

**DISPOSITIVO ÓPTICO DE MEDIDA 3-D CON SIMETRÍA CILÍNDRICA:
APLICACIONES EN BALÍSTICA**

CARLOS RICARDO CONTRERAS PICO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2006**

**DISPOSITIVO ÓPTICO DE MEDIDA 3-D CON SIMETRÍA CILÍNDRICA:
APLICACIONES EN BALÍSTICA**

CARLOS RICARDO CONTRERAS PICO

Trabajo de grado para optar el título de
Físico

Director
Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2006

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos:

- Al Dr. Jaime Meneses por su paciencia, orientación y apoyo en la realización de este proyecto y por todos los conocimientos impartidos.
- A todos mis compañeros y profesores del Grupo de Óptica y tratamiento de Señales.
- A mi familia por el gran apoyo recibido durante toda mi carrera.
- A todas las personas que de alguna u otra forma contribuyeron al logro de mis objetivos.

Existen en mi vida dos personas muy especiales a quienes quiero dedicar este importante logro, a mis padres queridos, sin su apoyo incondicional nada de esto hubiese sido posible. De todo corazón quiere agradecerles por dedicar gran parte de sus vidas a mi formación.

A mi hermano Cesar por su compañía y apoyo.

A la persona que ha estado a mi lado desde el comienzo de mi carrera, su compañía y apoyo me han llenado de valor para vencer las adversidades. Gracias Diana Liceth por caminar junto a mí por el camino de la vida.

Ricardo

TÍTULO: DISPOSITIVO ÓPTICO DE MEDIDA 3-D CON SIMETRÍA CILÍNDRICA: APLICACIONES EN BALÍSTICA *

AUTOR: CARLOS RICARDO CONTRERAS PICO **

PALABRAS CLAVES: Dispositivo óptico, reconstrucción 3-D a 360° de observación, triangulación láser, análisis cuantitativos, Balística.

RESUMEN: Se diseñó y construyó un dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de objetos con simetría cilíndrica, utilizando la técnica de triangulación láser lineal; con una aplicación directa en Balística Interior. En el método de triangulación láser, una línea láser se proyecta sobre la superficie del objeto de estudio y a partir de la deformación de dicha línea es posible codificar las variaciones topográficas presentes en la superficie del objeto a reconstruir.

El dispositivo está formado por los siguientes módulos: Sistema de proyección, el cual se utiliza para proyectar una línea láser sobre la superficie del objeto; un sistema de adquisición del cual hacen parte una cámara CCD y una tarjeta digitalizadora de imágenes y un computador, en el que se registran las imágenes de la línea láser deformada sobre la superficie de las muestras estudiadas, se realiza el tratamiento digital de la mismas, y su posterior análisis 3-D.

El dispositivo fue evaluado utilizando objetos de dimensiones conocidas. Análisis cuantitativos a las estrías sobre la superficie de balas disparadas con armas de fuego son mostrados y discutidos; por último se muestra que el sistema puede ser utilizado para realizar análisis cuantitativos a las huellas impresas por la aguja percutora sobre la vainilla de un proyectil justo después de efectuarse un disparo.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca (Director)

TITLE: OPTIC DEVICE OF 3-D MEASUREMENT WITH CILYNDRICAL SYMMETRY:
BALLISTIC APLICATIONS *

AUTHOR: CARLOS RICARDO CONTRERAS PICO **

KEYWORDS: Optic device, 3-D reconstruction to 360° observation, laser triangulation, quantitative analysis, Ballistic.

ABSTRACT : It was developed a optic device for tridimensional reconstruction of objects with cilyndrical simmetry, using lineal laser triangulation method; with an aplication in Interior Ballistic. In the triangulation laser method a laser line is projected on surface of the studied object and starting of abovementioned line is possible to encode the topographical variations presents in the surface of the object to reconstruct. Device is formed for the following modulars: Projection system, it is utilized for to project a laser line on the surface of the object, an acquisition system to consist of a CCD camera and a image digitize card and a computer, in this system are registered the images of the line laser deformed on the surface of the estudied samples, it is made the digital analysis to abovementioned images, and your 3-D analysis subsequent.

Device was evaluated using objects of know sizes. Quantitative analysis to grooves on the surface of bullets shot out with firearms are showed and discussed; finally it is showed that the device can be utilized for to carry out quantitative analysis to the mark impress for the hammer on the cartridge case of a projectile just later that the firearm is shot out.

* Undergraduate final project

** Faculty of Sciences, Physics School, Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca (Director)

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO 1	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 CLASIFICACIÓN DE LA BALÍSTICA FORENSE	3
1.2.1 Balística Interior	3
1.2.2 Balística Exterior	3
1.2.3 Balística de Efectos	3
CAPÍTULO 2	7
2.1 INTRODUCCIÓN	7
2.2 CONCEPTOS GENERALES	7
2.3 TRIANGULACIÓN LÁSER LINEAL	10
2.3.1 Pre-Procesamiento de las imágenes adquiridas	13
2.3.2 Extracción de los valores x_c a partir de las imágenes adquiridas	14
2.3.3 Procedimiento de Calibración Experimental	15
2.4 SISTEMA ÓPTICO DE TRIANGULACIÓN LÁSER IMPLEMENTADO	17
2.4.1 Sistema de proyección	18
2.4.2 Sistema de observación	18
2.4.3 Sistema de control, adquisición y procesamiento de imágenes	18
2.4.4 Calibración X-Y del sistema de adquisición	18
2.4.5 Procedimiento experimental de calibración	19
2.4.6 Reconstrucción tridimensional	19
CAPÍTULO 3	21
3.1 INTRODUCCIÓN	21
3.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE OBJETOS CON SIMETRÍA CILÍNDRICA	22
CAPÍTULO 4	27
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA	27
4.1.1 Precisión	27
4.2 ANÁLISIS PRELIMINAR A LAS MUESTRAS DUBITADAS	28
4.3 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LAS BALAS	29
4.4 ANÁLISIS CUANTITATIVOS DE LAS ESTRÍAS	30
CONCLUSIONES	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Partes de un proyectil	4
Figura 2. Cotejo balístico utilizando un microscopio criminológico de comparación	5
Figura 3. Estrías sobre la superficie de una bala	5
Figura 4. Codificación de la coordenada Z	7
Figura 5. Sistema óptico de reconstrucción 3-D	8
Figura 6. Sistema óptico de triangulación láser lineal	11
Figura 7. Principio de codificación de la altura	11
Figura 8. Módulo de luz estructurada	12
Figura 9. Punto de intersección de las rectas 1 y 2	13
Figura 10. Tratamiento digital a una imagen adquirida	14
Figura 11. Extracción de los valores x_c	14
Figura 12. Posición de un punto P de la imagen con respecto al centro del captor	15
Figura 13. Línea láser sobre la superficie de un objeto plano	16
Figura 14. Eliminación de speckle para $Z=0$	16
Figura 15. Plano de calibración	17
Figura 16. Región de calibración en la CCD	17
Figura 17. Espejo plano	18
Figura 18. Imágenes de una red de difracción	19
Figura 19. Sección 1	20
Figura 20. Sección 2	20
Figura 21. Montaje experimental para reconstruir objetos con simetría cilíndrica	21
Figura 22. Cambio de coordenadas rectangulares a coordenadas cilíndricas	22
Figura 23. Sistema de rotación y sistema de calibración	23
Figura 24. Vista superior de dos ensambles realizados	25
Figura 25. Reconstrucción 3-D de un objeto cilíndrico	26
Figura 26. Objeto para verificar la resolución del sistema	27
Figura 27. Reconstrucción 3-D de un objeto para verificar la resolución del sistema	28
Figura 28. Zona útil de cotejo de una bala	29
Figura 29. Reconstrucción tridimensional del cuerpo cilíndrico de la bala 2	29
Figura 30. Reconstrucción tridimensional de una sección de la bala 2	30
Figura 31. Imagen bidimensional del cuerpo cilíndrico de la bala 2	31
Figura 32. Puntos sobre la superficie de la bala en coordenadas polares	32
Figura 33. Reconstrucción tridimensional para una de las estrías	33
Figura 34. Reconstrucción tridimensional de la parte inferior de una vainilla	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los métodos ópticos comúnmente usados	9
Tabla 2. Análisis preliminar de las muestras	28
Tabla 3. Profundidad promedio para las estrías de la bala 2	33
Tabla 4. Características medidas sobre la superficie de la bala 2	34

INTRODUCCIÓN GENERAL

Obtener la reconstrucción tridimensional de un objeto y realizar estudios detallados a su topografía es de gran importancia en campos como la medicina, la industria, la robótica, entre otros. En dichos campos para algunas aplicaciones metroológicas específicas resulta difícil estudiar la topografía de un objeto utilizando métodos de contacto, en los cuales un dispositivo de desplazamiento calibrado se desliza sobre la superficie manteniendo el contacto. La reconstrucción tridimensional de objetos por medio de métodos ópticos es una herramienta muy útil en metrología debido al amplio rango de campos de observación, resolución y precisión ajustables a las necesidades metroológicas y no se requiere de contacto mecánico con la superficie, principalmente. Aunque en el mercado se encuentran dispositivos de medida tridimensional por vía óptica, estos sistemas están diseñados para analizar objetos de dimensiones fijas y el software de exploración de datos tridimensionales permite obtener ciertas variables. La mayoría de estos dispositivos especializados se basan en triangulación láser y proyección de franjas. Tradicionalmente en el método de triangulación láser el objeto se reconstruye utilizando un sistema coordinado rectangular. Poca información se conoce de dispositivos de reconstrucción tridimensional por triangulación láser que permita analizar objetos con simetría primordialmente cilíndrica a 360° de reconstrucción. El presente trabajo se centra en la implementación de un dispositivo óptico de reconstrucción tridimensional para objetos con simetría cilíndrica. La motivación inicial de construir un dispositivo preliminar de estas características es la de plantear una alternativa más exacta a la exploración superficial de balas disparadas con armas de fuego, análisis realizados en balística.

El presente trabajo se distribuye de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presentan algunos conceptos de Balística y se describe el método tradicional basado en la comparación visual, utilizado para realizar cotejos balísticos. En este capítulo se plantea la necesidad de diseñar una técnica de medida 3-D que permita realizar análisis cuantitativos más precisos a la topografía de balas disparadas con armas de fuego.

En el segundo capítulo se presentan algunos conceptos de reconstrucción 3-D y se describen algunos métodos ópticos. Se hace un análisis detallado de la técnica tradicional de triangulación láser lineal y se explican las etapas necesarias para su implementación. Un análisis detallado de la codificación de la topografía del cuerpo

permite establecer un procedimiento de calibración para recuperar la topografía del cuerpo en milímetros.

En el tercer capítulo se describe el procedimiento a seguir para implementar la técnica de triangulación láser lineal en objetos con simetría cilíndrica. Se describe la forma de realizar la reconstrucción tridimensional de un objeto a 360° de observación partiendo de la reconstrucción 3-D de varias secciones del mismo.

En el cuarto capítulo se muestra el desarrollo experimental del sistema implementado. Se realiza un análisis de la precisión y resolución del sistema. Finalmente se plantean las perspectivas de continuación de este trabajo a fin de utilizar el sistema implementado en el estudio de la topografía de las vainillas de los proyectiles disparados con armas de fuego, principalmente.

1. BALÍSTICA FORENSE

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el planteamiento del problema. Se da una visión general sobre Balística Forense y se menciona la técnica implementada actualmente en nuestro país para realizar cotejos balísticos.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LA BALÍSTICA FORENSE

Desde el punto de vista de la Física, la Balística es la ciencia que trata sobre los fenómenos que afectan el movimiento de los proyectiles en el espacio y la trayectoria que describen los mismos, siendo posible determinar su dirección y su alcance. Desde el punto de vista forense la Balística es la ciencia y arte que estudia las armas de fuego, el alcance y dirección de los proyectiles que disparan y los efectos que producen [1]. La Balística Forense, es decir la aplicada a la solución de problemas judiciales se clasifica en tres partes:

1.2.1 Balística Interior:

Es la parte de la Balística que se ocupa del estudio de los fenómenos que se producen en el arma a partir del momento que la aguja percutora golpea el fulminante del cartucho y alcanza hasta el momento mismo en que el proyectil abandona la boca de fuego del cañón. Esta parte de la Balística se ocupa también de todo lo relativo a armas de fuego, su estructura, mecanismos, funcionamiento, carga y disparo de la misma.

1.2.2 Balística Exterior:

A esta parte de la Balística le corresponde el estudio de la trayectoria del proyectil, desde el momento en que abandona la boca del cañón del arma hasta su arribo al blanco, y de los fenómenos que lo afectan en concordancia con las particularidades de cada caso, tales como la gravedad, la resistencia del aire, la influencia de la dirección e intensidad de los vientos y particularmente los obstáculos que se le impongan y que en definitiva son productores de los rebotes que modifican las trayectoria original.

1.2.3 Balística de Efectos:

Tal como su nombre lo indica, esta parte de la Balística estudia los efectos producidos por el proyectil en el blanco alcanzado, particularmente las características del orificio de entrada (OE) causado por el proyectil y la zona inmediata que lo rodea, características éstas que permitirán establecer importantes elementos que avalarán

conclusiones relativas a problemas tan complejos como la determinación de la distancia de disparo.

En la actualidad la balística se ha convertido en una ciencia de gran importancia para el esclarecimiento de los crímenes que han sido perpetrados con armas de fuego. Para las instituciones competentes es necesario que estos crímenes sean estudiados con la mayor precisión posible, ya que puede estar en juego la libertad de una persona inocente. En los laboratorios de criminalística del país los cotejos balísticos son realizados analizando dos tipos de marcas que aparecen en vainilla y bala justo después de efectuarse el disparo; las primeras quedan en la vainilla inmediatamente después que la aguja percutora impacta sobre ella y las segundas sobre la superficie de las balas en el momento que ellas pasan por el ánima del cañón (ver Figura 1).



Figura 1. Partes de un proyectil.

En este trabajo el análisis se realiza al segundo tipo de marcas, denominadas estrías, las cuales son evaluadas tradicionalmente por medio de un microscopio criminológico de comparación (ver Figura 2), en el cual se realiza una comparación entre las muestras indubitadas y las muestras dubitadas a través de una inspección visual. Las muestras “dubitadas” o “incriminadas” son las balas y vainillas implicadas en el suceso criminal que se investiga y las muestras “indubitadas” o “testigos” son las balas y vainillas obtenidas por el experto utilizando el arma sospechosa. También existe una técnica en la cual los análisis se realizan por medio de tratamiento digital de imágenes [5], esta técnica permite evaluar características cuantificables en imágenes de balas dubitadas y por medio de ellas estimar el grado de similitud entre dos balas.

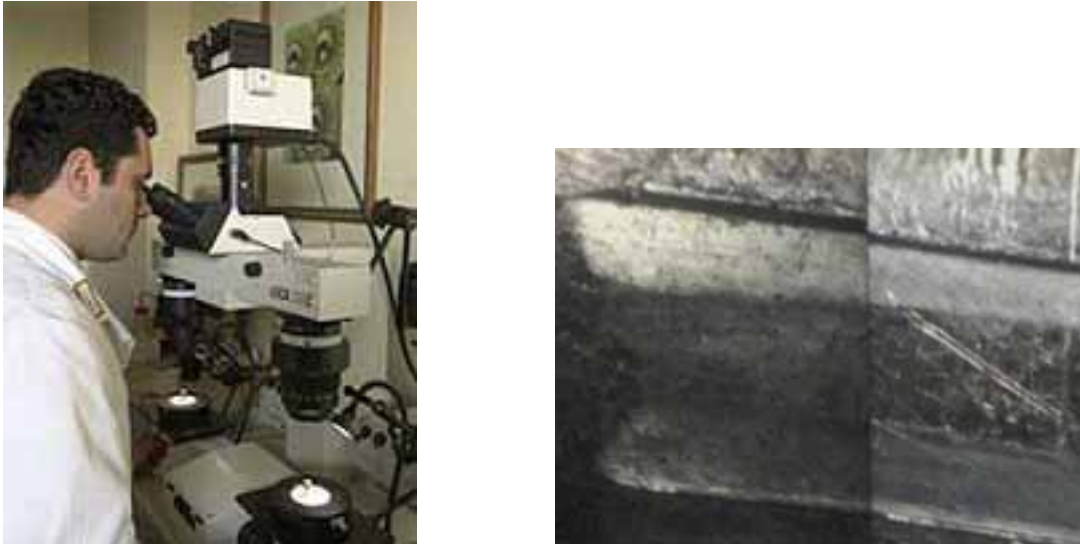


Figura 2. Cotejo balístico utilizando un microscopio criminológico de comparación. La imagen de la derecha muestra la superposición de las imágenes de dos proyectiles.

Por otra parte las estrías (ver Figura 3) sobre la superficie de las balas presentan las siguientes características:



Figura 3. Estrías sobre la superficie de una bala.

- Número total sobre la superficie de la bala.
- Orientación: Con respecto al eje longitudinal, la orientación de las estrías puede ser dextrógira si la estría está orientada a la derecha y levógira si la estría está orientada a la izquierda.
- Profundidad promedio.
- Paso: Distancia angular entre dos estrías.
- Ángulo de torsión: Ángulo que forma la estría con el eje longitudinal de la bala.

Debido a que la evaluación de estas características se basa en una inspección visual se introduce un error al momento de examinar las muestras dubitadas, además por medio de las técnicas existentes para realizar cotejos balísticos no es posible medir la profundidad de las estrías.

Por lo anterior se hace necesario desarrollar una técnica de medida 3-D, que permita realizar medidas más confiables de la topografía de la superficie de las balas disparadas con armas de fuego. Es este trabajo se realizan estas medidas utilizando la técnica de triangulación láser [6]. En esta técnica se proyecta una línea láser sobre la superficie del objeto y por medio de la deformación de esta línea es posible realizar la reconstrucción 3D de dicho objeto. No se pretende cambiar los métodos tradicionales de cotejos balísticos sino presentar una alternativa que reporte valores más confiables con el fin de reducir el error de la medida.

De esta manera, en el presente trabajo se fundamenta la elaboración y caracterización de un sistema de reconstrucción tridimensional basado en la técnica de triangulación láser lineal, para el análisis topográfico de la superficie externa de balas disparadas con armas de fuego. La evaluación experimental del sistema implementado se basa en la reconstrucción tridimensional de objetos de forma conocida y en la evaluación cuantitativa de las estrías presentes en la superficie de balas disparadas con armas de fuego.

En las secciones siguientes se presentarán los conceptos básicos necesarios para la elaboración experimental del sistema de medida tridimensional. Se mostrarán los procedimientos de reconstrucción tridimensional de un objeto y la caracterización del sistema. Finalmente se presentará la evaluación experimental del sistema por medio de la evaluación cuantitativa de las estrías presentes en los objetos de estudio (balas dubitadas). En la última sección se presentan las conclusiones finales del trabajo y las posibles perspectivas de investigación.

Tradicionalmente se ha utilizado en nuestro medio la técnica de reconstrucción 3-D por triangulación láser en un sistema coordenado rectangular (X, Y, Z) . El reto presente en este trabajo consiste en buscar las alternativas metodológicas necesarias para adaptar la técnica de reconstrucción 3-D a objetos que poseen simetría cilíndrica. Esto implica realizar una transformación de coordenadas rectangulares (X, Y, Z) a coordenadas cilíndricas (r, θ, Z) . El objetivo de este trabajo no era obtener medidas experimentales de estrías en balas dubitadas, sino generar un dispositivo de medida acorde con la simetría del objeto de estudio. Posteriores análisis permitirán confrontar las medidas que arroja el sistema construido con los valores cuantitativos obtenidos por métodos clásicos.

2. RECONSTRUCCIÓN 3-D POR TRIANGULACIÓN LÁSER LINEAL

2.1 INTRODUCCIÓN

La reconstrucción tridimensional es el proceso mediante el cual objetos son digitalizados en un sistema coordenado (X,Y,Z) , usando métodos que permiten codificar la topografía de los mismos. De esta manera un procedimiento de calibración del sistema permite convertir la secuencia de imágenes adquiridas y tratadas digitalmente, a escala real del objeto. Por esta razón los métodos de reconstrucción tridimensional son una herramienta útil en aplicaciones donde la información topográfica de los objetos de estudio juega un papel importante en la toma de decisiones, como en el caso control de calidad, caracterización tridimensional del rostro humano con fines de reconocimiento facial y otras tantas aplicaciones relacionadas con la medicina e ingeniería.

2.2 CONCEPTOS GENERALES

Para obtener la reconstrucción 3-D de un objeto es necesario codificar la información de la coordenada Z para todos los puntos ubicados sobre su superficie; esto no es posible utilizando los métodos clásicos de formación de imágenes en los cuales un par de puntos que pertenecen al objeto están ubicados en la misma posición dentro de la imagen obtenida. Según la óptica geométrica, puntos del objeto ubicados en el rayo principal, serán proyectados al mismo punto sobre la imagen. Así los puntos P_1 y P_2 de la Figura 4 son proyectados al punto imagen P_i , perdiéndose la información de la coordenada axial o coordenada Z . Con el fin de realizar una reconstrucción tridimensional es necesario codificar la coordenada Z a partir de una variable que se puede medir fácilmente en el plano imagen.

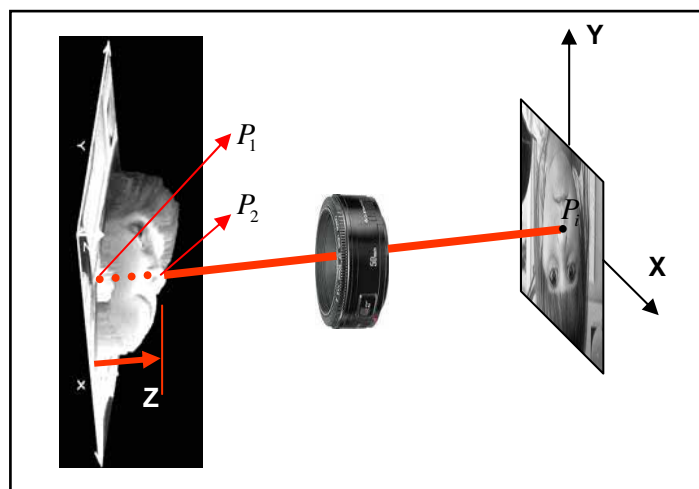


Figura 4. Codificación de la coordenada Z .

Para obtener la codificación de la coordenada Z existen diferentes métodos entre los cuales se encuentran, los de contacto directo, los transmisivos como el ultrasonido y los ópticos. Los métodos ópticos de reconstrucción tridimensional utilizan una variable de naturaleza óptica para codificar la altura de los puntos del cuerpo. Esta variable podría ser: Variación del camino óptico de un haz luminoso, alteración de la fase del frente de onda, corrimiento de la posición en el plano imagen de un punto láser, deformación del paso de un sistema de franjas, etc. Clásicamente estos dispositivos están formados por un sistema de iluminación, un sistema de observación y un sistema de control y tratamiento (ver Figura 5) que permite obtener el objeto digitalizado para realizar estudios metrológicos del mismo. La tabla 1 muestra algunos métodos ópticos utilizados en el diseño de dispositivos de medida 3-D.

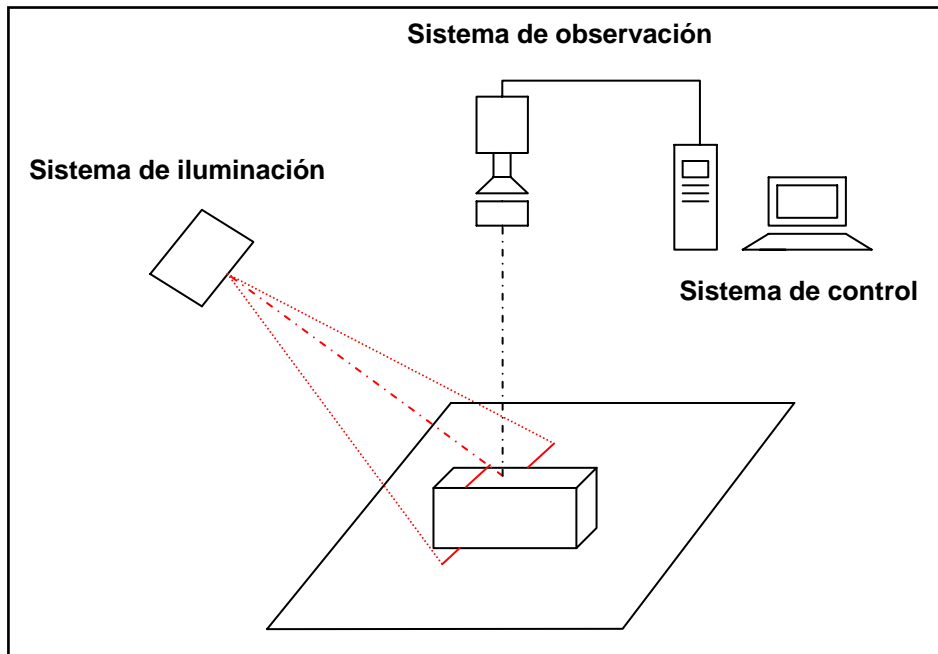


Figura 5. Sistema óptico de reconstrucción 3-D.

CLASIFICACIÓN	MÉTODO	PRINCIPIO DE CODIFICACIÓN	
Luz estructurada	Láser	El patrón puede ser un punto, una línea, múltiples líneas o un patrón definido.	Se basa en triangulación, la altura para cada punto se codifica en el corrimiento del patrón con respecto a un nivel de referencia, este corrimiento se debe a los cambios en la topografía del objeto.
	Binaria	Se utilizan patrones binarios bidimensionales que codifican la información en uno o 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 interferencia 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.		
Visión estéreo	A partir de dos imágenes tomadas a diferentes ángulos, se busca la correspondencia entre características y se halla la profundidad, esto es semejante al sistema binocular humano.		
Shape from shading	La información tridimensional del objeto se encuentra a través del manejo de sombras.		

Tabla 1. Clasificación de los métodos ópticos comúnmente usados.

Debido al reducido costo de los elementos utilizados, campos de observación y resolución variables, los métodos de proyección de franjas [2], código de grises [3] y triangulación láser [4], han sido ampliamente utilizados en el diseño de dispositivos de medida en ambientes médicos e industriales. En el primer método se proyecta un

sistema de franjas sobre la superficie del objeto y se observa la deformación del paso y orientación de las franjas [7]; esta deformación codifica las variaciones de altura que posee el objeto y que son utilizadas para reconstruirlo. En el método de código de grises se proyectan diferentes patrones binarios sobre la superficie del objeto [8], de tal manera que a cada punto del cuerpo le corresponde una secuencia binaria diferente. Debido a las dimensiones de los objetos a medir, a la presencia de posibles discontinuidades en la superficie y a la facilidad de implementación, la técnica que se utilizó para llevar a cabo este proyecto fue la de triangulación láser lineal, y se describe a continuación.

2.3 TRIANGULACIÓN LÁSER LINEAL

La técnica de triangulación láser lineal consiste en proyectar una línea láser sobre la superficie del objeto de estudio y observar la deformación de esta línea por medio de una cámara CCD (ver Figura 6). A partir de esta deformación son detectados los cambios topográficos que se presentan en la superficie del objeto. La línea láser se proyecta sobre el objeto utilizando un módulo de luz estructurada, generalmente formado por una lente cilíndrica y un sistema de filtrado espacial para formar un frente de onda plano (ver Figura 8). La cámara CCD se ubica perpendicularmente al plano de referencia, formando un ángulo con el eje de proyección y focalizada sobre el plano de referencia. Como se indica en la Figura 7a al proyectar la línea láser sobre el plano de referencia, la imagen obtenida es una línea recta. Al ubicar el cuerpo sobre el plano de referencia y debido a la topografía de la superficie, la línea se deforma (ver Figura 7b), determinando el desplazamiento de cada punto de la línea con respecto a la línea recta obtenida del plano de referencia, es posible calcular la altura de cada punto que pertenece a la línea láser deformada. De esta manera un corrimiento en el plano imagen codifica la altura, medida sobre el eje óptico de la CCD.

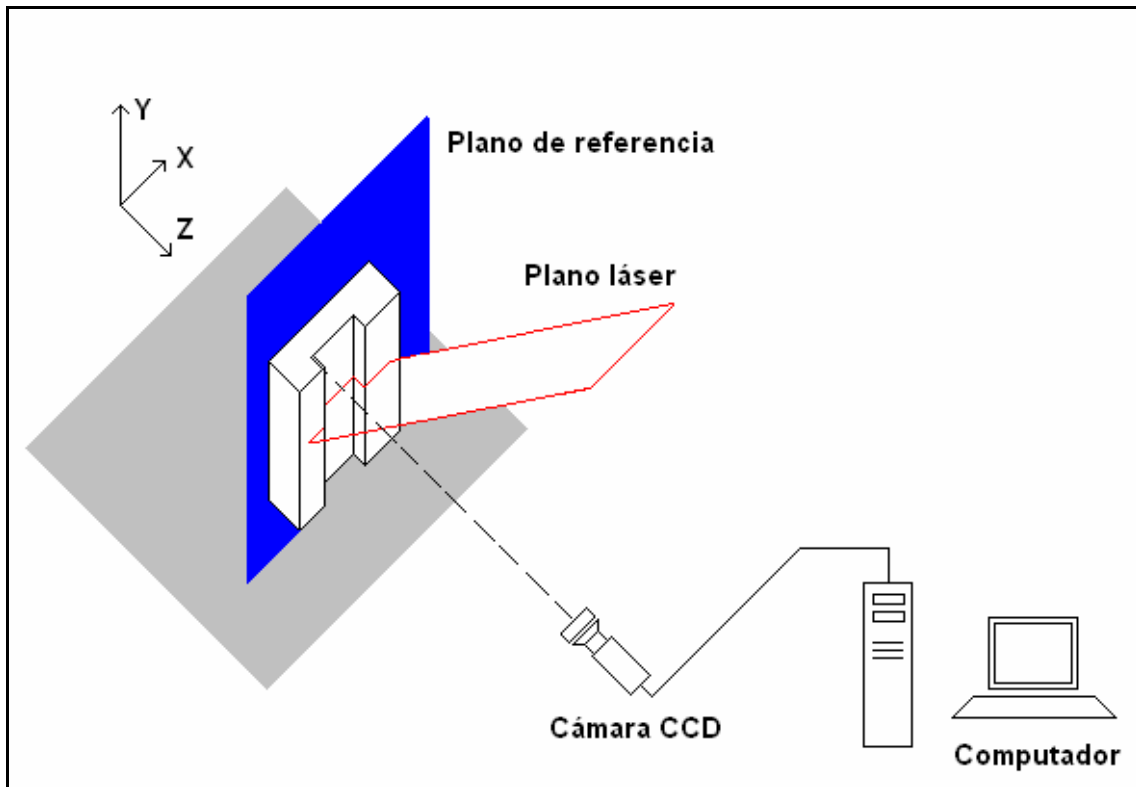


Figura 6. Sistema óptico de triangulación láser lineal.

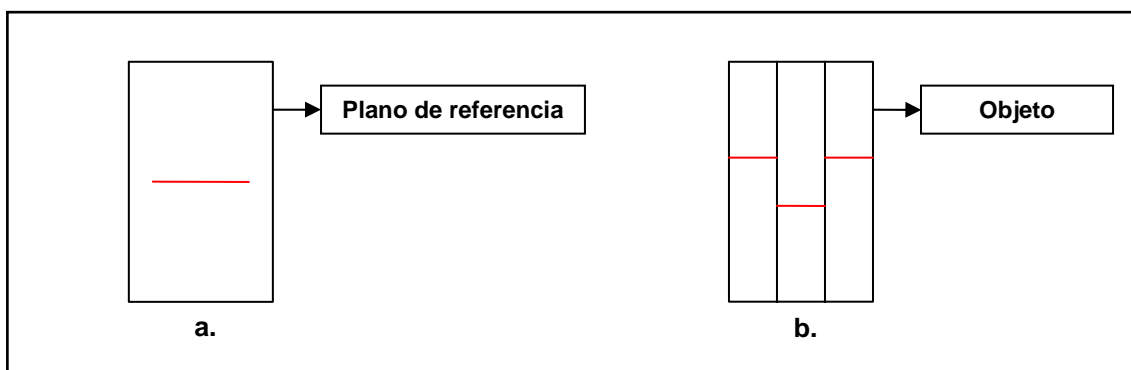


Figura 7. Principio de codificación de la altura.

La Figura 9 muestra el diagrama del sistema de proyección y observación. Sobre el plano $XY(Z=0)$ se encuentra el plano de referencia. La lente proyecta el plano de referencia sobre el plano imagen. El centro de la pupila de entrada coincide con el centro de la pupila de salida y con el centro de la lente delgada R . El plano láser paralelo al eje Y de frente se ve como la recta 1 que al incidir sobre el plano de referencia define la línea recta ubicada en P , y proyectada en P_0 al plano imagen. Al ubicar el objeto el plano láser toca la superficie en Q y es proyectada a S en el plano imagen, siguiendo la recta 2.

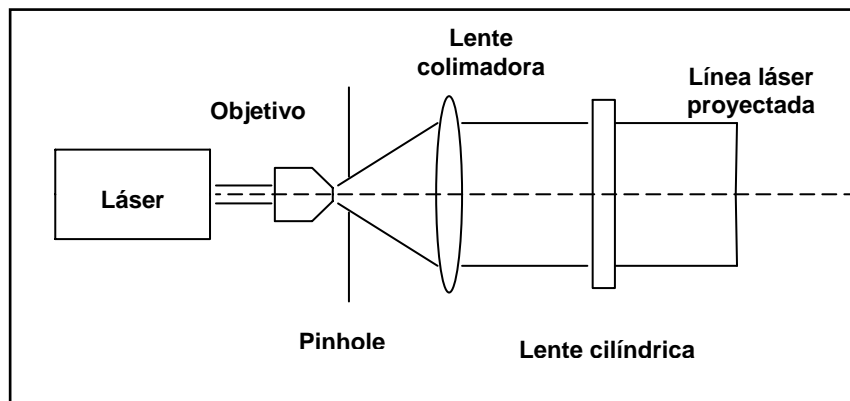
Experimentalmente se ajustan las distancias m , d y se fija α . Con la imagen adquirida de la línea láser proyectada sobre el cuerpo se calcula x_c y con estos datos es posible obtener las coordenadas de Q como la intersección de las rectas 1 y 2. Con el fin de barrer toda la superficie, se debe desplazar la línea láser paralelamente sobre el eje X , conservando el valor de α . De esta manera la coordenada X del punto P será $i\Delta x$ siendo ΔX el incremento en X del desplazamiento de la línea y $i = -N/2$ a $N/2$, donde N es el número total de desplazamientos; así para $i = 0$, la línea está en $X = 0$. Según lo anterior las ecuaciones de las rectas 1 y 2 son

$$Z = -X \tan \alpha + i\Delta X \tan \alpha \quad \text{Recta 1} \quad (1)$$

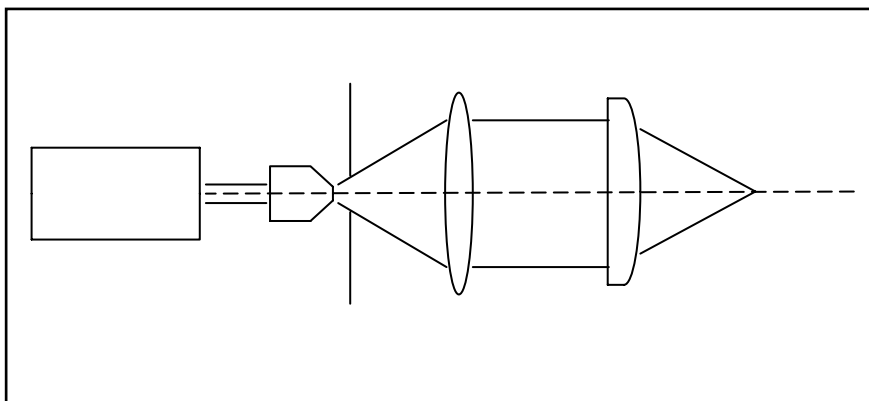
$$Z = \frac{d}{x_c} X + m \quad \text{Recta 2} \quad (2)$$

De la intersección se obtiene

$$X_Q = \frac{ix_c \Delta X \tan \alpha - x_c m}{d + x_c \tan \alpha} \quad Z_Q = d \left(\frac{i\Delta X \tan \alpha - m}{d + x_c \tan \alpha} \right) + m \quad (3)$$



a.



b.

Figura 8. Módulo de luz estructurada.

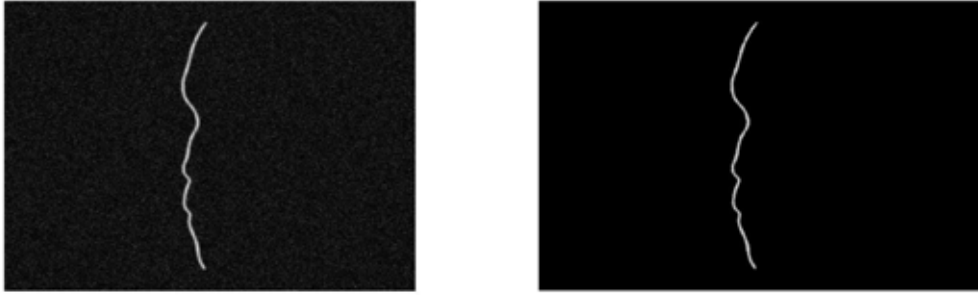


Figura 10. Tratamiento digital a una imagen adquirida. La imagen de la izquierda muestra el speckle presente y en la imagen de la derecha se muestra la eliminación del mismo.

Debido a la coherencia de la radiación láser utilizada, la eliminación del speckle se realiza con el propósito de facilitar el tratamiento digital que se realiza posteriormente. Clásicamente el filtrado del speckle se realiza promediando al interior de una ventana de $n \times n$ píxeles.

2.3.2 Extracción de los valores x_c a partir de las imágenes pre-procesadas

Debido al contraste de la imagen, un proceso de binarización permite obtener las coordenadas en píxeles de los puntos de la línea central P , línea azul de la Figura 11.



Figura 11. Extracción de los valores x_c

Conociendo el factor de conversión F de píxeles sobre la imagen a mm sobre el plano de referencia se obtiene el valor x_c con respecto al centro del captor (320,240) usando $x_c = F(P_c - 320)$ donde P_c es la coordenada en píxeles (ver Figura 12).

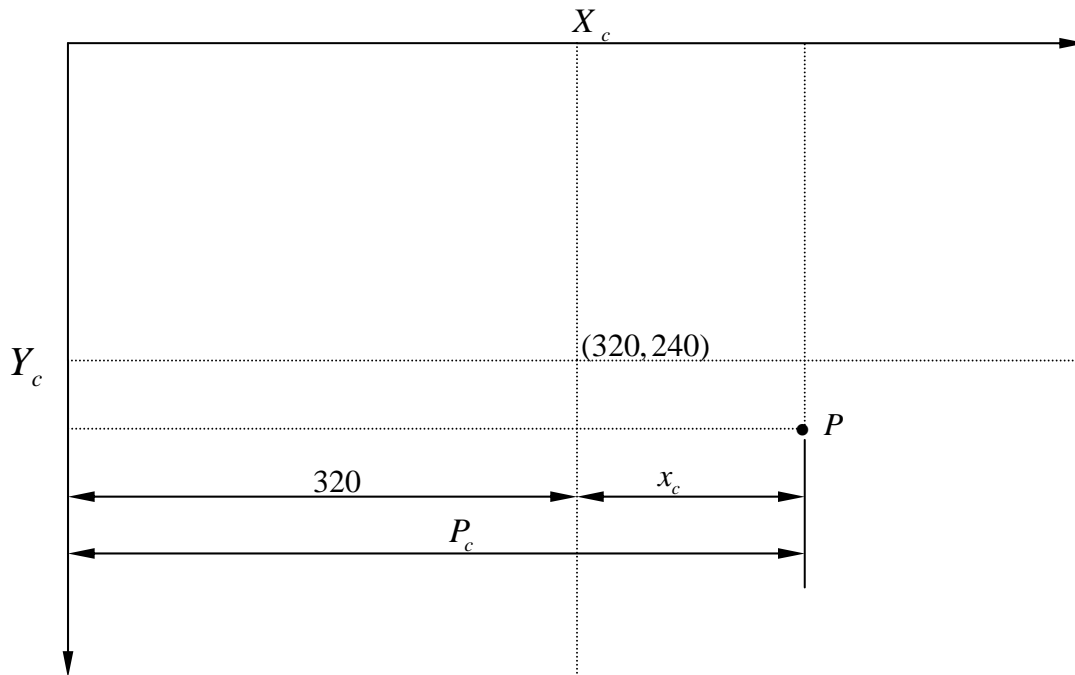


Figura 12. Posición de un punto P de la imagen con respecto al centro del captor.

Este proceso se realiza para una posición fija en Y de la línea láser proyectada. Con el fin de obtener la reconstrucción 3D de la superficie del objeto, es necesario realizar un barrido de la línea láser sobre la superficie del mismo. Esto es posible desplazando el objeto con un motor paso a paso o dejando fijo el objeto y desplazando la línea láser con un espejo galvanométrico o un sistema de rotación. El procedimiento completo de reconstrucción 3D se realiza aplicando los pasos mencionados anteriormente a todas las imágenes adquiridas del objeto en estudio, para obtener una matriz $(X \ Y \ Z)$ que contiene los puntos del objeto necesarios para obtener su reconstrucción 3-D.

2.3.3 Procedimiento de calibración experimental

El procedimiento mencionado anteriormente se realiza cuando son conocidos los parámetros del montaje experimental; si éstos no son conocidos o difíciles de medir con precisión se efectúa un procedimiento de calibración experimental el cual consiste en desplazar el plano de referencia paralelo al plano XY en dirección del eje Z . Para cada posición Z la imagen de la línea láser se desplaza en el plano imagen. La Figura 13 muestra dos imágenes de la línea láser con desplazamiento ΔZ de $40\mu m$ del plano de referencia.

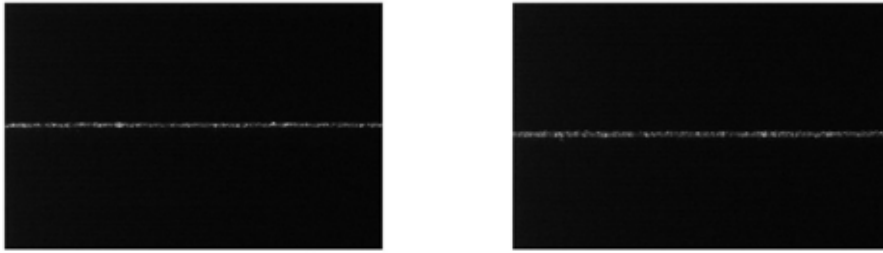


Figura 13. Línea láser sobre la superficie de un objeto plano. Para $Z = 0$ y para $Z = -40\mu m$.

A cada línea obtenida para un Z conocido se elimina el speckle y se extraen las coordenadas en píxeles de la línea central (ver figura 14). Debido a la presencia de variaciones locales de la intensidad y a la utilización de un plano como objeto, se ajusta la mejor línea recta en términos de mínimos cuadrados a los puntos en píxeles de la línea central para cada Z . Al agrupar cada recta interpolada y asignarle su correspondiente valor en Z se obtiene aproximadamente un plano en el espacio (X, Y, Z) donde X y Y están en píxeles y Z en micras, como se observa en la Figura 15. De esta manera interpolando un plano de la forma $Z = aX + bY + c$ se obtienen tres coeficientes que calibran el espacio en píxeles, donde un punto en píxeles (X, Y) le corresponde un valor de Z en micras.

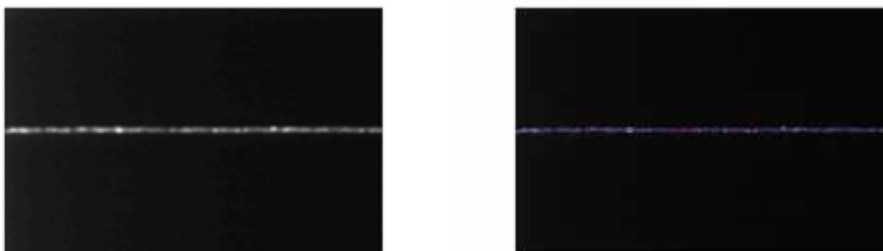


Figura 14. Eliminación de speckle para $Z = 0$.

Al hacer la proyección del plano inclinado sobre el plano XY , se obtiene una región de calibración (ver Figura 16), donde cada punto P dentro de la región tiene un Z correspondiente dado por la ecuación del plano $Z = aX + bY + c$. El procedimiento de reconstrucción tridimensional consiste en calcular las coordenadas de los puntos centrales de la línea deformada por la topografía del cuerpo y calcular sus correspondientes alturas usando la ecuación del plano de calibración.

La precisión del procedimiento de reconstrucción la define la aproximación utilizada para ajustar la curva experimental de calibración. Polinomios de orden superior

pueden utilizarse si hay influencia de efectos no lineales en los sistemas de desplazamiento o fuertes aberraciones de los sistemas formadores de imágenes.

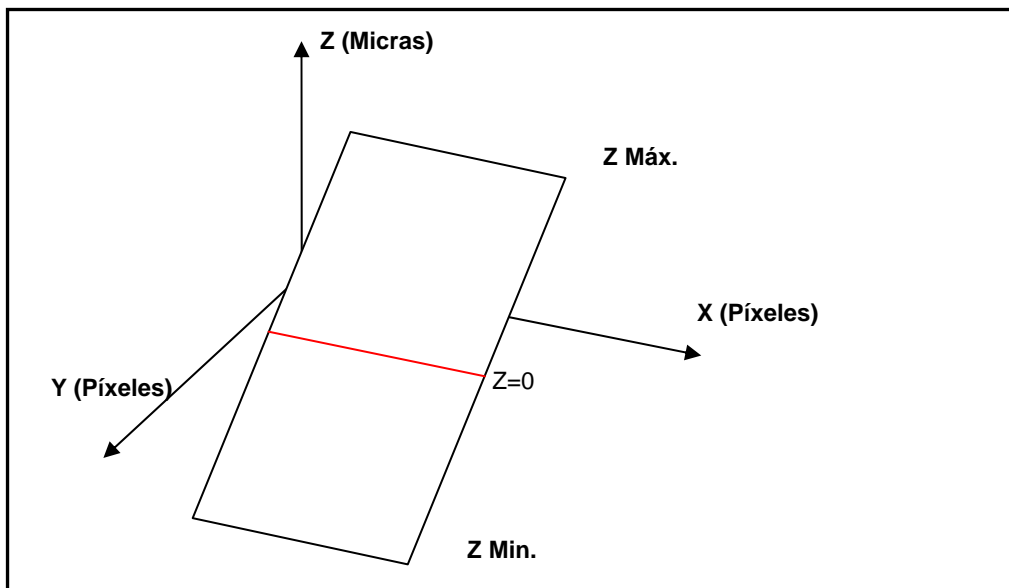


Figura 15. Plano de calibración.

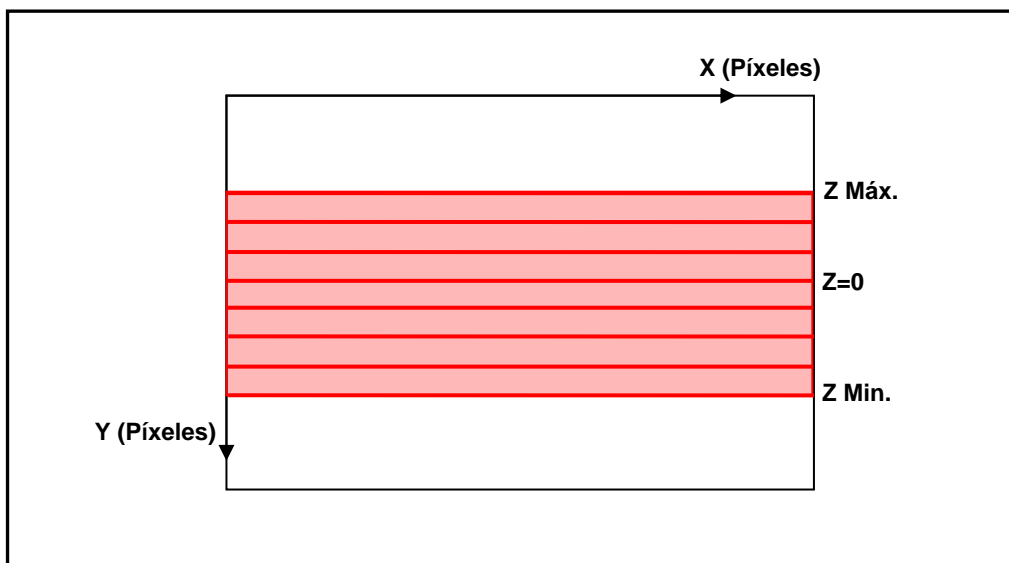


Figura 16. Región de calibración en la CCD.

2.4 Sistema óptico de triangulación láser implementado.

El sistema óptico para la reconstrucción 3-D implementado está formado por un sistema de proyección, el cual se utiliza para proyectar una línea láser sobre la superficie del objeto; un sistema de adquisición del cual hacen parte una cámara CCD y una tarjeta digitalizadora de imágenes y un computador, en el que se registran las imágenes de la línea láser deformada sobre la superficie de las muestras estudiadas, se realiza el tratamiento digital de la mismas, y su posterior análisis 3-D.

2.4.1 Sistema de proyección

El sistema de proyección está formado por:

- Láser de He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$, $P=10\text{mW}$)
- Sistema de filtrado espacial
- Sistema de lentes: Esférica y cilíndrica
- Espejo plano

La Figura 17 muestra la secuencia de elementos utilizados para proyectar la línea láser paralela al eje X formando un ángulo con el eje óptico de la CCD.

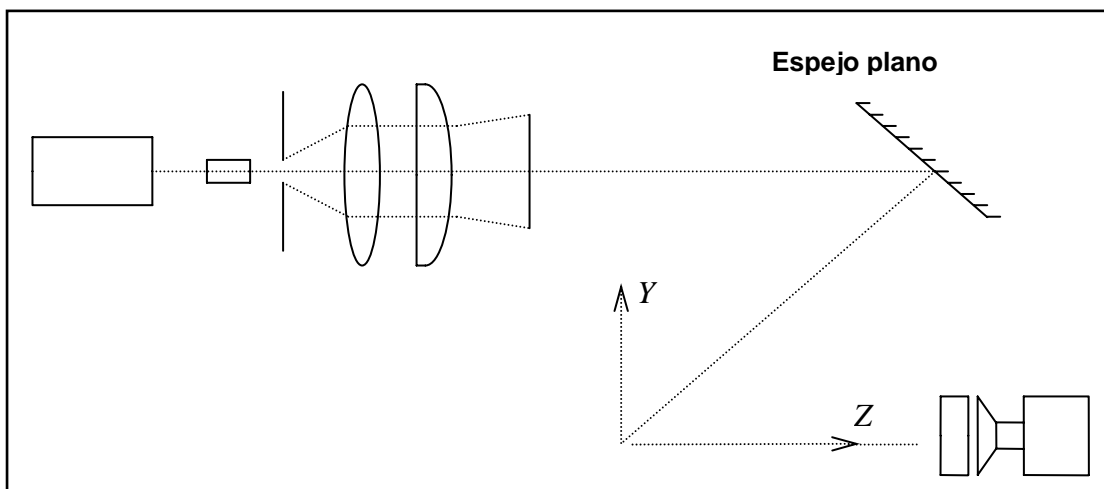


Figura 17. Espejo plano. Utilizado para proyectar la línea láser sobre la superficie de los objetos de estudio

2.4.2 Sistema de observación

Para el sistema de observación se utilizó una cámara CCD con el eje óptico ubicado perpendicularmente al plano XY (ver figura 17).

2.4.3 Sistema de control, adquisición y procesamiento de imágenes

Se utilizó una tarjeta de adquisición Matrox-Meteor II para digitalizar las imágenes enviadas por la CCD, por medio de software de adquisición construido en MATLAB. Las imágenes fueron almacenadas y luego procesadas secuencialmente. Cada imagen digitalizada tenía una resolución de 640x480 píxeles.

2.4.4 Calibración X-Y del sistema de adquisición

Aunque en el proceso de calibración mencionado anteriormente se utiliza un sistema coordenado (X,Y,Z) donde (X,Y) están en píxeles y Z en mm sobre el objeto, se necesita convertir píxeles a mm sobre el objeto para la reconstrucción tridimensional

apropiada. Esta conversión se realiza utilizando un objeto patrón de dimensiones conocidas y ubicándolo sobre el plano de referencia. En la Figura 18 se observan dos imágenes de una red de difracción de 4 líneas/mm ubicada vertical y horizontalmente.

De estas imágenes se concluye que:

- a. Baja influencia de aberraciones geométricas de la lente, para visualizar esto se ubican las líneas rectas de color rojo en los extremos; éstas permiten observar la no deformación de las líneas de la red de difracción.
- b. Los factores de conversión son

$$F_x = 0.1251 \mu\text{m} / \text{píxel}$$

$$F_y = 0.1214 \mu\text{m} / \text{píxel}$$

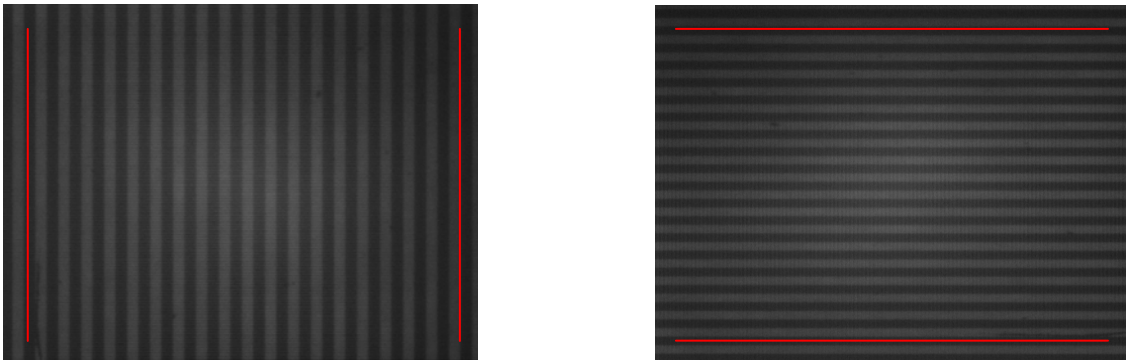


Figura 18. Imágenes de una red de difracción. Ubicada vertical y horizontalmente.

2.4.5 Procedimiento experimental de calibración

Como se mencionó anteriormente el plano de referencia se desplazó a intervalos de $40 \mu\text{m}$ en un rango de $\pm 640 \mu\text{m}$. Al ajustar por mínimos cuadrados se estableció una ecuación de calibración de

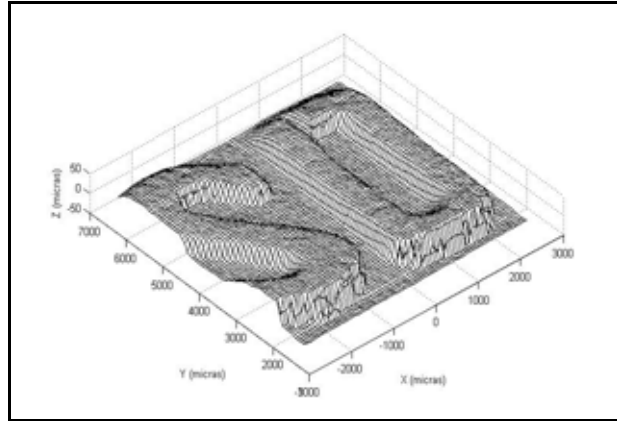
$$Z = 0.4926X + 2.0346Y + 281.9989 \quad (4)$$

2.4.6 Reconstrucción tridimensional

Las Figuras 19 y 20 muestran dos secciones diferentes de una moneda de \$500 reconstruidas. Con el sistema implementado se pudo medir la variación topográfica en el sello de la moneda (ver recuadro negro de la Figura 19a); el valor experimental arrojado por el sistema fue de 53 micras y el valor teórico arrojado por el micrómetro fue de $50 \pm 10 \mu\text{m}$; comparando los respectivos valores experimental y teórico se obtuvo un error del 6% al efectuar dicha medición. Por otra parte, con el sistema es posible analizar pequeñas variaciones topográficas como las que están presentes en la cara de la moneda (ver recuadro negro de la Figura 20a).



a.

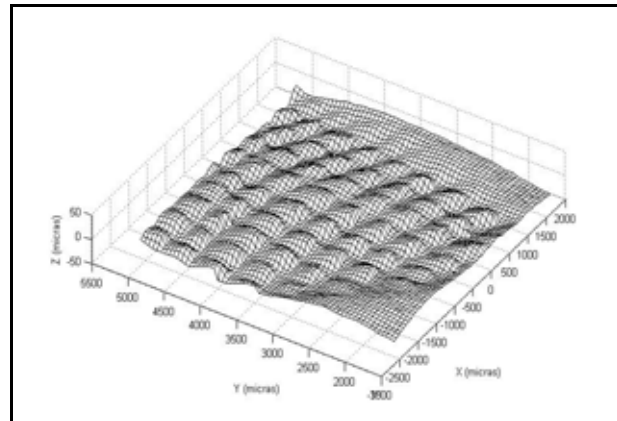


b.

Figura 19. Sección 1.



a.



b.

Figura 20. Sección 2.

3. TRIANGULACIÓN LÁSER LINEAL PARA OBJETOS CON SIMETRÍA CILÍNDRICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el sistema óptico implementado para realizar medidas cuantitativas a las estrías presentes en la superficie de balas dubitadas. El sistema óptico está basado en la técnica de triangulación láser lineal y por medio del mismo se realiza una reconstrucción 3-D a 360° de observación [9]. Se utiliza el sistema óptico implementado y calibrado en la sección anterior, pero se altera para permitir la observación a 360° , ver Figura 21.

Tradicionalmente la técnica de triangulación láser se utiliza para reconstruir objetos que están ubicados sobre un sistema coordenado (X, Y, Z) . En el presente trabajo los objetos de estudio poseen simetría cilíndrica, por tal motivo es necesario realizar una reconstrucción tridimensional a 360° de observación; esto se logra pasando del sistema coordenado (X, Y, Z) a un sistema coordenado (r, θ, Y) , como se ilustra en detalle en la Figura 22. El eje Y corresponde al eje de rotación del objeto.

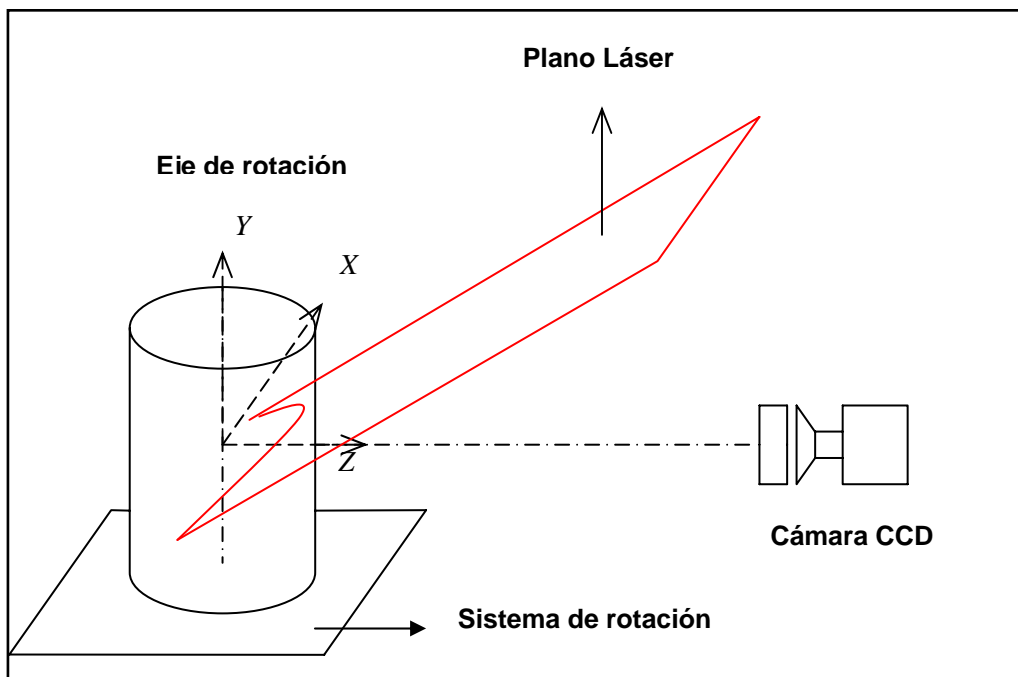


Figura 21. Montaje experimental para reconstruir objetos con simetría cilíndrica.

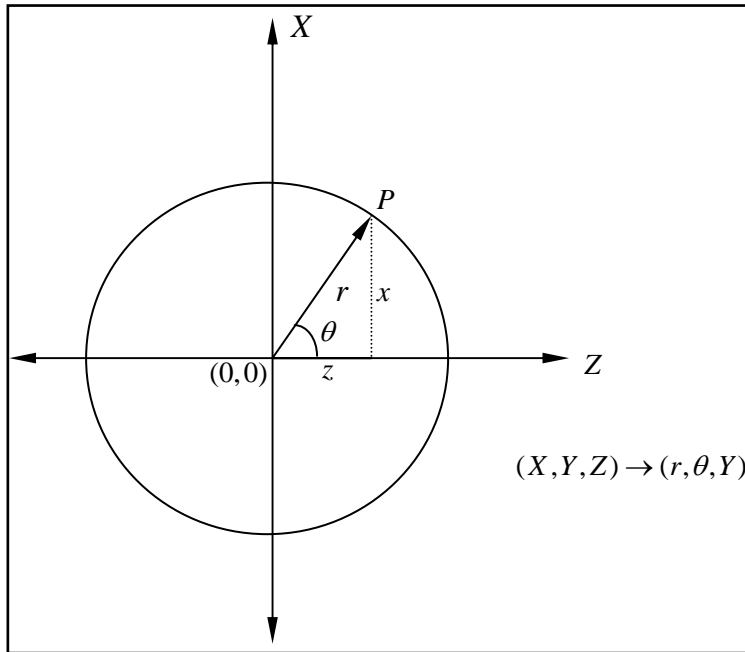


Figura 22. Cambio de coordenadas rectangulares a coordenadas cilíndricas.

3.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE OBJETOS CON SIMETRÍA CILÍNDRICA

Para reconstruir objetos con simetría cilíndrica es necesario realizar una reconstrucción por secciones, es decir se efectúan varias reconstrucciones de tal manera que se realice una reconstrucción a 360° de observación. Para esto el objeto debe rotarse, en nuestro caso con respecto al eje Y (ver Figura 21), efectuar la reconstrucción para cada rotación y por último ensamblar todas las reconstrucciones obtenidas. El procedimiento de calibración fija el sistema coordenado (X, Y, Z) con respecto al eje óptico de la CCD. Matemáticamente se pretende hacer coincidir el eje de rotación con el eje Y del sistema coordenado de calibración. Experimentalmente es difícil encontrar el eje de rotación de una platina de rotación y ajustarlo sobre el eje Y . En el mejor de los casos se garantiza que los dos ejes son paralelos, pero es difícil hacerlos coincidir. Para realizar el ensamble de secciones angulares del objeto es necesario calcular las coordenadas del eje de rotación (x_0, z_0) medido en el sistema (X, Y, Z) . De esta manera se obtienen dos sistemas coordenados: (X', Y', Z') para el sistema de rotación y el sistema coordenado (X, Y, Z) de reconstrucción tridimensional (ver Figura 23). El objeto se ubica en el sistema coordenado (X', Y', Z') y se rota valores angulares θ conocidos para realizar los 360° de observación. Cada

sección angular es reconstruida usando el sistema coordenado (X, Y, Z) . La ecuación de transformación de coordenadas será

$$X' = X + x_0 \quad Z' = Z + z_0 \quad Y' = Y \quad (5)$$

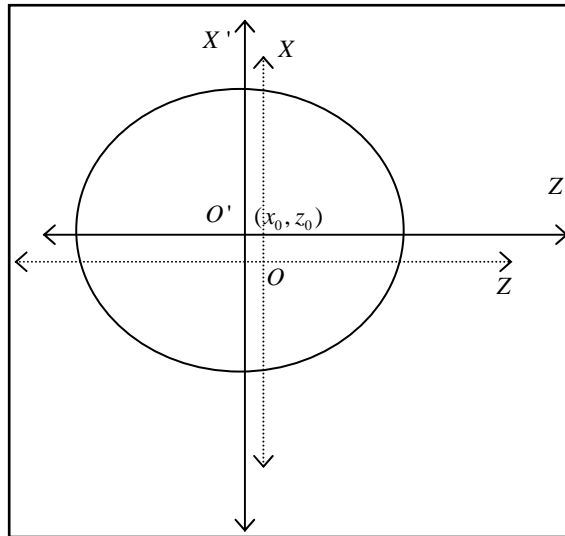


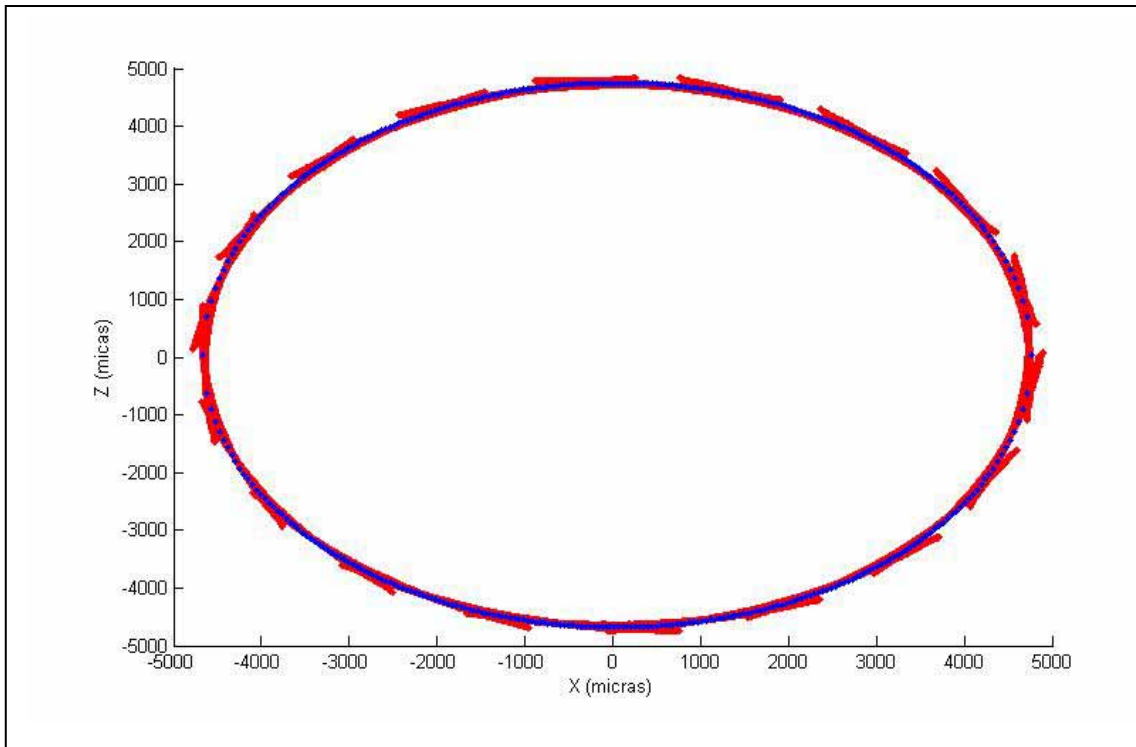
Figura 23. Sistema de rotación y sistema de calibración.

Una vez se han convertido las coordenadas al sistema de rotación, se debe tener en cuenta la rotación α que ha sufrido el objeto para obtener un sistema coordenado (X'', Y'', Z'') que genera el ensamble de las secciones. La ecuación (6) permite convertir al sistema coordenado final

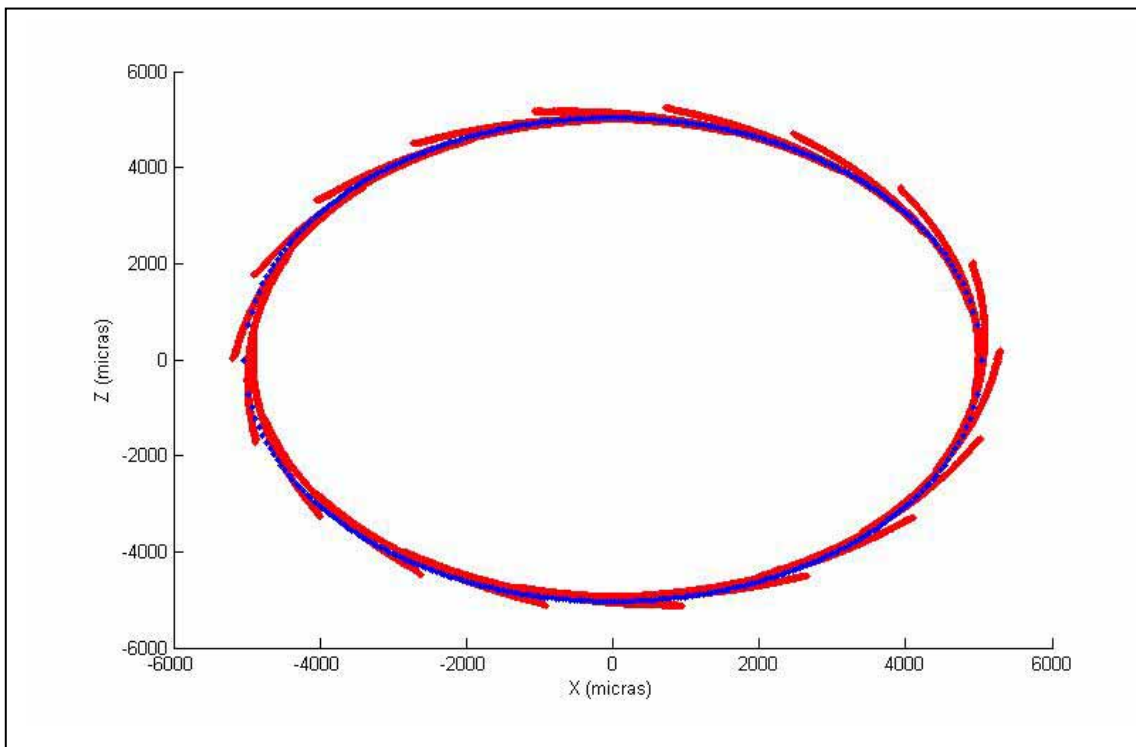
$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$$

(6)

Con el fin recalcular las coordenadas x_0 y z_0 con precisión, se utilizó un cilindro de radio $4.76 \pm 0.01 \text{ mm}$. Al ubicarlo sobre el sistema de rotación, se reconstruyeron 18 secciones de la superficie con 20° de separación angular. Cada sección fue reconstruida usando el procedimiento descrito en el capítulo 2, obteniéndose las coordenadas (X, Y, Z) de cada punto sobre la superficie del cilindro. Como los valores de α para cada punto se conocían con precisión, se definió un procedimiento de optimización por mínimos cuadrados para hallar x_0 y z_0 . La función de error a optimizar era la suma de las diferencias entre el punto experimental y el punto sobre el cilindro interpolado más cercano, para un valor de x_0 y z_0 , se varió x_0 y z_0 de tal manera que el algoritmo calculaba el mínimo valor de la función de error. Los valores obtenidos fueron de $x_0 = 188 \mu\text{m}$ y $z_0 = -4770 \mu\text{m}$ para un radio experimental de 4.97 mm y un valor de la función de error de $24.88 \mu\text{m}$. La Figura 24 muestra dos secciones interpoladas para dos valores de x_0 y z_0 diferentes. La Figura 25a muestra la reconstrucción 3-D para una sección del cilindro, en esta figura se observan pequeñas variaciones topográficas presentes en la superficie del objeto, y la figura 25b muestra la reconstrucción 3-D obtenida a partir de todas las secciones.

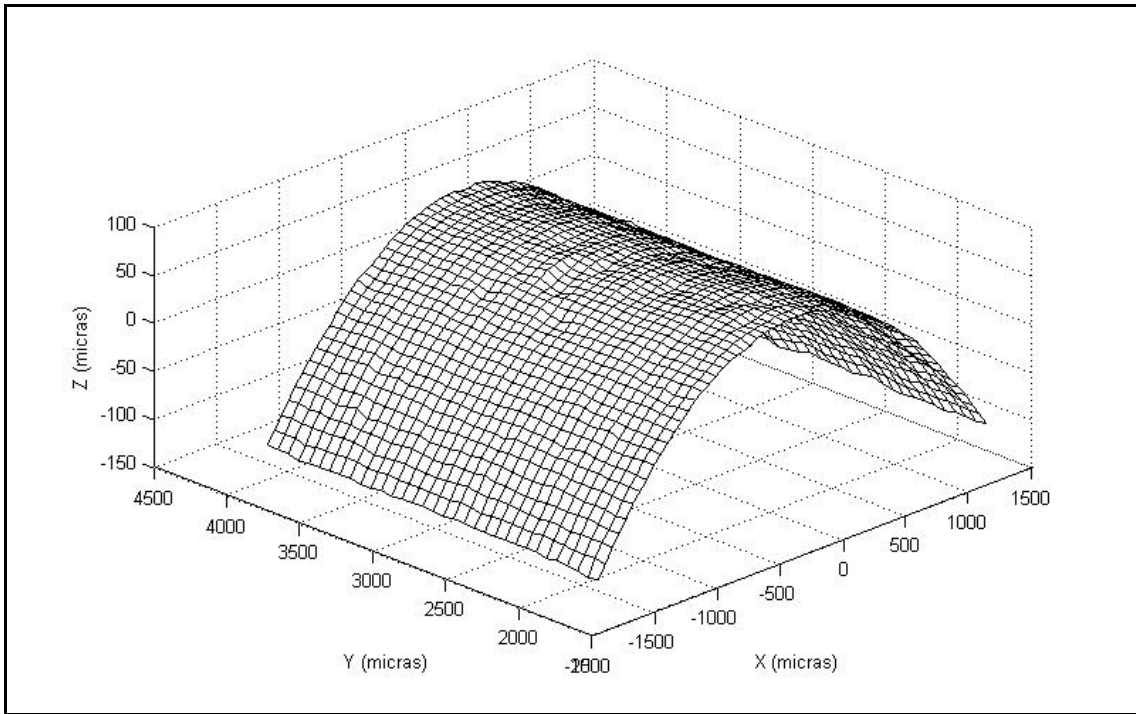


a.

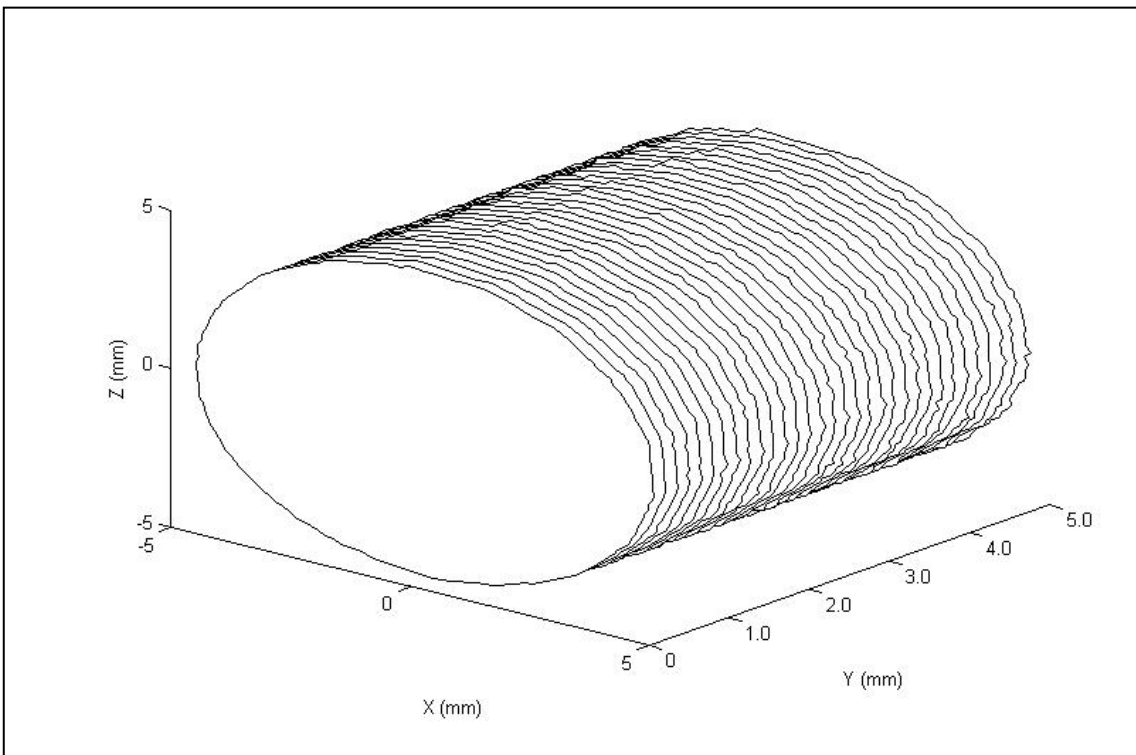


b.

Figura 24. Vista superior de dos ensambles realizados.



a.



b.

Figura 25. Reconstrucción 3-D de un objeto cilíndrico.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA

4.1.1 Precisión

Para evaluar la precisión del sistema implementado se reconstruyen objetos de diferentes formas y dimensiones conocidas, de esta forma se puede comparar la medida reportada por el sistema de reconstrucción con la medida obtenida por medio de un método de contacto, cuya precisión es conocida. En el método de contacto se utilizó un micrómetro (el cual posee una precisión de $0.01mm$) para medir el diámetro de un objeto cilíndrico; el valor arrojado por este instrumento de medida fue de $\phi = 9.54 \pm 0.01mm$ es decir $r = 4.76 \pm 0.01mm$. Nuestro sistema de reconstrucción 3-D arrojó un valor de $r = 4.97 \pm 0.024mm$. Los valores anteriores nos indican que existe una fuerte coincidencia entre los valores indicados por el micrómetro y el sistema de reconstrucción 3-D implementado. Este error es causado por el ensamble de las secciones angulares. El detalle más pequeño que puede resolver el sistema lo define la reconstrucción tridimensional de una sección del objeto. La Figura 26 muestra que se puede resolver fácilmente el detalle de cerca de $50\mu m$ de la superficie de la moneda de \$500, lo cual implica que la resolución del sistema es de alrededor de $10\mu m$.

En la Figura 26 se muestra la sección del objeto utilizada para la reconstrucción (ver recuadro negro) y en la Figura 27 se muestra su reconstrucción tridimensional.



Figura 26. Objeto para verificar la resolución del sistema.

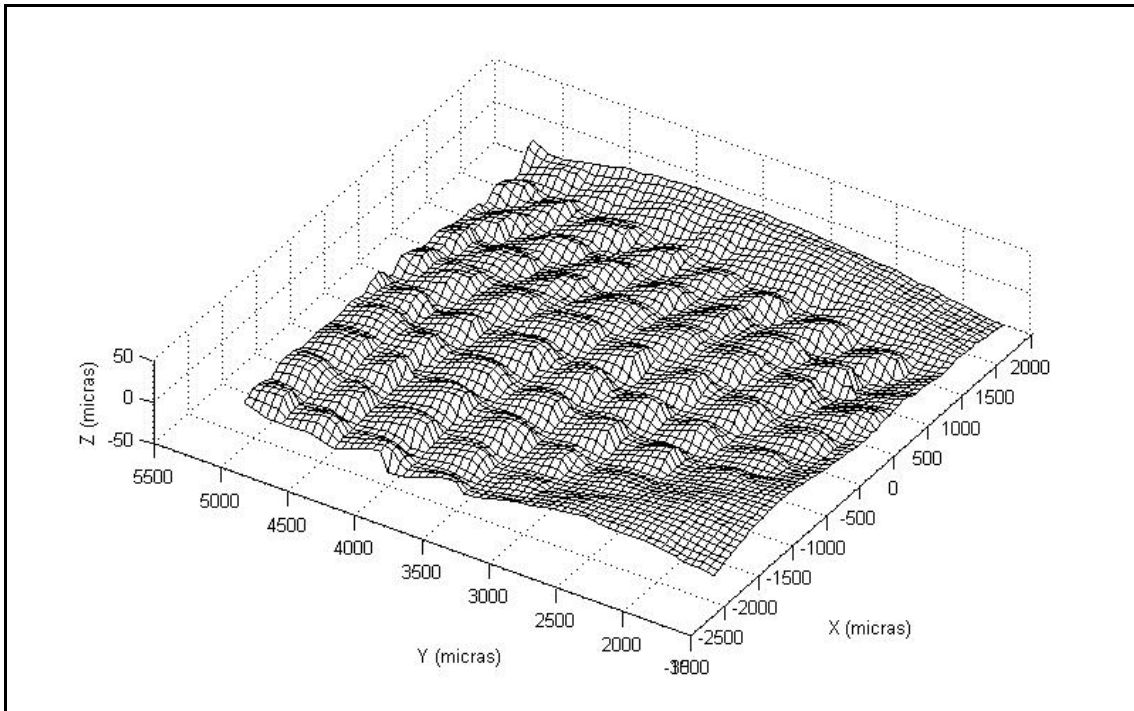


Figura 27. Reconstrucción 3-D de un objeto para verificar la resolución del sistema.

4.2 ANÁLISIS PRELIMINAR A LAS MUESTRAS DUBITADAS.

Las muestras dubitadas, analizadas en el presente trabajo fueron proporcionadas por el Cuerpo Técnico de Investigación (CTI) de la ciudad de Bucaramanga.

En la tabla 2 se muestran las características que se midieron para cada una de las balas por medio de un análisis preliminar visual.

Muestra	Número de estrías	Orientación de las estrías	Radio del cuerpo cilíndrico (mm)
Bala 1	Doce (12)	Derecha	3.94 ± 0.01
Bala 2	Doce (12)	Derecha	4.46 ± 0.01
Bala 3	Diez (10)	Derecha	4.49 ± 0.01

Tabla 2. Análisis preliminar de las muestras.

La orientación está dada con respecto al eje longitudinal de las balas. El cuerpo cilíndrico de las balas o cintura de forzamiento es la región útil de cotejo; en esta región están ubicadas las estrías (ver Figura 28).

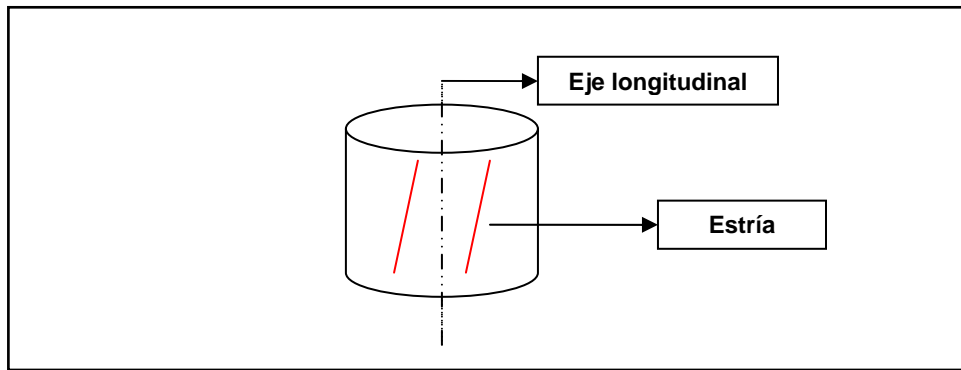


Figura 28. Zona útil de cotejo de una bala

4.3 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LAS BALAS

Siguiendo el procedimiento de reconstrucción explicado en el capítulo 3 se reconstruyeron las muestras dubitadas. En la figura 29 se muestra la reconstrucción tridimensional del cuerpo cilíndrico de la bala 2; las líneas rojas permiten observar la orientación de las estrías en el espacio. Para realizar la reconstrucción completa de la bala fue necesario efectuar doce reconstrucciones en total, la figura 30 muestra la reconstrucción tridimensional de una de las secciones; a partir de las doce secciones reconstruidas se llevó a cabo el análisis cuantitativo de las estrías presentes en la superficie del objeto; midiéndose las características mencionadas en el capítulo 1.

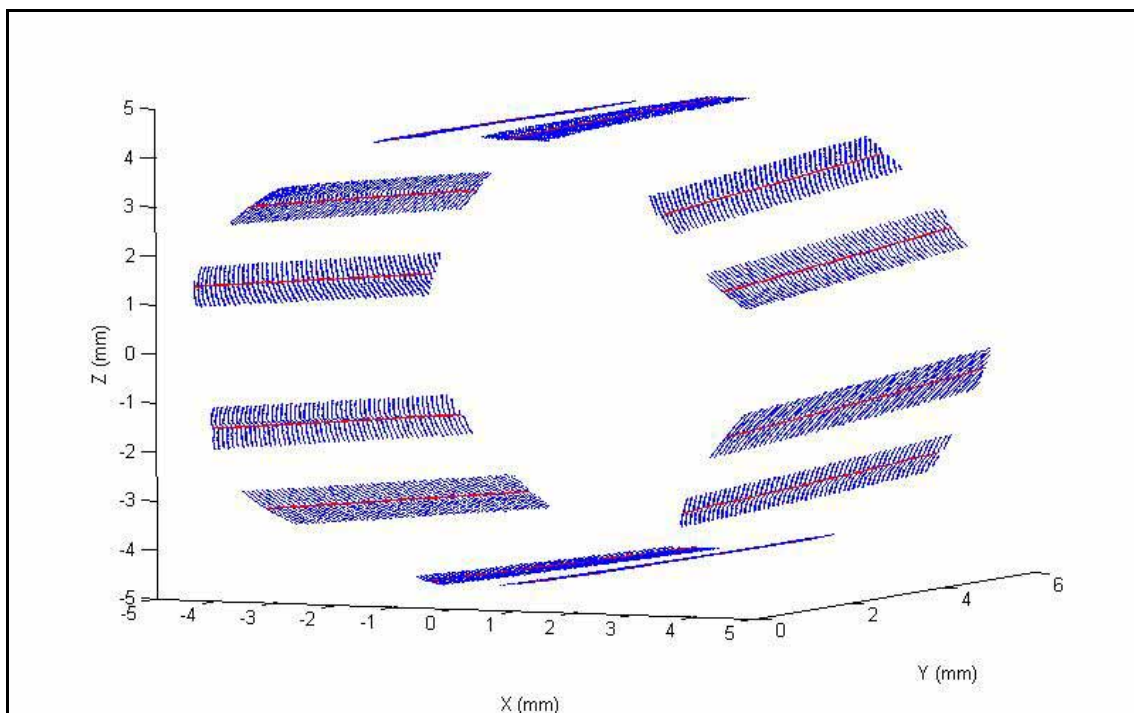


Figura 29. Reconstrucción tridimensional del cuerpo cilíndrico de la bala 2.

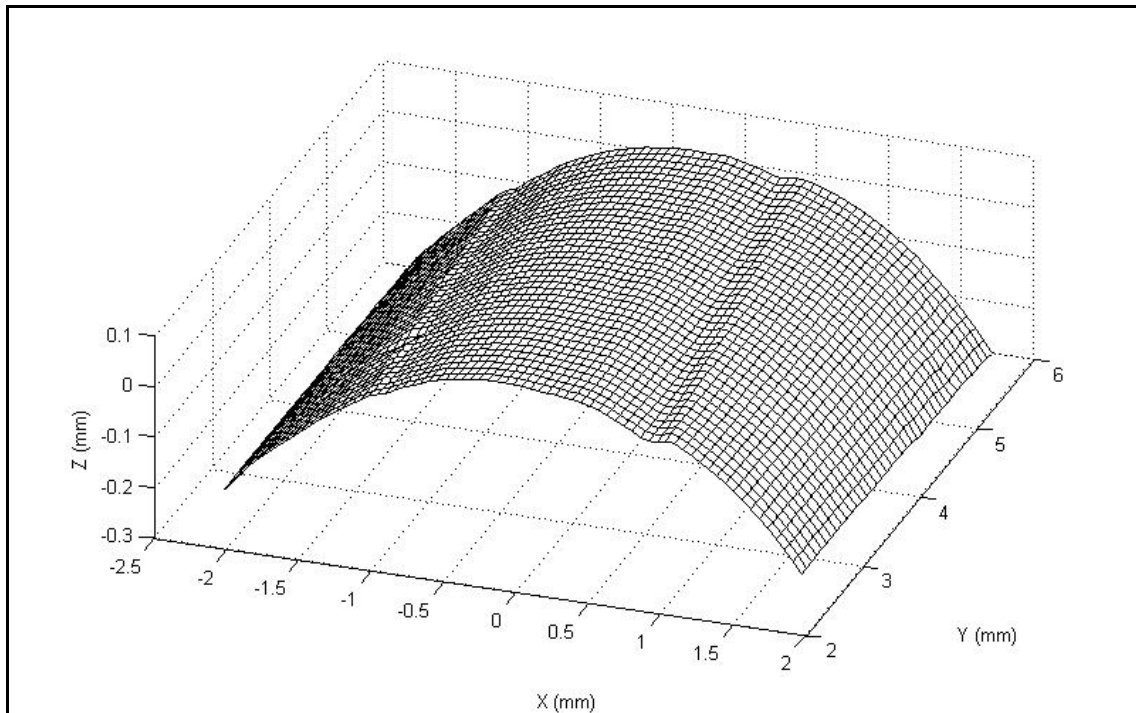


Figura 30. Reconstrucción tridimensional de una sección de la bala 2.

4.4 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LAS ESTRÍAS

Para realizar el análisis cuantitativo fue necesario llevar las imágenes tridimensionales a imágenes bidimensionales. En la figura 31 se muestra la imagen bidimensional del cuerpo cilíndrico para la bala 2. Cada punto de coordenadas (r, θ, Y) se ubica en la imagen bidimensional de la siguiente manera: Las columnas cambian θ linealmente entre 0 y 2π dando N datos y las filas cambian linealmente entre Y_{\min} y Y_{\max} dando N datos. Así a un punto sobre el objeto de coordenadas (r_i, θ_i, Y_i) se asigna r_i al píxel equivalente (θ_p, Y_p) donde θ_p es la columna y Y_p es la fila de acuerdo a los valores de (θ_i, Y_i) .

Como la línea láser incide formando un ángulo con el eje óptico, sobre el cilindro se obtiene una línea en forma de parábola, como se observa en la figura 21. Al hacer el barrido en Y y en θ se obtiene una imagen como la mostrada en la Figura 32. Sobre esta figura se identifican las estrías y se calcula su dirección media, línea roja sobre la figura.

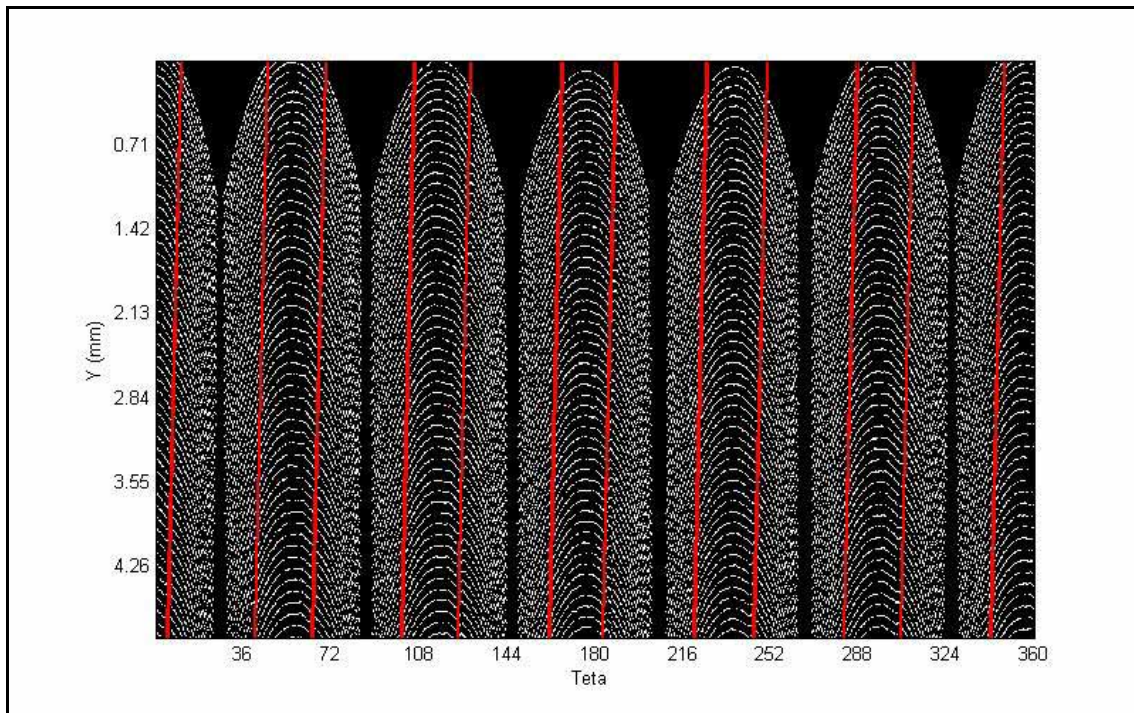


Figura 31. Imagen bidimensional del cuerpo cilíndrico de la bala 2.

A partir de la imagen mostrada en la figura anterior se midieron características de las estrías como el ángulo de torsión con respecto al eje longitudinal (ver Figura 28) y la separación angular entre las mismas, además se midió el radio promedio del cuerpo cilíndrico de la bala obteniendo un valor de $4.63 \pm 0.024\text{mm}$. La separación angular se midió entre estrías cercanas, para realizar esta medición se realizó una transformación a coordenadas polares (r, θ, Y) de todos los puntos (X, Y, Z) sobre la superficie de la bala y se realizó una gráfica de θ vs r sobre un eje polar (ver Figura 32).

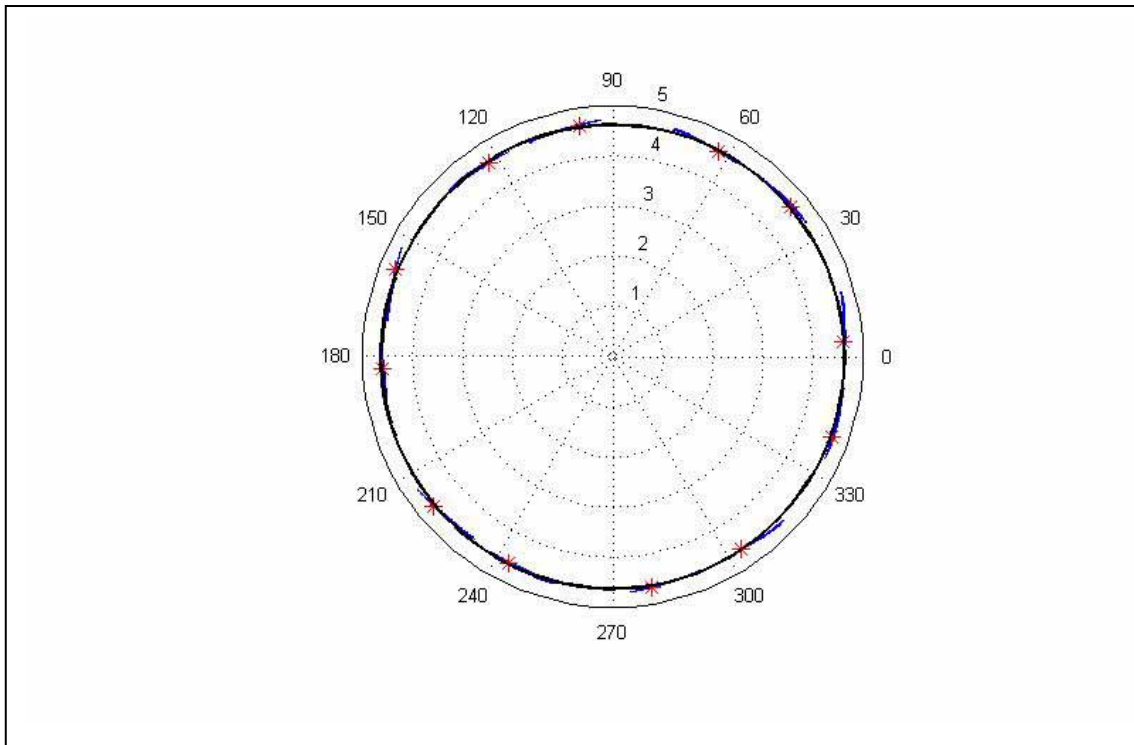


Figura 32. Puntos sobre la superficie de la bala en coordenadas polares.

Las marcas rojas sobre la figura anterior muestran las posiciones angulares de puntos que pertenece a las estrías presentes en la superficie de la bala; la separación angular fue medida extrayendo la posición angular de cada una de estos puntos y realizando la diferencia para dos posiciones angulares cercanas.

Para medir la profundidad de las estrías se realizó un análisis por separado a cada una de ellas por medio de su reconstrucción tridimensional. La Figura 33 muestra la reconstrucción tridimensional para una de las estrías. Debido a que la profundidad de cada estría no es uniforme se midió la profundidad promedio para cada una de ellas; en la tabla 3 se muestran las profundidades promedio de cada una de las estrías.

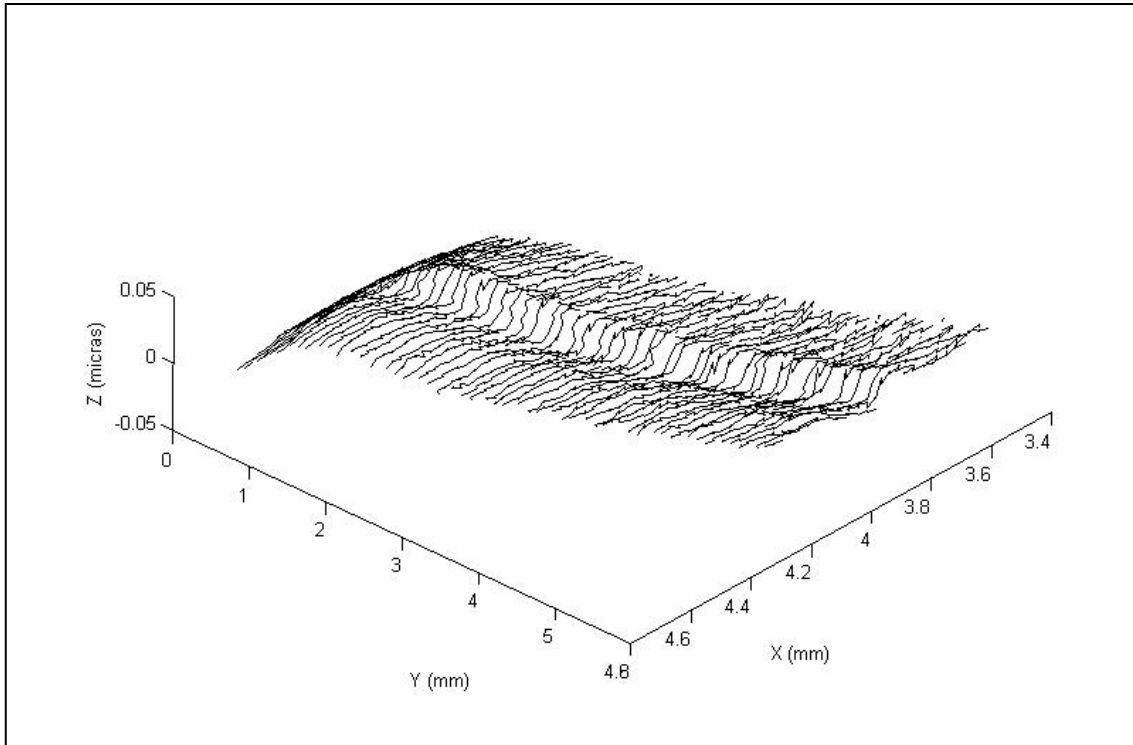


Figura 33. Reconstrucción tridimensional para una de las estrías.

Estría	Profundidad Promedio (micras)
1	30
2	50
3	40
4	35
5	50
6	40
7	60
8	40
9	40
10	60
11	50
12	40

Tabla 3. Profundidad promedio para las estrías de la bala 2

En la tabla 4 se muestran todas las características medidas sobre el cuerpo cilíndrico de la bala 2.

Muestra	Número de estrías	Orientación de las estrías	Angulo de torsión	Separación angular
Bala 2	12	Derecha	6.38°	23.84°

Tabla 4. Características medidas sobre la superficie de la bala 2.

Finalmente es importante destacar que el sistema implementado también puede ser utilizado con el propósito de realizar análisis cuantitativos a las marcas que deja la aguja percutora sobre la vainilla del proyectil justo después de efectuarse el disparo. Actualmente estas marcas son estudiadas utilizando el microscopio criminológico de comparación mencionado en el capítulo 1. La figura 34 muestra la reconstrucción tridimensional de la parte inferior de una vainilla perteneciente a un proyectil disparado con un arma calibre 38. El análisis tridimensional permite obtener la profundidad máxima, ancho y forma de la huella dejada por la aguja percutora sobre la vainilla.

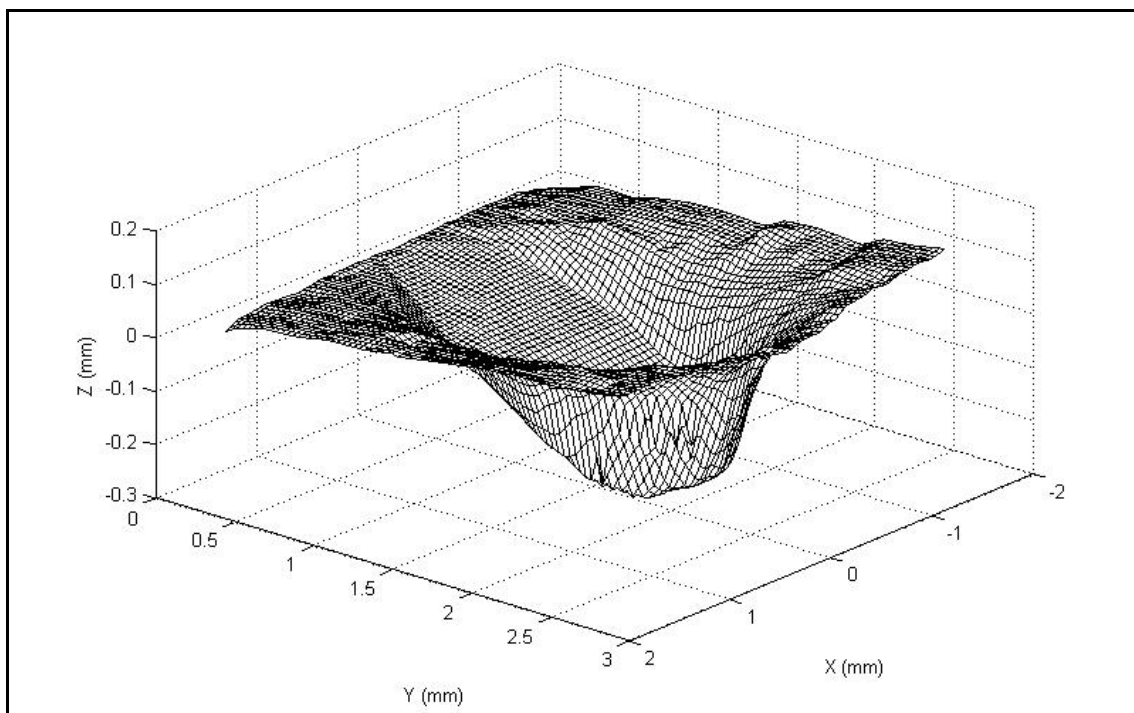


Figura 34. Reconstrucción tridimensional de la parte inferior de una vainilla.

5. CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente trabajo se concluye que:

- Se diseñó y construyó un sistema de reconstrucción 3-D a partir de la técnica de triangulación láser lineal. El sistema de reconstrucción implementado permite reconstruir objetos a una resolución del orden de $10\mu m$.
- Se reconstruyeron objetos con simetría cilíndrica a 360° de observación.
- Se utilizó el sistema de medida 3-D para realizar análisis cuantitativos a las estrías presentes en la superficie de balas disparadas con armas de fuego. Se midieron características de las estrías como la orientación, el número, el ángulo de torsión de las mismas con respecto al eje longitudinal de la bala, la profundidad promedio de las estrías y la separación angular entre dos estrías cercanas.
- El objetivo principal del trabajo era el de diseñar un dispositivo basado en triangulación láser para reconstruir objetos con simetría cilíndrica. Con estas características del sistema se analizaron cuantitativamente algunos parámetros de balas disparadas con armas de fuego. Como el elemento básico era un sistema de reconstrucción tridimensional por triangulación láser se ensayó hacer la reconstrucción tridimensional de la huella dejada por la aguja percutora sobre la vainilla. El resultado obtenido abre las posibilidades de crear un dispositivo completo de exploración tridimensional en balas y vainillas, útil en cotejos balísticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] www.criminalistaenred.com.ar
- [2] **PEREZ ZAYRA, ROMERO LENNY.** "Sistema óptico de reconstrucción 3D para la detección de ampollas en recubrimientos". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2004.
- [3] **ROBAYO DAFNE, VALDERRAMA ZULMA.** "Reconstrucción 3D de objetos discontinuos usando el método de código de gris". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2003.
- [4] **A. PATIÑO, D. MIRANDA, J. MENESES.** "Scanner 3D de objetos a 360° de observación". REVISTA COLOMBIANA DE FISICA, VOL. 35, No.1. 2003.
- [5] **CASTELLANOS LILITH, MENDIETA EDNA.** "Cotejo balístico mediante procesamiento digital de imágenes". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2001.
- [6] R. G. Dorsch, G. Hausler, and J. M. Herrmann, "Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement," Appl. Opt. **33**, 1306- (1994).
- [7] G. Indebetouw, "Profile measurement using projection of running fringes (E)," Appl. Opt. **17**, 2930- (1978).
- [8] G. Sansoni, S. Corini, S. Lazzari, R. Rodella, and F. Docchio, "Three-dimensional imaging based on Gray-code light projection: characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial applications," Appl. Opt. **36**, 4463-4472 (1997).
- [9] X. -X. Cheng, X. -Y. Su, and L. -R. Guo, "Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse objects," Appl. Opt. **30**, 1274- (1991).