
Dispositivo Óptico De Medida 3-D Con Simetría Cilíndrica: Aplicaciones En Balística

Contreras R.^a y Meneses J.^b

^a Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, A. A. 678, Bucaramanga, Colombia. ^b Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, A. A. 678, Bucaramanga, Colombia.

RESUMEN

Se diseñó y construyó un dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de objetos con simetría cilíndrica, utilizando la técnica de triangulación láser; 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, una tarjeta de video (Matrox Meteor II) que digitaliza las imágenes y un computador en el que se registran las imágenes adquiridas y se obtiene la reconstrucción tridimensional del objeto de estudio. El dispositivo fue evaluado utilizando objetos de forma conocida. Análisis cuantitativos a las estrías sobre la superficie de balas disparadas con armas de fuego son mostrados y discutidos; además se muestra la reconstrucción tridimensional de la huella provocada por la aguja de percusión sobre la superficie de la vainilla.

Palabras Clave: Dispositivo óptico, Triangulación Láser, Balística Interior, Reconstrucción Tridimensional.

ABSTRACT

An optical device for three-dimensional reconstruction of objects with cylindrical symmetry was developed, using laser triangulation method; with an application in Interior Ballistic. In the laser triangulation method a laser line is projected on surface of the studied object and starting of above-mentioned line is possible to encode the topographical variations presents in the surface of the object to reconstruct. Device is formed by the following modules: Projection system, it is utilized to project a laser line on the surface of the object. An acquisition system, that consist of a CCD camera, a frame grabber (Matrox Meteor II) which digitize the images and a computer which are registered the images acquired and three-dimensional reconstruction of the studied object is obtained. 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. Furthermore three-dimensional reconstruction of the mark caused by the firing pin on the cartridge case surface is showed.

Keywords: Optical Device, Laser Triangulation, Interior Ballistic, Three-dimensional Reconstruction

1. INTRODUCCIÓN

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. La Balística Forense, es decir la aplicada a la solución de problemas judiciales se clasifica en tres partes: Balística Interior, Balística Exterior y Balística de Efectos.

En la actualidad la balística se ha convertido en una ciencia de gran importancia para el esclarecimiento de 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 imágenes⁴, 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:

- 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.



Figura 3. Estrías sobre la superficie de una 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. En este trabajo se realizan estas medidas utilizando la técnica de triangulación láser⁵. 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.

2. TRIANGULACIÓN LÁSER LINEAL PARA OBJETOS CON SIMETRÍA CILÍNDRICA

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 (ver Figura 4) esto se logra pasando del sistema coordenado (X, Y, Z) a un sistema coordenado polar (r, θ, Y)

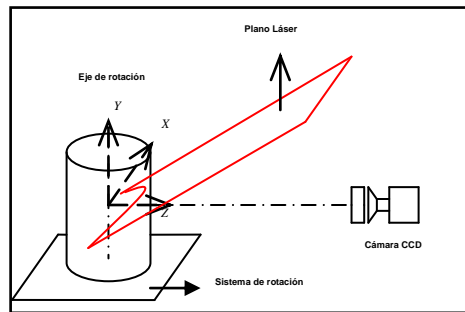


Figura 4. Montaje experimental para reconstruir objetos con simetría cilíndrica.

2.1 Procedimiento de calibración experimental

El procedimiento de calibración consiste en desplazar el plano de referencia (ubicado en $Z = 0$) 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 5 muestra la imagen de la línea láser para $Z = 0$. 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 5) 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 6a. 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. Al hacer la proyección del plano inclinado sobre el plano XY , se obtiene una región de calibración (ver Figura 6b) 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.

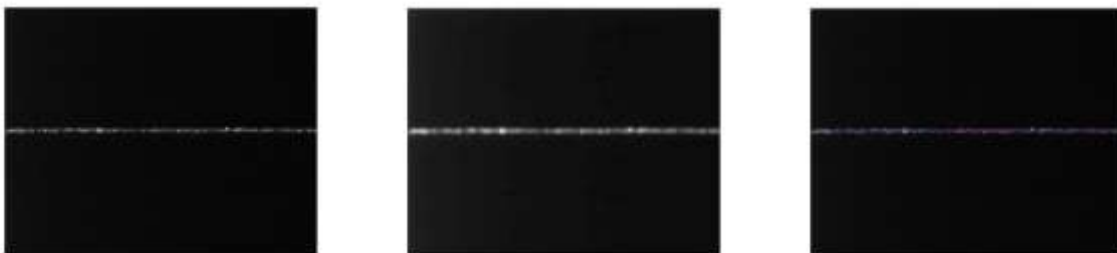


Figura 5. Línea láser sobre la superficie de un objeto plano. Para $Z = 0$.

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, fuertes aberraciones o no telecentricidad de los sistemas formadores de imágenes.

El plano de referencia se desplazó a intervalos de $40\mu m$ en un rango de $\pm 640\mu m$. Al ajustar por el método de los mínimos cuadrados se estableció una ecuación de calibración de

$$Z = 0.4926X + 2.0346Y + 281.9989 \tag{1}$$

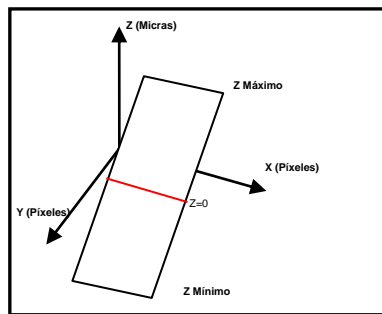


Figura 6a. Plano de calibración.

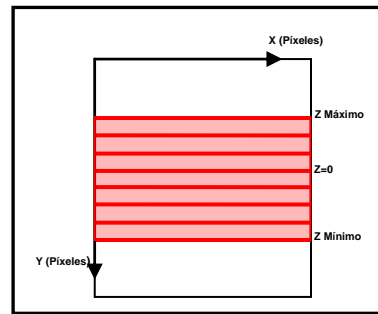


Figura 6b. Región de calibración en la CCD.

2.2 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.

2.2.1 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 7 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.

2.2.2 Sistema de observación

Para el sistema de observación se utilizó una cámara CCD con el eje óptico ubicado perpendicularmente al plano XY (ver figura 7)

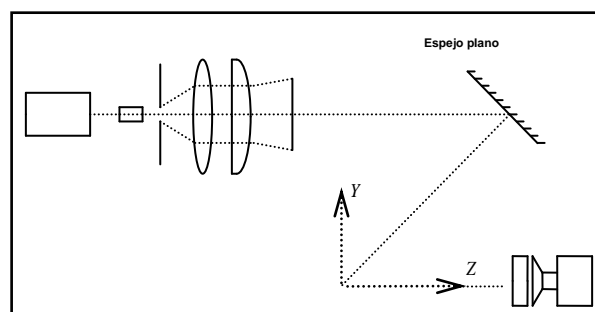


Figura 7. Espejo plano. Utilizado para proyectar la línea láser sobre la superficie de los objetos de estudio.

2.2.3 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 de manera secuencial. Cada imagen digitalizada tenía una resolución de 640x480 píxeles.

2.2.4 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 8 se observan dos imágenes de una red de difracción de 4 líneas/mm ubicada vertical y horizontalmente. De estas imágenes se concluye: 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:

$$F_x = 0.1251 \frac{\mu m}{\text{píxel}}; F_y = 0.1214 \frac{\mu m}{\text{píxel}}$$



Figura 8. Imágenes de una red de difracción. Ubicada vertical y horizontalmente.

2.3 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 4) 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.

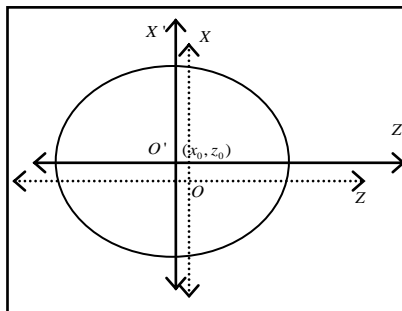


Figura 9. Sistema de rotación y sistema de calibración.

$$X' = X + x_0 \quad Z' = Z + z_0 \quad Y' = Y \quad (2)$$

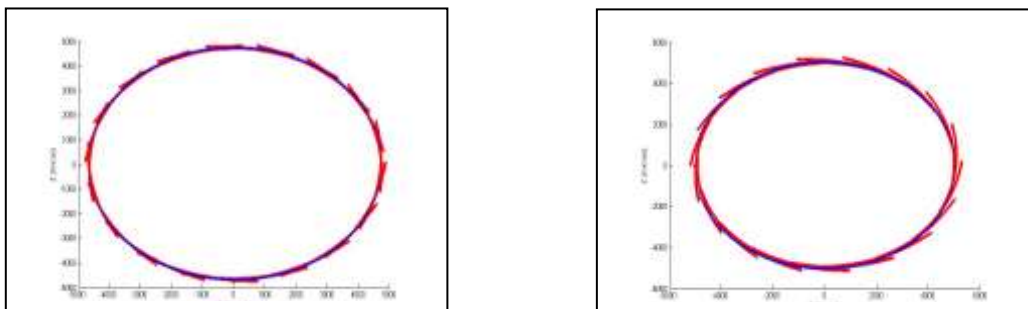
Para realizar el ensamble de secciones angulares del objeto es necesario calcular las coordenadas del eje de rotación (x_0, z_0) medido en el sistema (X, Y, Z) De esta manera se obtienen dos sistemas coordenados: (X', Y', Z') para

el sistema de rotación y el sistema coordenado (X, Y, Z) de reconstrucción tridimensional (ver Figura 9) 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,

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 (3) permite convertir al sistema coordenado final.

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (3)$$

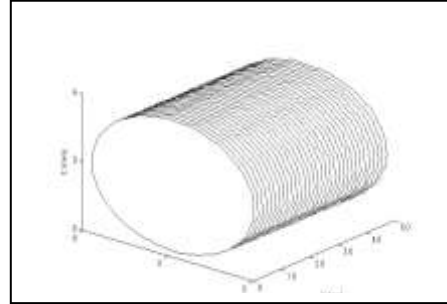
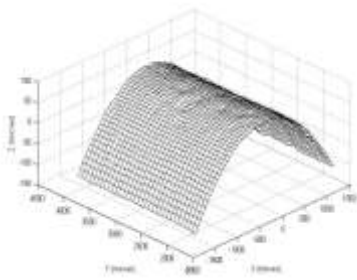
Con el fin de calcular las coordenadas x_0 y z_0 con precisión, se utilizó un cilindro de radio $4.76 \pm 0.01 \text{ mm}$. Al ubicarlo sobre el sistema de rotación, se reconstruyeron 18 secciones de la superficie con 20° de separación angular. Cada sección fue reconstruida usando el procedimiento clásico de triangulación láser lineal, 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 10 muestra dos secciones interpoladas para dos valores de x_0 y z_0 diferentes. La Figura 11a muestra la reconstrucción 3-D para una sección del cilindro, y la figura 11b muestra la reconstrucción 3-D obtenida a partir de todas las secciones.



a.

b.

Figura 10. Vista superior de dos ensambles realizados



a.

b.

Figura 11. 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; en el método de contacto se utilizó un micrómetro (con 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 12a muestra que se puede resolver fácilmente el detalle cercano a las $50\mu m$ 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 12a se muestra la sección del objeto utilizada para la reconstrucción (ver recuadro negro) y en la Figura 12b se muestra su reconstrucción tridimensional.

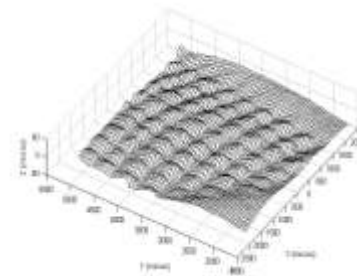


Figura 12a. Objeto para verificar la resolución del sistema. **Figura 12b.** Reconstrucción 3-D de un objeto para verificar la resolución del sistema.

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 1 se muestran las características que se midieron para cada una de las balas por medio de un análisis preliminar visual.

Tabla 1. Análisis preliminar de las muestras

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

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 13)

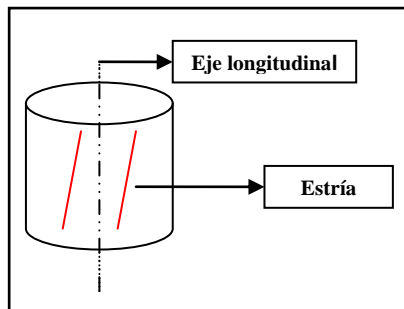


Figura 13. Zona útil de cotejo de una bala

4.3 Reconstrucción Tridimensional de las balas.

Siguiendo el procedimiento de reconstrucción explicado en la sección 3 se reconstruyeron las muestras dubitadas. En la figura 14a 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 14b 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 la sección 1.

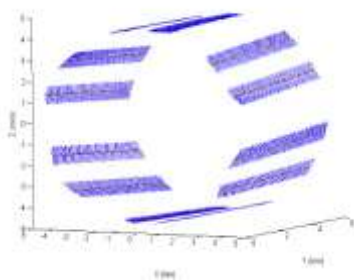


Figura 14a. Reconstrucción 3-D del cuerpo cilíndrico de la bala 2.

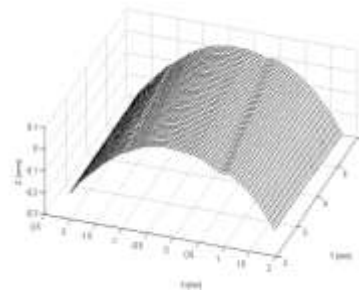


Figura 14b. Reconstrucción 3-D de una sección de la bala 2.

4.4 Análisis cuantitativos de las estrías

Para realizar el análisis cuantitativo fue necesario llevar las imágenes tridimensionales a imágenes bidimensionales. En la figura 15a 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 4. Al hacer el barrido en Y y en θ se obtiene una imagen como la mostrada en la Figura 15a. Sobre esta figura se identifican las estrías y se calcula su dirección media, línea roja sobre la figura. 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 13) 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 15b)

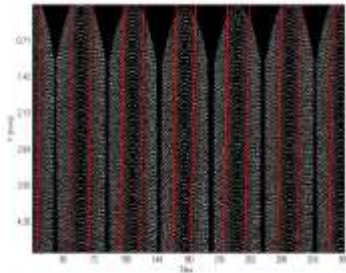


Figura 15a. Imagen bidimensional del cuerpo cilíndrico de la bala 2. coordenadas polares.

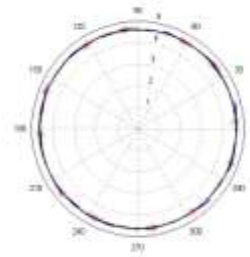


Figura 15b. Puntos sobre la superficie de la bala en

Las marcas rojas sobre la figura anterior (Figura 15b) 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 16a 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 de cada una de éstas; en la tabla 2 se muestran las profundidades promedio de cada una de las estrías.

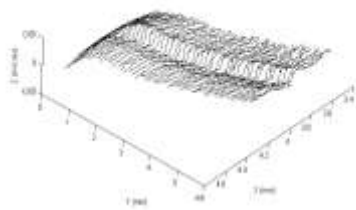


Figura 16a. Reconstrucción tridimensional para una de las estrías

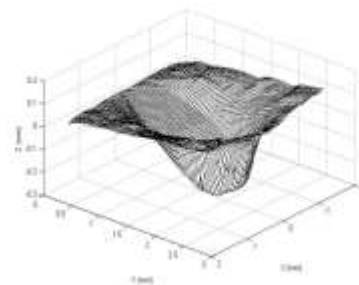


Figura 16b. Reconstrucción tridimensional de la parte inferior de una vainilla

Tabla 2. Profundidad promedio para las estrías de la bala 1

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

En la tabla 3 se muestran todas las características medidas sobre el cuerpo cilíndrico de la bala 2.

Tabla 3. Características medidas sobre la superficie 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°

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 la sección 1. La figura 16b 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.

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

1. Perez Zayra, Romero Lenny. "Sistema óptico de reconstrucción 3D para la detección de ampollas en recubrimientos". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2004.
2. Robayo Dafne, Valderrama Zulma. "Reconstrucción 3D de objetos discontinuos usando el método de código de gris". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2003.
3. A. Patiño, D. Miranda, J. Meneses. "Scanner 3D de objetos a 360° de observación". Revista Colombiana De Física, Vol. 35, No.1. 2003.
4. Castellanos Lilith, Mendieta Edna. "Cotejo balístico mediante procesamiento digital de imágenes". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2001.
5. R. G. Dorsch, G. Hausler, and J. M. Herrmann, "Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement," Appl. Opt. **33**, 1306- (1994)
6. G. Indebetouw, "Profile measurement using projection of running fringes (E)," Appl. Opt. **17**, 2930- (1978)
7. 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)
8. 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)