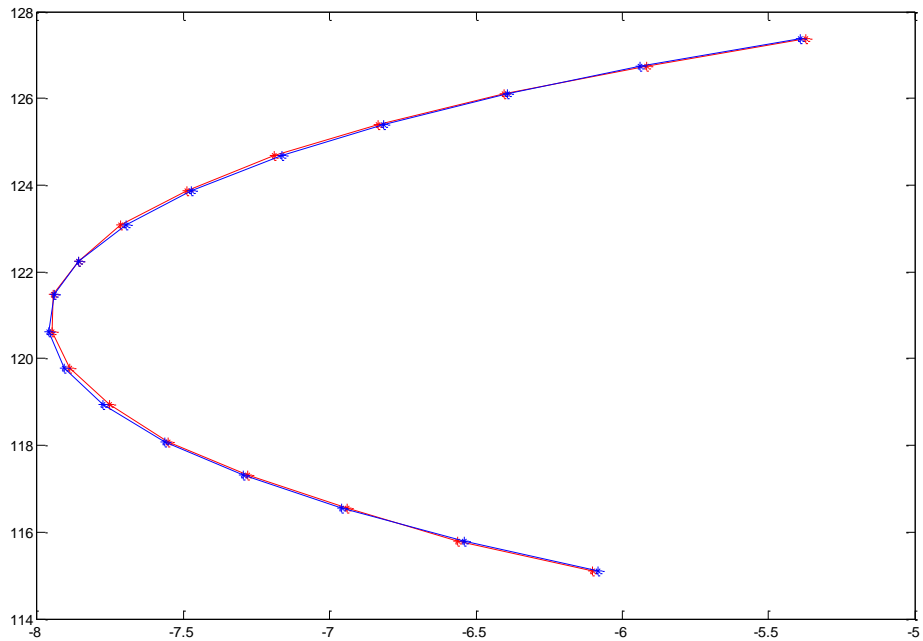
Figura 34. Gráfica de todas las esquinas halladas en el cuadro seleccionado para todas las imágenes de rotación.



Fuente: Autor.

Se observa de igual forma que el mismo punto en cada imagen define un círculo, como se muestra en la Figura 35. A cada círculo se le realiza un ajuste por mínimos cuadrados para determinar las coordenadas del centro (x_0, y_0, z_0) y el radio R_0 .

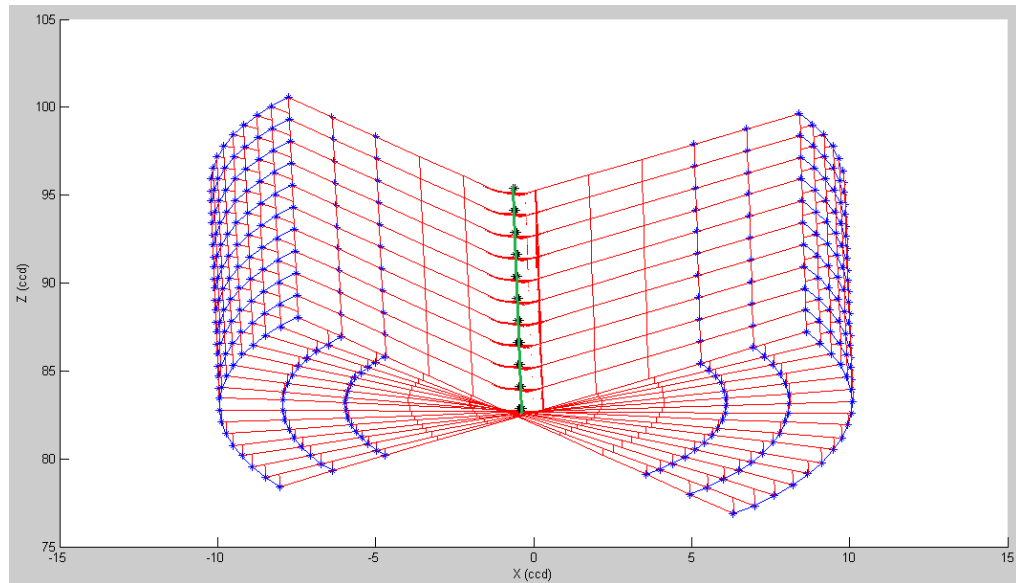
Figura 35. Circunferencia establecida para el mismo punto rotado.



Fuente: Autor.

Repitiendo el proceso para cada punto se encuentran todos los centros que deben pasar por el eje de rotación. La Figura 36 muestra en verde la línea interpolada de los centros, calculados de los puntos que definen círculos mostrados en las líneas azules. De esta manera se calcula la ecuación de la línea que define el eje de rotación en el sistema coordenado de la cámara $O_C (X_C, Y_C, Z_C)$ de la cámara 1. Como se conocen los parámetros extrínsecos de la cámara 1, la ecuación de la línea recta que define el eje de rotación se transforma al sistema coordenado de reconstrucción tridimensional de la cámara 1.

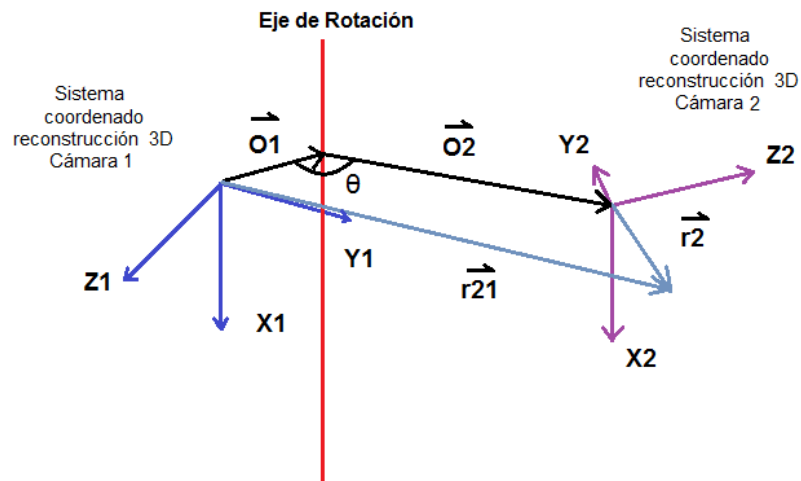
Figura 36. Cálculo del eje de rotación con todas las esquinas halladas en todas las imágenes tomadas para el cuadro seleccionado.



Fuente: Autor.

La Figura 37 muestra el proceso de conversión de un sistema coordenado rotado un ángulo θ al sistema coordenado de la cámara 1.

Figura 37. Sistema coordenado rotado un ángulo θ con respecto al sistema coordenado 1.



Fuente: Autor.

El vector \vec{O}_1 se conoce y corresponde a la distancia más corta entre el origen del sistema coordenado de la cámara 1 y el eje de rotación. El vector \vec{O}_2 se puede calcular ya que se conoce θ y la distancia al eje de rotación es la misma, luego $\vec{O}_1 + \vec{O}_2$ es el vector posición entre los dos ejes coordenados. El vector \vec{r}_2 (x,y,z) es conocido y coincide con las coordenadas de reconstrucción tridimensional calculado con la cámara 2, luego este vector en las coordenadas del sistema coordenado de la cámara 1, serían:

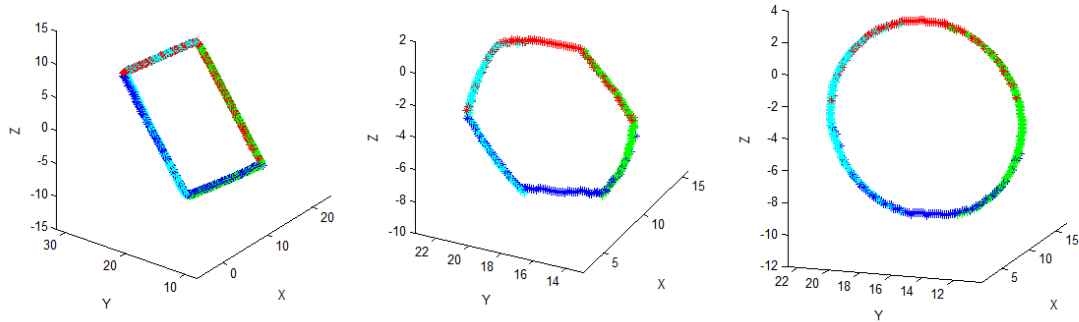
$$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 + \vec{O}_1 + \vec{O}_2 \quad (39)$$

De esta manera para valores de $\theta = 90^\circ$, 180° y 270° y con la reconstrucción tridimensional de cada cámara, se obtiene un único sistema coordenado del corte transversal del objeto reconstruido.

3.2.5. Reconstrucción tridimensional

Teniendo todos los datos es posible establecer los puntos que describen el contorno del objeto y ubicarlos en un mismo sistema coordenado usando el procedimiento anterior. La figura siguiente muestra los contornos de algunos objetos reconstruidos. El análisis de error de la reconstrucción tridimensional completa, se presenta en el capítulo 4.

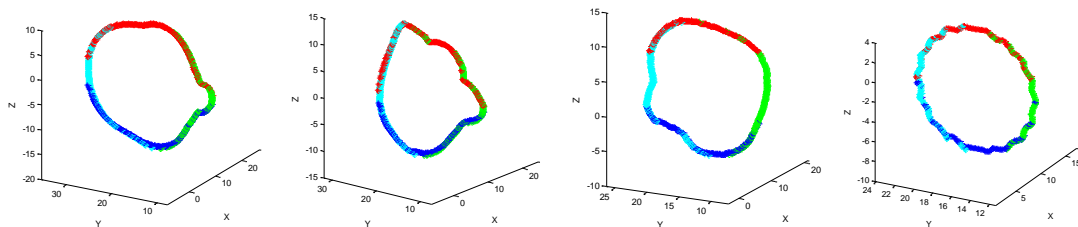
Figura 38. Reconstrucción tridimensional del contorno de diferentes objetos con sección transversal rectangular, hexagonal y circular.



Fuente: Autor.

Para establecer la versatilidad del sistema se tomaron otros objetos para reconstruir:

Figura 39. Reconstrucción tridimensional del contorno de diferentes objetos.



Fuente: Autor.

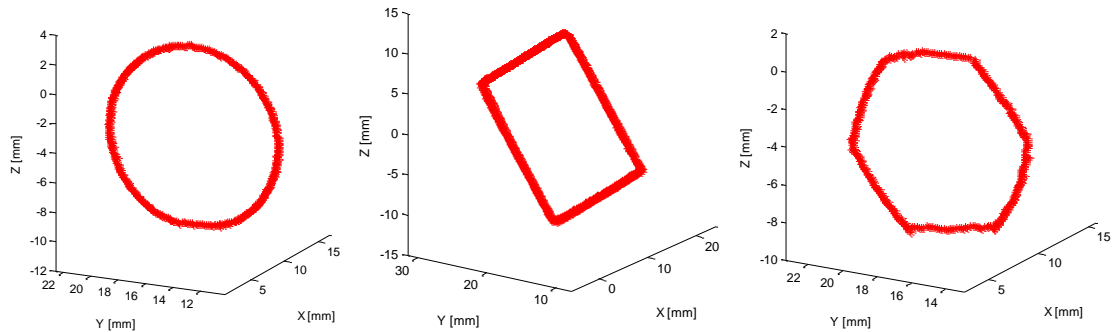
Los últimos objetos fueron reconstruidos como antesala a futuros trabajos en los cuales se desee reconstruir el contorno de superficies, los cuales no sean simétricos axialmente y con sistema manual.

4. ANÁLISIS DE ERROR

Al realizar la reconstrucción tridimensional de objetos, los datos obtenidos poseen errores debido a diferentes factores, uno de ellos es debido a que no se eliminan totalmente las aberraciones de las cámaras al momento de realizar la calibración; otro factor de error es el ruido electrónico en la adquisición de imágenes y el ruido coherente generado por el láser, llamado “*speckle*”. Este ruido afecta la distribución de intensidad y dificulta el proceso de determinación de los puntos centrales de la línea láser adquirida. De igual forma el cálculo del eje de rotación para la determinación de las transformaciones de los sistemas coordenados de las cámaras 2, 3 y 4 hacia el sistema coordenado de la cámara 1, son afectadas por el ruido electrónico de adquisición de imágenes y su influencia en el cálculo de las coordenadas en píxeles de los puntos de control. Esto afecta directamente el grado de empalme entre las diferentes reconstrucciones realizadas por cada cámara.

Tradicionalmente en vez de hacer un análisis del error detallado de cada componente y su propagación a la imagen final [12], se realiza un análisis de error metrológico sobre la reconstrucción 3D de un objeto de dimensiones conocidas y se compara el valor calculado con el valor esperado. Para hacer el análisis de error de los objetos reconstruidos, se tomaron las medidas físicas del objeto a reconstruir, luego se reconstruyó la figura esperada en forma digital y se compararon sus diferencias. Se tomaron en consideración para el análisis de error los objetos cuyo contorno son un círculo, un rectángulo y un hexágono de dimensiones conocidas, los datos obtenidos y graficados se pueden observar en la Figura 40.

Figura 40. Reconstrucción de diferentes objetos (contorno circular, rectangular y hexagonal)



Fuente: Autor.

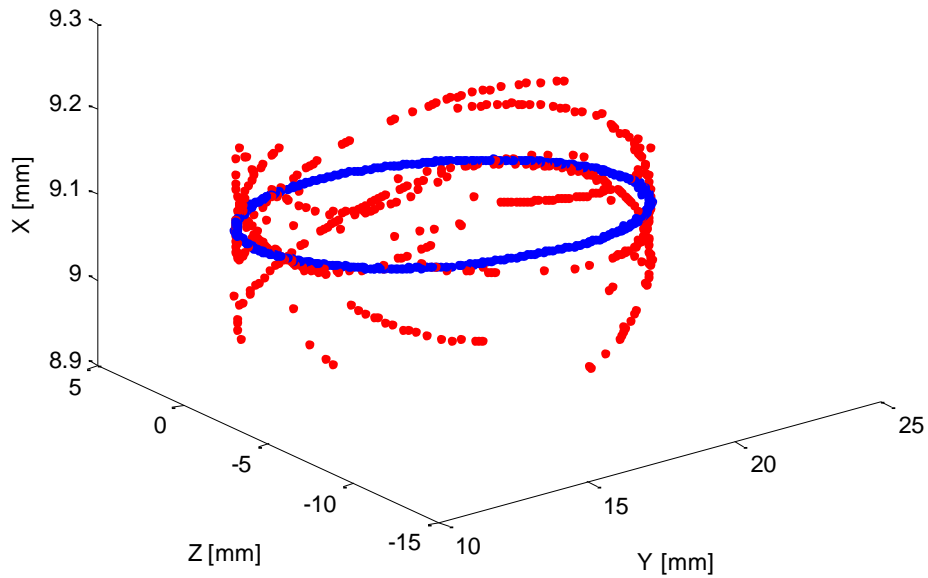
Las medidas de las figuras que se calcularon con un calibrador fueron:

1. Objeto con contorno circular:
Diámetro: 1.190 ± 0.05 mm.
2. Objeto con contorno rectangular:
Lados: 1.845 ± 0.05 mm X 1.530 ± 0.05 mm.
3. Objeto con contorno hexagonal (hexágono regular):
Lado: 0.510 ± 0.05 mm.

Debido a la simetría axial, el análisis de error se realizó determinando el error en dirección axial y el error en dirección transversal. Para la determinación del error axial de los datos de las figuras reconstruidas en tres dimensiones, primero se encuentra el plano que aproxima mejor los datos en el espacio, y luego se proyectan los puntos en el plano hallado. La Figura 41 muestra en rojo los datos 3D encontrados de la sección de un objeto con contorno circular, ampliada en dirección X (ver escala de la figura). En azul se definen las proyecciones de los

puntos 3D encontrados sobre el plano que mejor aproxima en términos de mínimos cuadrados a los datos.

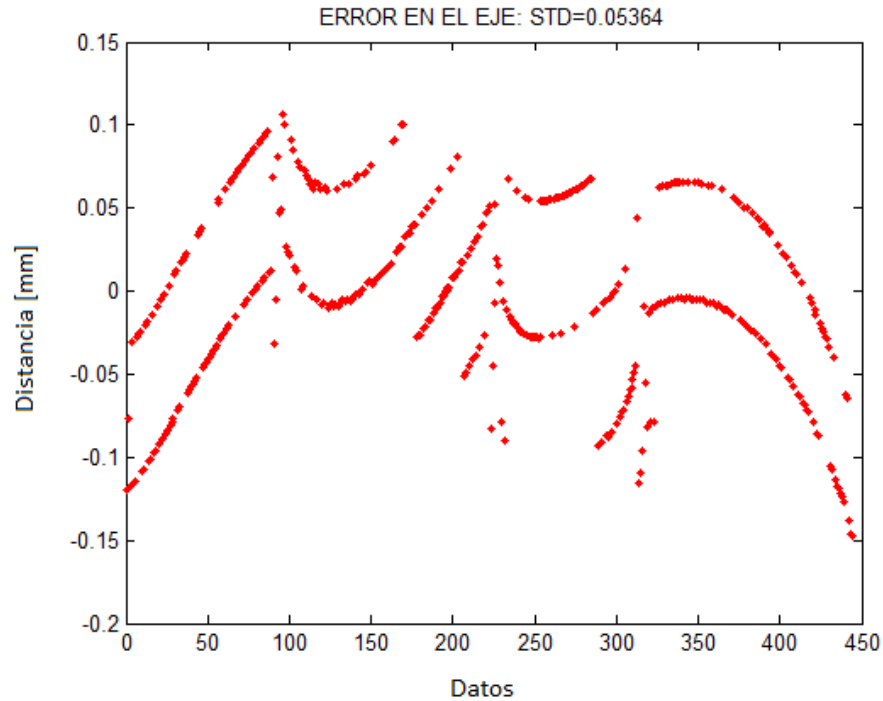
Figura 41. Proyección de los datos de reconstrucción en el plano que mejor los aproxima.



Fuente: Autor.

Se determina el error axial de cada punto como la distancia 3D del punto al plano interpolado. Se obtiene una nube de datos de error mostrada en la Figura 42 para los datos reportados en la Figura 41, donde se determina la desviación estándar de los errores axiales encontrados.

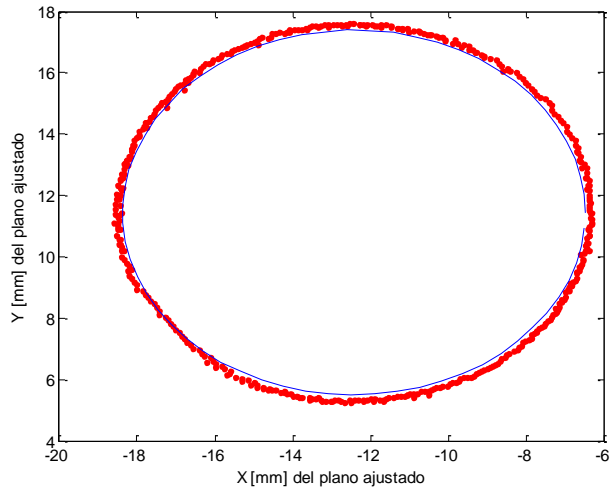
Figura 42. Diferencia de distancia entre los datos hallados y los datos proyectados en el plano para el objeto con contorno circular.



Fuente: Autor.

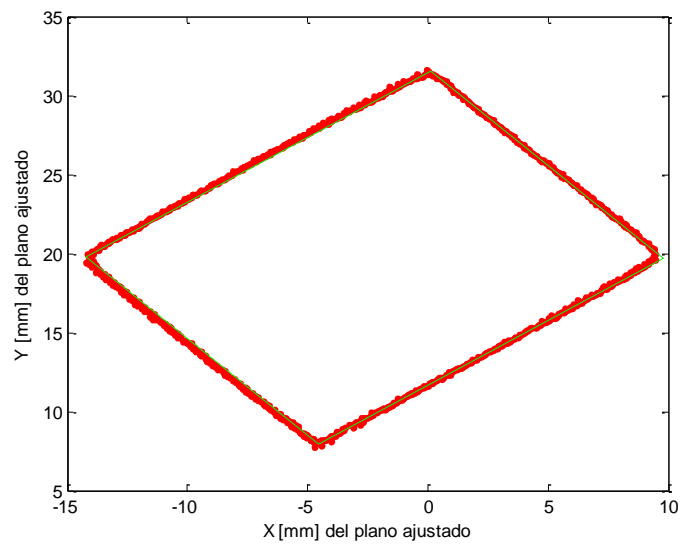
El error transversal se calcula usando las coordenadas de los datos proyectados sobre el plano interpolado y las dimensiones medidas con el calibrador del objeto. Este análisis es bidimensional y se ajusta el contorno esperado del objeto en términos de mínimos cuadrados. Las Figuras 43, 44 y 45 muestran las interpolaciones de los datos 2D obtenidos para los objetos patrones reconstruidos. Las distancias medidas desde el punto 2D al contorno interpolado definen el error transversal para cada punto. La Figura 46 muestra el error transversal para los datos 3D reportados en la Figura 41.

Figura 43. Datos reconstruidos del círculo proyectados en 2D y el círculo mejor aproximado.



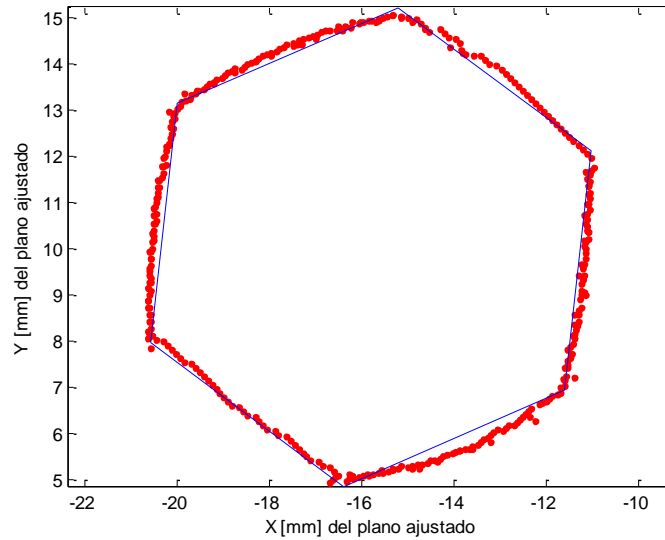
Fuente: Autor.

Figura 44. Datos reconstruidos del rectángulo proyectados en 2D y el rectángulo mejor aproximado.



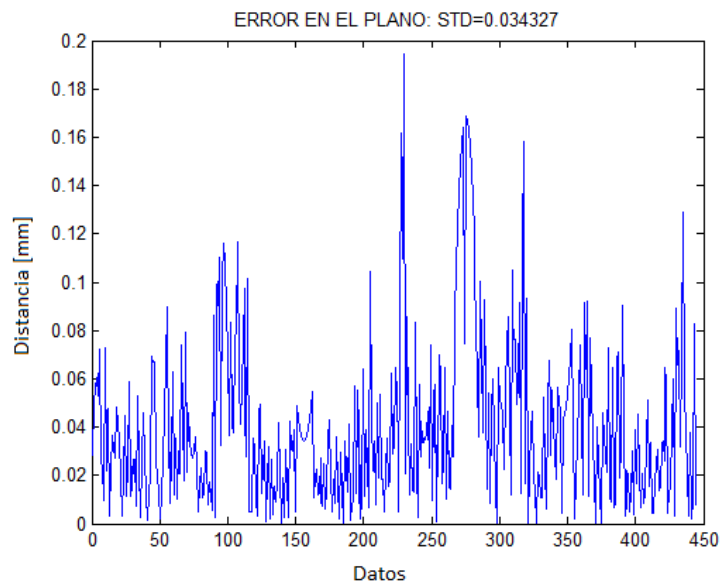
Fuente: Autor.

Figura 45. Datos reconstruidos del hexágono proyectados en 2D y el hexágono mejor aproximado.



Fuente: Autor.

Figura 46. Distancia entre datos proyectados en el plano y la figura ideal a reconstruir para objeto con contorno circular.



Fuente: Autor.

Haciendo el mismo proceso para cada uno de los contornos, se calcularon los errores totales reportados en la Tabla 3.

Tabla 3. Errores de objetos reconstruidos con diferente contorno.

CONTORNO FIGURA	ERROR AXIAL (DESVIACIÓN ESTÁNDAR) [mm]	ERROR TRANSVERSAL (DESVIACIÓN ESTÁNDAR) [mm]	ERROR TOTAL (DESVIACIÓN ESTÁNDAR) [mm]
CIRCULO	0.053640	0.051118	0.046131
RECTANGULO	0.080372	0.095691	0.089067
HEXAGONO	0.052582	0.110750	0.103400

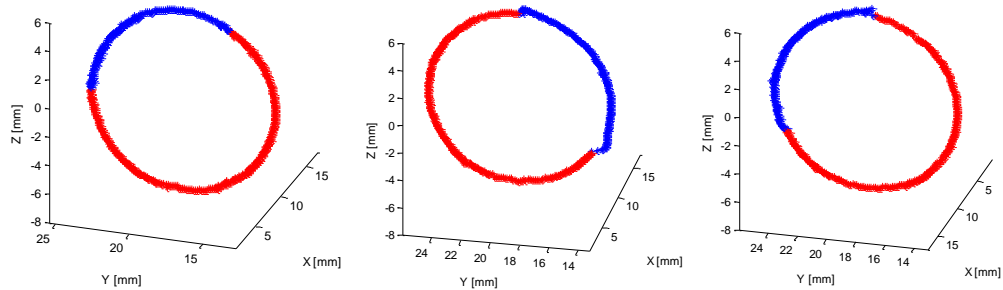
Fuente: Autor.

El error total es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del error axial y el error transversal. El máximo valor de error encontrado en la reconstrucción se comete en el objeto con contorno hexagonal, lo que se esperaba ya que es la figura más pequeña a reconstruir y por lo tanto es más sensible a errores, sin embargo el valor de error es muy pequeño, siendo aproximadamente 100 μm . Es decir el sistema puede medir un contorno en un campo transversal de 22 mm con un error máximo del orden de 100 micras, obteniéndose mejores resultados que el método clásico de proyección por sombras, que mide el diámetro del orden de 20 mm con 150 micras de error.

Para evaluar la eficiencia del sistema para detectar pequeños cambios en el contorno, se tomaron imágenes del objeto de contorno circular con una, dos y tres cintas adheridas y superpuestas en parte de su superficie. La Figura 47 muestra las reconstrucciones 3D del perfil del objeto circular, la región roja corresponde al

contorno circular y la región azul a la reconstrucción de la cinta adherida a la superficie. De izquierda a derecha en la región azul hay superpuesta una, dos y tres pedazos de cinta de igual espesor.

Figura 47. Reconstrucción tridimensional del contorno de un objeto con sección transversal circular con una, dos y tres cintas (azul) respectivamente.



Fuente: Autor.

Los datos de reconstrucción que no corresponden a la cinta, es decir los datos graficados en rojo en la Figura 47, se comparan con un contorno circular interpolado a los datos medidos. Con el contorno circular interpolado se puede establecer el error de la reconstrucción 3D de las cintas y se halla un valor promedio de la diferencia entre el círculo ideal y los datos que representan la(s) cinta(s), para establecer el grosor de ella(s).

La Figura 48, muestra los datos encontrados y el contorno circular interpolado empleando los datos de las regiones rojas, mientras que la Figura 49, muestra los datos correspondientes a la cinta, es decir los datos de las regiones azules. La Tabla 4 muestra el análisis de error encontrado.

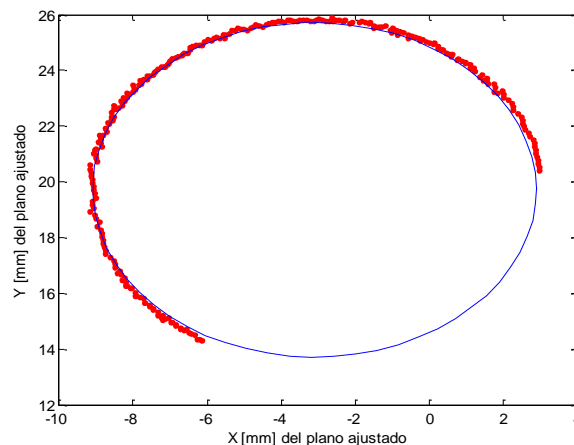
Tabla 4. Valores de error de círculos reconstruidos y valores de grosor de cintas reconstruidas.

CONTORNO CIRCULAR CON N CINTAS	ERROR TOTAL DEL CIRCULO (DESVIACIÓN ESTÁNDAR) [mm]	GROSOR CINTA(S) (VALOR PROMEDIO) [mm]
1 CINTA	0.049304	0.2302
2 CINTAS	0.050758	0.3823
3 CINTAS	0.058390	0.4786

Fuente: Autor.

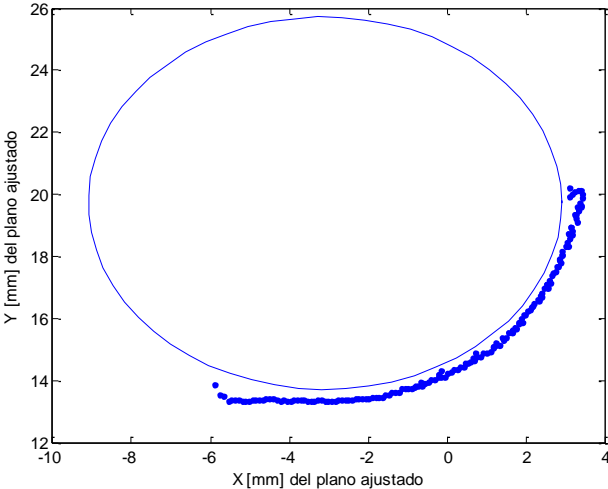
Se puede observar en los valores del grosor aproximado de las cintas, que es detectable el cambio de una pequeña porción en el contorno, el cual ya se podía visualizar en la reconstrucción vista en la Figura 47. Es decir el sistema implementado es capaz fácilmente de medir una alteración del contorno del objeto del orden de 230 micras, lo cual es razonable ya que el error total encontrado en el análisis anterior es del orden de 100 micras.

Figura 48. Datos reconstruidos proyectados en 2D de la región del contorno circular del objeto (ignorando datos de la cinta) y el círculo mejor aproximado del contorno real.



Fuente: Autor.

Figura 49. Datos reconstruidos proyectados en 2D de la región de la cinta y el círculo mejor aproximado del contorno real.



Fuente: Autor.

5. CONCLUSIONES

- Se implementó un procedimiento para la reconstrucción tridimensional del contorno de un objeto con simetría axial, a partir del método de triangulación láser en un sistema con cuatro cámaras a 90° , cubriendo los 360° del contorno, con error total del orden de los $100\ \mu\text{m}$ para un campo de exploración de $22 \times 22\ \text{mm}$.
- La presencia de cambios en el contorno del orden de 230 micras es fácilmente detectable y medible por el sistema.
- El método experimental de calibración del láser que da como resultado la altura de los puntos en el espacio a partir de imágenes bidimensionales disminuye la dificultad de calcularlas a partir de ecuaciones, dando como resultado la descripción de un método sencillo, apropiado y eficaz para próximas investigaciones.
- En el proceso de reconstrucción tridimensional se recurre a la calibración de las cámaras, para hallar los parámetros extrínsecos e intrínsecos del sistema, así como la calibración experimental de la línea láser, permite disminuir las aberraciones y establecer la conversión de píxeles de las imágenes a milímetros. Es importante destacar que se emplearon cámaras de bajo costo para servicio de video en Internet, las cuales tienen una fuerte aberración geométrica, sin embargo, se pueden reemplazar por cámaras CCD USB de mejor rendimiento y con lentes de mejor calidad óptica.

- Se realizó un proceso original de empalme de la reconstrucción tridimensional de las cuatro cámaras, por medio de la unificación de sistemas coordenados para obtener información global del contorno del objeto, basado en la determinación del eje de rotación en el espacio.
- El área escogida de calibración, al tener las menores aberraciones de toda la imagen ayuda a obtener mejores resultados en la reconstrucción tridimensional.

6. PERSPECTIVAS

Se ha demostrado que el método de triangulación láser implementado permite obtener información 3D de la sección transversal de un objeto con simetría axial. Se desea emplear el sistema para hacer la reconstrucción 3D de objetos con forma alargada sin simetría de revolución. Por ejemplo reconstruir un hueso Calcáneo o Fémur para simulaciones 3D de carga axial por elementos finitos. Esto implica que se debe introducir una variante adicional al sistema. O bien se introduce un sistema motorizado que desplace el objeto en dirección perpendicular al plano láser o bien hacer un sistema portable a manos libres. Estas opciones corresponden a las perspectivas de investigación que se generan una vez concluida esta etapa.

BILIOGRAFIA

- [1] GONZALEZ, Rafael; WOODS, Richard and EDDINS, Steven. Digital Image Processing Using MATLAB, Gatesmark Publishing ©, Second Edition. ISBN 978-0-9820854-0-0.
- [2] GONZALES, Rafael; WOODS, Richard. Digital Image Processing, Prentice Hall, Second Edition. ISBN: 0-201-18075-8.
- [3] M.C. ESQUEDA ELIZONDO, José Jaime. Fundamentos de Procesamiento de imágenes. Documentación Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Tijuana.
- [4] VÉLEZ, BELÉN, SÁNCHEZ; Visión por computador, 2da Edición, Documento digital disponible en: <http://www.terra.es/personal/jfvelez/libro2/libro.html> [Fecha de Consulta: 12 de Enero de 2012].
- [5] PÉREZ, Zayra, ROMERO, Lenny: Sistema óptico de reconstrucción tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos. Universidad Industrial de Santander (2004). Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [6] ARZUZA, Johan Alberto. Reconstrucción volumétrica y visualización 3D de estructuras anatómicas a partir de imágenes médicas de tomografía. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander (2006).
- [7] PAJARES MARTINSANZ, Gonzalo; CRUZ GARCÍA, Jesús M. de la, Visión por Computador: Imágenes digitales y aplicaciones. Ra-Ma, Librería y Editorial Microinformática, Primera Edición. ISBN: 8478974725.
- [8] HECHT, Eugene; ZAJAC, Alfred. Óptica. Editorial Pearson, Addison-Wesley, Tercera Edición. ISBN: 8478290257.
- [9] CONTRERAS PICO, Carlos Ricardo. Dispositivo óptico de medida 3-D con simetría cilíndrica: Aplicaciones balística. Tesis de grado.

- [10] MUÑOZ POTOSI, Andrea Fernanda. Diseño e implementación de un dispositivo de explotación tridimensional del pie humano. Tesis de grado. Universidad del Cauca (2009).
- [11] COSTA MANUEL. Surface inspection by an optical triangulation method. Optical engineering, 1996.
- [12] RAMÍREZ ROJAS, Juan Carlos. Reconstrucción tridimensional de la sección transversal de perfiles extruidos utilizando triangulación láser. Tesis de maestría (2011).
- [13] BOUGUET, JEAN-Yves. Computer Vision Group, California Institute of Technology. Disponible en:
http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/htmls/eample.html.
- [14] ROMERO PÉREZ, Lenny Alexandra. Sistema de Reconstrucción tridimensional para el análisis dinámico de un cuerpo: Estudio cuantitativo del vulcanismo de lodo.
- [15] PÉREZ GUZMAN, Zayra Milena. Aproximación espacio-temporal para la medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas.
- [16] BARRERA, Manuel; TORRES Gonzalo. Análisis preliminar de un sistema de reconstrucción tridimensional multi-captor: Aplicaciones médicas e industriales.
- [17] Reconstrucción tridimensional de escenas con un par estereoscópico de cámaras. Documento digital disponible en:
<http://www.ceiafac.es/actividades/jornadas/XXVIII/documentos/1681-CalibProyectivaJA07.pdf> [Fecha de Consulta: 12 de Enero de 2012].