

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO FUNCIONAL PARA LA
OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE NÚMEROS DE
IDENTIFICACIÓN VEHICULAR.**

**AMBROSIO GÓMEZ AVELLANEDA
ÓSCAR GREGORIO RODRÍGUEZ RUIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2012

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO FUNCIONAL PARA LA
OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE NÚMEROS DE
IDENTIFICACIÓN VEHICULAR.**

**AMBROSIO GÓMEZ AVELLANEDA
ÓSCAR GREGORIO RODRÍGUEZ RUIZ**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

Ph.D. Jaime Enrique Meneses Fonseca

Codirector

Ph.D. Rodolfo Villamizar Mejía.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIAS

El camino hasta acá no hubiese sido posible sin la compañía de aquellos seres maravillosos que Dios puso en mi vida: mi papá, mi mamá, mi hermana, mis tías Myriam y Melba; mi tío Ambrosio Gómez y mi gran abuelita Chelita. A Dios gracias por usarlos como instrumentos de amor y fuente de fuerzas para mí. Este triunfo es para Dios y todos ellos. Solo deseo sigan llenando mi vida como hasta ahora. También a la memoria de mis abuelos Juan Avellaneda y Ambrosio Gómez Prada

Ambrosio Gómez Avellaneda.

*A mis padres que fueron fortaleza en tiempos difíciles,
a mis hermanos, familiares y amigos que estuvieron
presentes para concluir satisfactoriamente
este proyecto.*

Óscar Gregorio Rodríguez Ruiz

AGRADECIMIENTOS

Los autores de éste trabajo de grado expresan sus más sinceros y profundos agradecimientos,

Al Doctor Jaime Enrique Meneses Fonseca por su incansable labor como director, por su infinita paciencia y oportunos consejos que permitieron llevar a feliz término éste proyecto de grado.

Al profesor Carlos Alberto Chacón por su asesoría e importante contribución en el desarrollo de éste trabajo de grado.

Y finalmente a todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron en la consecución de este logro.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DEL MODELO FUNCIONAL.....	19
1.1 ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROBLEMA	19
1.2 PLANTEAMIENTO DEL MODELO FUNCIONAL.	21
1.2.1 Sistema mecánico	22
1.2.2 Sistema Electrónico.....	22
1.2.3 Cabeza óptica	22
2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL	23
2.1 INTRODUCCIÓN.....	23
2.2 DISEÑO DE ESTRUCTURA MECÁNICA.....	23
2.3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN SISTEMA ELECTRÓNICO	25
2.3.1 Análisis y Control del movimiento de la estructura mecánica.....	25
2.3.2 Diseño etapa de potencia para los motores.	32
2.3.3 Interfaz Gráfica.....	34
2.3.4 Selección tipo de comunicación a usar.	34
2.3.5 Establecimiento de la comunicación serial.	35
2.3.6 Implementación de las funciones de interacción en la interfaz.....	36
2.3.7 Estrategia de programación de funciones dentro de la interfaz.....	38
2.3.8 Implementación de la captura de imágenes dentro de la interfaz.	41
2.4 DISEÑO SENSOR ÓPTICO	43
2.5 PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.	46
3. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR PROYECCIÓN DE FRANJAS.	49
3.1 INTRODUCCIÓN.....	49
3.2 CONCEPTOS GENERALES	52

3.3 EXTRACCIÓN DE FASE POR EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER.	55
3.4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL.....	57
4. EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.....	59
4.1 INTRODUCCIÓN.....	59
4.2 SELECCIÓN DEL PATRON DE MEDIDA	60
4.3 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DEL PATRÓN DE MEDIDA Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	60
4.4 OBTENCIÓN DE IMAGEN 3D TOTAL MEDIANTE EL MÉTODO ITERATIVE CLOSEST POINT.....	62
4.5 REPETIBILIDAD, RESOLUCIÓN Y EXACTITUD DEL SISTEMA.....	65
5. RECONSTRUCCIÓN 3D DE NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN VEHICULAR Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
5.1 INTRODUCCIÓN.....	72
5.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DEL VIN.	72
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
6. CONCLUSIONES.....	81
7. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vehicle Identification Number (VIN).	20
Figura 2 Estructura mecánica empleada.....	24
Figura 3 Motor para trasladar sistema en el eje X.....	26
Figura 4. Secuencia de paso completo en sentido horario.	28
Figura 5. Secuencia de paso completo en sentido anti-horario.....	29
Figura 6. Esquema de la estrategia de programación.	31
Figura 7. Circuito puente H.....	32
Figura 8. Esquema eléctrico para generar movimiento requerido del sistema.	33
Figura 9. Conexión circuito MAX 232.	35
Figura 10. Interfaz gráfica y Panel de botones.....	37
Figura 11. Esquema programación interfaz.....	40
Figura 12. Menú desplegable para selección de cámara.	41
Figura 13. Funciones para nombre de imagen y selección de directorio.....	42
Figura 14. Interfaz gráfica completa.....	43
Figura 15. Ubicación sensor óptico en estructura mecánica.	44
Figura 16. Superficie plana adquirida por la cámara CCD al proyectar franjas.	45
Figura 17. Sistema para reconstrucción tridimensional por proyección de franjas.	51
Figura 18. Patrón de franjas para incidir sobre un objeto.....	52
Figura 19. Forma en que actúa el sistema proyector de franjas.	53
Figura 20. Codificación de la altura Z en fase en un sistema de proyección de franjas.....	54
Figura 21. Transformada de Fourier de una imagen.....	56
Figura 22. Curva de calibración experimental para un pixel.	58
Figura 23. Reconstrucción tridimensional de un patrón de medida.....	59
Figura 24. Reconstrucción 3D patrón de medida.	61
Figura 25. Acercamiento y unión de imágenes.....	64
Figura 26. Variación coordenada Z en el tiempo bajo condiciones estáticas.....	66
Figura 27. Variación distancia promedio entre dos puntos bajo condiciones estáticas.....	67
Figura 28. Variación coordenada Z con respecto a posición de referencia bajo condiciones dinámicas.	68
Figura 29. Error absoluto en cada traslación.....	69
Figura 30. Reconstrucción tridimensional del escalón.....	70
Figura 31. Corte transversal a R3D del escalón.	71
Figura 32. Imagen del VIN adquirida con el modelo funcional.	73
Figura 33. Fase continua obtenida de una imagen del VIN.	74
Figura 34. Reconstrucción 3D de números de identificación vehicular.....	75

Figura 35. Reconstrucción 3D VIN no modificado.....	76
Figura 36. Área ocupada por cada dígito del VIN.....	78
Figura 37. Reconstrucción 3D del VIN adulterado.....	79
Figura 38. Selección del directorio.....	90
Figura 39. Visualización de la cámara.....	91
Figura 40. Panel de botones. Función inicio.....	91
Figura 41. Interfaz gráfica completa.....	92
Figura 42. Panel de botones. Función pausa.....	93
Figura 43. Panel de botones. Función reinicio.....	93
Figura 44. Cuadro de diálogo de error.....	94
Figura 45. Esquemático del circuito implementado.....	95
Figura 46. Tarjeta usada para la programación del micro-controlador.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros cámara CCD usada.	46
Tabla 2. Pruebas de tiempo óptimo para captura de imágenes.	47
Tabla 3. Clasificación de los métodos ópticos para sistemas de reconstrucción 3D.	50
Tabla 4. Profundidad de cada dígito del VIN reconstruido.	77
Tabla 5. Área y distancia entre centros para VIN no modificado.	78
Tabla 6. Profundidades VIN adulterado.	80

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO.....	88
ANEXO B.ESQUEMA DEL CIRCUITO IMPLEMENTADO EN EL MODELO FUNCIONAL.	95

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO FUNCIONAL PARA LA OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN VEHICULAR*

AUTORES: AMBROSIO GÓMEZ AVELLANEDA, OSCAR GREGORIO RODRÍGUEZ RUÍZ**

PALABRAS CLAVE: Reconstrucción tridimensional, Modelo funcional, Topografía, Número de identificación vehicular, proyección de franjas.

Este proyecto de grado trata de implementar un modelo funcional, compuesto por módulos mecánico, eléctrico y óptico para la extracción de información topográfica de números de identificación vehicular. El modelo funcional contiene una interfaz gráfica que permite al usuario manejarlo mediante el uso de funciones de encendido, pausado y reinicio. Se comienza por diseñar cada módulo, explicando de forma general la estrategia seguida para la implementación de la funciones de la interfaz gráfica y características del sensor óptico usado. Mediante este modelo, se barre la superficie del número de identificación vehicular, adquiriendo imágenes a través del uso de la comunicación serial. Una vez explicada la implementación del modelo funcional, se procede a revisar su adecuado trabajo. Luego de adquirir las imágenes, se hace una introducción sobre la técnica de reconstrucción tridimensional por proyección de franjas, mediante la cual se recupera la información topográfica buscada. Con lo anterior se procede a caracterizar el modelo funcional mediante pruebas de repetitividad, resolución y precisión, usando patrones de medida elaborados con gran exactitud, para obtener un análisis de error en la influencia de las componentes eléctrica y mecánica. Luego, se muestra el 3D del número de identificación vehicular para concluir un error de medición del 10% en la obtención de la coordenada Z. También se incluye un análisis de las principales características topográficas del número de identificación vehicular. Y por último, se plantean mejoras que permitan dar un mejor enfoque de lo que será el dispositivo final.

*Trabajo de Grado

**Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Jaime Enrique Meneses Fonseca. Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FUNCTIONAL MODEL TO OBTAIN TOPOGRAPHIC INFORMATION OF VEHICLE IDENTIFICATION NUMBERS *

AUTHORS: AMBROSIO GÓMEZ AVELLANEDA, OSCAR GREGORIO RODRÍGUEZ RUÍZ**

KEY WORDS: Three-Dimensional reconstruction, Functional model, Topography, Vehicle identification number, fringe projection.

This work studies the implementation of a functional model composed by electrical, mechanical and optical modules for the extraction of topographic information on vehicle identification numbers. The functional model contains a graphic interface that allows the user to manipulate the functional model through the use of functions such as Play Pause and Reset. This process begins by designing each module generally explaining the strategy for the implementation on interface functions and main features of the optical sensor. The functional model sweeps the vehicle's surface identification number acquiring images by using serial communication. After explaining the implementation of the functional model then we can proceed to revise its proper functioning. After acquiring the images, an introduction will be presented about the art of three-dimensional reconstruction by fringe projection, which retrieves topographic information sought. With the previous introduction we can proceed to characterize the functional model by testing the resolution's repeatability and precision measurement by using patterns made with precision in order to obtain an error analysis and electric influence of the mechanical and optical components. Finally the 3D of the vehicle identification number will be show to conclude a measurement error of 13um in obtaining the coordinate Z. Also an analysis of the topographic features of the vehicle identification number is included so it is easier to plan improvements that will allow us to obtain a better approach to what will be the final device.

*Work Degree

**Faculty of Physico-Mechanical Engineering's. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Jaime Enrique Meneses Fonseca. Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el desarrollo de un modelo funcional que permite obtener información topográfica de números de identificación vehicular (VIN) con el fin de detectar posibles alteraciones del mismo. La obtención de dicha información se realiza mediante la técnica de reconstrucción tridimensional, la cual ya ha sido utilizada en trabajos previos a éste y ha arrojado resultados interesantes que permiten verificar alteraciones del VIN.

Por tanto, se sienta una base a la posibilidad de implementar una herramienta que permita contribuir de algún modo al creciente problema del robo de carros, si se tiene en cuenta que el VIN es único para cada vehículo y que se ha demostrado que cuando se hurtan los automóviles, los bandidos alteran uno o más dígitos para así cambiar completamente el carro y desviar la atención de las autoridades. El parque automotor de vehículos retenidos por la CTI-Fiscalía de Bucaramanga en estado de valoración legal, requiere con prontitud un dispositivo que permita verificar rápidamente posibles alteraciones en el VIN, para a partir de esta información proceder de algún modo en esta difícil problemática.

Dicho dispositivo se debe realizar, pensando en que resulte amable para el usuario y permita emplear la técnica de reconstrucción tridimensional teniendo en cuenta que quien lo opere, no necesariamente conocerá sus fundamentos.

Aun así, la idea de un dispositivo listo para llevar al comercio o para ser usado con la finalidad mencionada implica distintos factores como tiempo, recursos y definir las condiciones apropiadas de operatividad. De esta manera surge éste proyecto de grado, con el que se pretende implementar un primer modelo para la obtención de información 3D donde se imponen condiciones únicamente asociadas a la calidad de la imagen topográfica obtenida. Otras condiciones finales asociadas a maniobrabilidad, robustez, adaptación al entorno de trabajo serán implementadas en etapas futuras del proceso.

El diseño del primer modelo del dispositivo final, incluye un sistema electro-mecánico que permite barrer la región que contiene el VIN, mediante la traslación de una cabeza óptica que incluye tanto el sistema proyector de franjas como una cámara CCD para la captura de imágenes digitales. Una vez se ha barrido la región y se han obtenido las imágenes, se realiza la reconstrucción tridimensional y se analizan los resultados obtenidos para verificar el estado de determinado VIN.

Así mismo, se da al usuario, la posibilidad de manipular el mecanismo mediante la implementación de una interfaz gráfica que contiene funciones básicas como encendido, pausa y reinicio. Lo anterior brinda mayor comodidad al operario del dispositivo.

1. ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DEL MODELO FUNCIONAL

1.1 ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROBLEMA

El número de identificación vehicular (VIN) es, haciendo una analogía, lo mismo que a una persona es su huella dactilar. De ahí que al quererse identificar si un vehículo pertenece a determinada persona se tome como decisión inmediata identificar el estado del VIN.

Los tres primeros dígitos del VIN identifican al fabricante del vehículo mediante el uso del identificador de fabricante mundial o código WMI, el cual establece que el primer carácter del VIN contiene información sobre la región de ubicación del fabricante. Por ejemplo, para Suramérica se tienen los dígitos 8 y 9, o para Estados Unidos el 1.

Cada fábrica ensambladora tiene un carácter que le identifica. Por ejemplo, para General Motors, el carácter G. Luego 1G significa: un automóvil ensamblado en Estados Unidos por General Motors. El tercer carácter del VIN indica el tipo de vehículo, si es un bus, carro familiar, camión, etc.

Del cuarto al octavo dígito del VIN se encuentra información sobre características del vehículo tales como chasis, tipo de motor, carrocería, modelo, etc. El noveno carácter es un verificador. El décimo indica el año de fabricación, y aunque hay años como 1980 y 2010 que tienen el mismo dígito, la diferencia se encuentra en el modelo del vehículo. El décimo primer carácter indica el número de la planta donde fue ensamblado.

De los dígitos décimo-segundo a décimo-séptimo, se encuentra información correlativa a la secuencia de fabricación, la cual es única para cada vehículo, y con la que se puede identificar fácilmente un carro en particular, ahorrando tiempo

y recursos inspeccionando los demás dígitos. Además, vale la pena agregar, que con frecuencia son éstos últimos 6 dígitos los alterados en vehículos robados. En la figura 1 se muestra un VIN.

Figura 1. Vehicle Identification Number (VIN).



Fuente: <http://www.lesabret-type.com/VinCodes.html>

Dado lo anterior, se considera estudiar la topografía del VIN en sus últimos 6 dígitos con el fin de lograr la reconstrucción tridimensional del mismo. Dicha reconstrucción 3D se obtiene con el método de proyección de franjas [1].

Para implementar el método de proyección de franjas se requiere de una cámara CCD y un sistema proyector de franjas (conjunto al que se le conoce como sensor óptico ó cabeza óptica) [1]. Para obtener la reconstrucción tridimensional se pone el objeto de estudio sobre el plano de referencia y se hacen incidir sobre éste las franjas, para luego, mediante movimientos acordes a la resolución del sistema, obtener imágenes bidimensionales que al ser procesadas, permiten recuperar información topográfica del objeto la cual se halla implícita en la deformación que sufren las franjas cuando inciden sobre el objeto de estudio.

Trabajos realizados al interior del GOTS [1] [2] [3] [24] en condiciones de laboratorio han demostrado que el VIN posee una longitud de 10 [cm], un ancho de 2 [cm] y una profundidad de máximo 1 [mm]. También se concluyó que la resolución apropiada para la R3D por triangulación láser, es del orden de 50 [μm].

De esta manera con un sensor 3D clásico, dicha resolución se obtiene en un campo máximo de 5×5 [mm^2], se evidencia, que el usuario debería trasladar el sistema de proyección en intervalos de distancia que no superan 3 [mm], puesto que la cámara CCD no permitirá abarcar una mayor, por las razones ya expuestas.

De ahí surge la necesidad de implementar un sistema que permita mover el sensor 3D cada cierta distancia, hasta barrer toda la región en la que se encuentra el VIN para luego realizar la reconstrucción 3D.

Planteada la anterior situación, se tiene una visión más específica generada por las condiciones metrológicas del R3D, que permite concluir los primeros requerimientos del dispositivo. De éste modo se procede a plantear un esquema general del modelo a diseñar.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL MODELO FUNCIONAL.

Con base a los requerimientos presentados en la sección anterior, y teniendo en cuenta la necesidad que tiene el usuario de tener control sobre el dispositivo, se plantean tres módulos importantes dentro de todo el proceso: un sistema mecánico que garantice las características del movimiento y permita trasladar la cabeza óptica. El segundo, es un sistema electrónico, el cual contiene la programación del movimiento requerido, etapas de potencia y toda la programación de la interfaz para el usuario. Por último se tiene la cabeza óptica, donde se definen parámetros propios del proceso para la obtención de la información 3D.

A continuación se define de forma general lo implementado en cada uno de los módulos:

1.2.1 Sistema mecánico

Este módulo está conformado por la estructura rígida que contienen los motores que permiten la traslación y soporte del sensor 3D. Las dimensiones y formas de las partes del módulo mecánico dependen de las condiciones metrológicas, en especial del campo de exploración y dimensiones del sensor 3D.

1.2.2 Sistema Electrónico

En este módulo, está contenida la estrategia de programación de los movimientos, la estrategia de control usada, y los circuitos eléctricos implementados para el movimiento de los motores.

De igual modo se incluye el método usado para la realización de la interfaz de usuario, los módulos usados, y la forma cómo se establece la comunicación serial, base de la interfaz.

1.2.3 Cabeza óptica

En este módulo, se incluye la calibración de la cámara, la forma cómo se implementa la captura de imágenes dentro de la interfaz, así como la estrategia seguida para la proyección de las franjas y su tratamiento digital.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL

2.1 INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior se describió de forma general cada uno de los módulos a implementar dentro del modelo funcional. Y antes de entrar en detalles sobre el diseño e implementación de cada uno de éstos, se describe de modo general la forma en que se realiza el movimiento del dispositivo.

Las condiciones de resolución explicadas anteriormente implican que para abarcar toda el área de 20 [cm²] se requieren 180 campos de exploración. Con esto, una estrategia adecuada para el movimiento es, barrer la región sobre el eje X hasta completar los 10 [cm], y luego, desplazar sobre el eje Y 5 [mm], barrer de nuevo el eje X y así sucesivamente hasta completar los 2 cm en el eje Y. De éste modo se barre toda la región con la resolución adecuada y se tendrá una imagen grande, a excelente resolución.

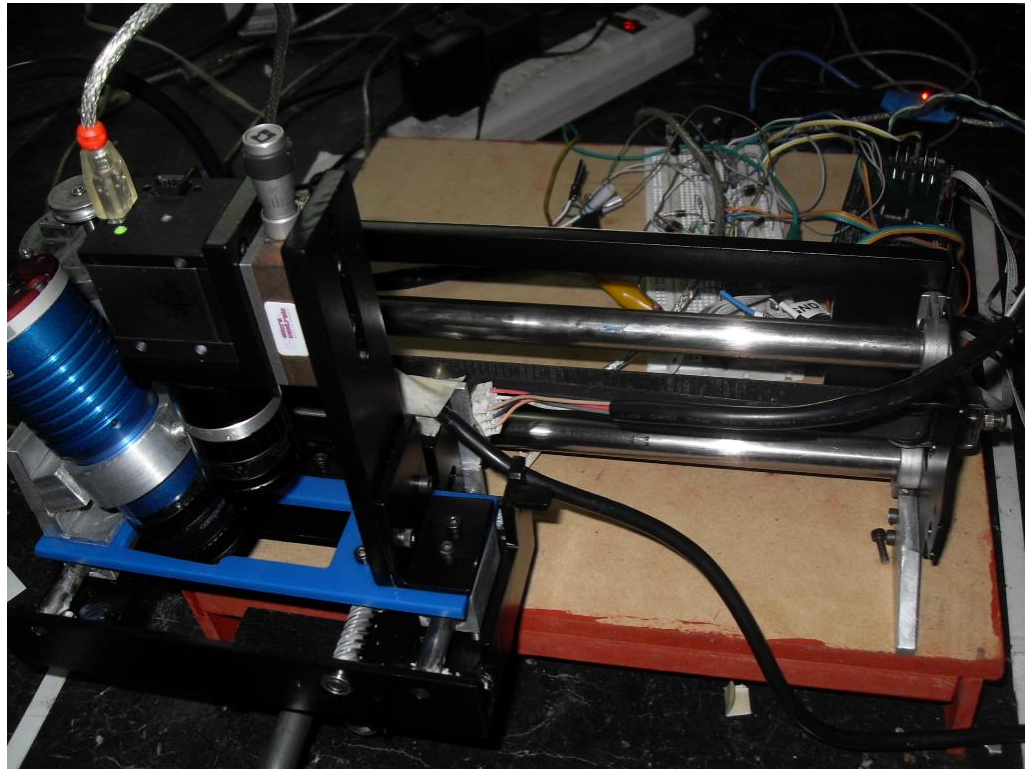
2.2 DISEÑO DE ESTRUCTURA MECÁNICA.

Para la construcción de la estructura mecánica se deben emplear dos motores de paso. Uno para mover el sistema sobre toda la longitud, denotado eje X, y otro para avanzar sobre el ancho, denotado eje Y.

El sistema mecánico consta de una estructura metálica que sirve de soporte a dos guías sobre las cuales se halla un soporte rectangular que contiene el sensor 3D. El motor en X mueve todo el soporte rectangular a través de las dos guías, mediante una correa que es atada entre su eje y el extremo opuesto de la estructura metálica. Por otro lado, el motor del eje Y mueve tan solo el sensor 3D.

Para ello se usa un tornillo sin fin el cual se acopla a su eje. En la Figura 2 se muestra la estructura mecánica implementada.

Figura 2 Estructura mecánica empleada.



Fuente: Autores.

Dada la anterior descripción, se hace evidente que el motor que mueve sobre el eje X requerirá un mayor torque, pues moverá la estructura rectangular y la cabeza óptica. Mientras que el motor del eje Y, tan solo debe mover la cabeza óptica.

2.3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN SISTEMA ELECTRÓNICO

2.3.1 Análisis y Control del movimiento de la estructura mecánica.

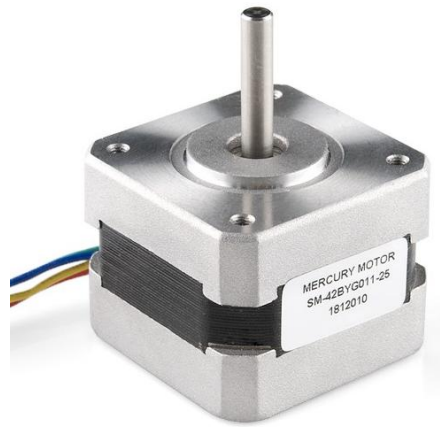
Para tener un control adecuado del movimiento, es necesario comprender el funcionamiento de los motores empleados. Se han escogido motores paso a paso, dada la precisión que tienen y la facilidad de control que poseen.

Los motores paso a paso [4], constan de 4 bobinas en el estator que al ser energizadas generan movimiento en el rotor. Cada motor tiene un desplazamiento por paso determinado, y puede estar comprendido entre 1.8° y 90° . Cuando son 90° por paso, el motor requerirá 4 pasos para completar un giro, mientras que cuando son 1.8° serán necesarios 200 pasos (360°).

Con el análisis anterior, se hace aún más evidente la facilidad de usar motor paso-paso, dado que al medir la distancia lineal que avanza el sistema con un paso del motor, se puede determinar los pasos necesarios para recorrer los 5 [mm] buscados.

Dependiendo del acople que tiene el eje motor, se puede calcular fácilmente dicha distancia lineal. Para el caso del motor del eje X, se tiene un acople circular, sobre el cual es puesta una correa que transporta la estructura rectangular. Vale la pena agregar que M1 es de tipo unipolar.

Figura 3 Motor para trasladar sistema en el eje X.



Fuente: Autores

La placa que contiene el motor X, contiene información relevante del motor: voltaje y corriente nominales, así como el ángulo por paso del motor. Este último dato es importante, pues como ya se mencionó puede servir para calcular la distancia lineal. Para este caso se tiene 1.8° por paso.

Teniéndose el ángulo de desplazamiento y el radio de la circunferencia, se puede obtener la distancia lineal usando la fórmula del arco de una circunferencia, la cual establece que la distancia lineal viene dada por el producto del ángulo en radianes y el radio de la circunferencia.

$$S = \frac{\pi}{100} \cdot 6.4 \cdot 10^{(-3)} = 201.062 [\mu m]$$

El anterior cálculo implica que para cubrir los 5 [mm] sobre el eje X, serán necesarios 25 pasos del motor. Para el motor que mueve el sistema sobre el eje Y, se sigue un procedimiento similar, tan solo teniendo en cuenta que ahora son 7.5° por paso. Después de realizar el análisis, se obtiene un avance de 5 [mm] con 30 pasos.

Ya sabiendo los pasos necesarios para cubrir la distancia requerida, se necesita tener en cuenta que cada 5 [mm] se adquiere una imagen, lo cual supone que se debe detener el motor por un tiempo dado y así garantizar la adecuada captura y almacenamiento de la imagen.

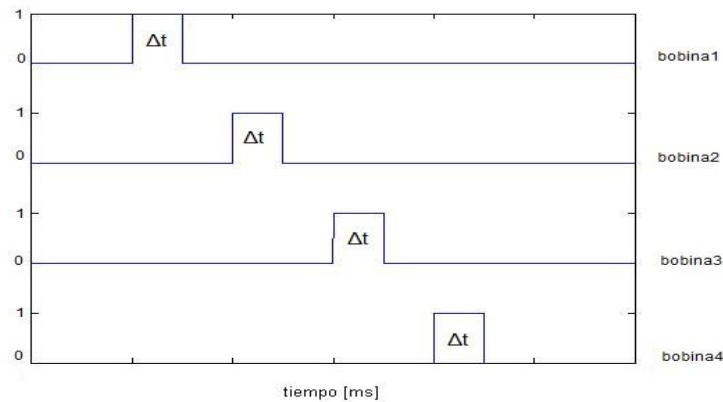
Todos estos requerimientos conllevan al modelamiento de un mecanismo de control que garantice:

- Avance lineal de 5 [mm] en el eje X (25 pasos del motor X).
- Detención del movimiento por un tiempo necesario para garantizar la captura y almacenamiento de las imágenes.
- Al completarse los 10 [cm] sobre el eje X avance de 5 [mm] en el eje Y.
- El motor regrese haciendo la misma secuencia que el ítem 1.
- Repetir los 4 ítems anteriores hasta completar los 2 [cm] sobre el eje Y.

Para generar las rutinas de movimiento especificadas, es necesario tener en cuenta que los motores paso a paso avanzan conforme se energizan sus bobinas [4]. Por eso es usual generar trenes de pulsos para controlar el movimiento. Estas señales son producidas según la necesidad del caso, ya que se puede dar pasos completos o medios pasos. Para éste caso en particular, se generarán pulsos de paso completo. Esto supone un control de tipo digital, luego el uso de un micro-controlador resulta una solución adecuada para realizar el control del movimiento.

Si se asigna a cada una de las 4 bobinas del motor un pin del micro-controlador, se puede generar la secuencia de pulsos de manera independiente para cada una. La secuencia de pulsos para generar movimientos de paso completo es mostrada en la figura 4.

Figura 4. Secuencia de paso completo en sentido horario.



Fuente: Autores.

Si inicialmente las 4 bobinas no están energizadas, el motor estará estático. Una vez un pulso llega a la bobina 1, se genera un movimiento en sentido horario. El motor permanecerá en la posición dada por la bobina 1 mientras se mantenga en alto su señal de activación y además, ninguna otra bobina sea energizada.

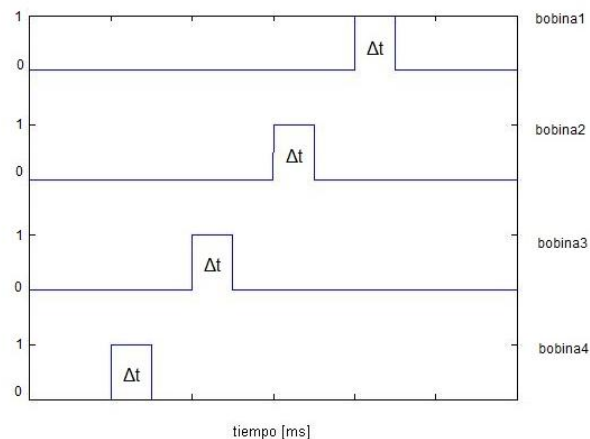
En el mismo instante en que es activada la bobina 2, se hace cero la bobina 1; lo anterior se hace para garantizar que se dé un paso completo, ya que si no es desactivada la bobina 1, el motor daría medio paso (estarían en alto tanto la bobina 1 como la 2). De igual forma, si la bobina 1 se hace cero y se deja un tiempo antes de activar la bobina dos, el motor quedará libre para girar a cualquier lado. De ahí la importancia de hacer el cambio de bobinas en el mismo instante de tiempo.

Con los pulsos mostrados en la figura 4, se garantizan 4 pasos del motor. Entonces se requieren dos ciclos y medio como éste para completar los 25 pasos

antes de la captura de las imágenes. Luego, 50 secuencias como la descrita, aseguran el barrido de los 10 [cm] establecidos.

Una vez se ha completado el recorrido sobre todo el ancho de la región, se debe activar el motor del eje Y para que dé 30 pasos. A continuación el control debe garantizar de nuevo el barrido sobre el eje X, pero esta vez en sentido contrario, con la secuencia mostrada en la Figura 5:

Figura 5. Secuencia de paso completo en sentido anti-horario.



Fuente: Autores

Ahora las bobinas son activadas de la 4 a la 1. De esta manera, el motor girará en sentido contrario y se devolverá haciendo el barrido en X. De nuevo se debe garantizar una pequeña pausa para la captura de imágenes.

La pausa, durante la que se hace la toma de las imágenes, consiste en mantener por un tiempo determinado el motor en cierta posición. La definición del tiempo más óptimo, se hace durante la calibración del sistema, basados en la rapidez de la cámara, se fija un tiempo arbitrario de 0.5 [s].

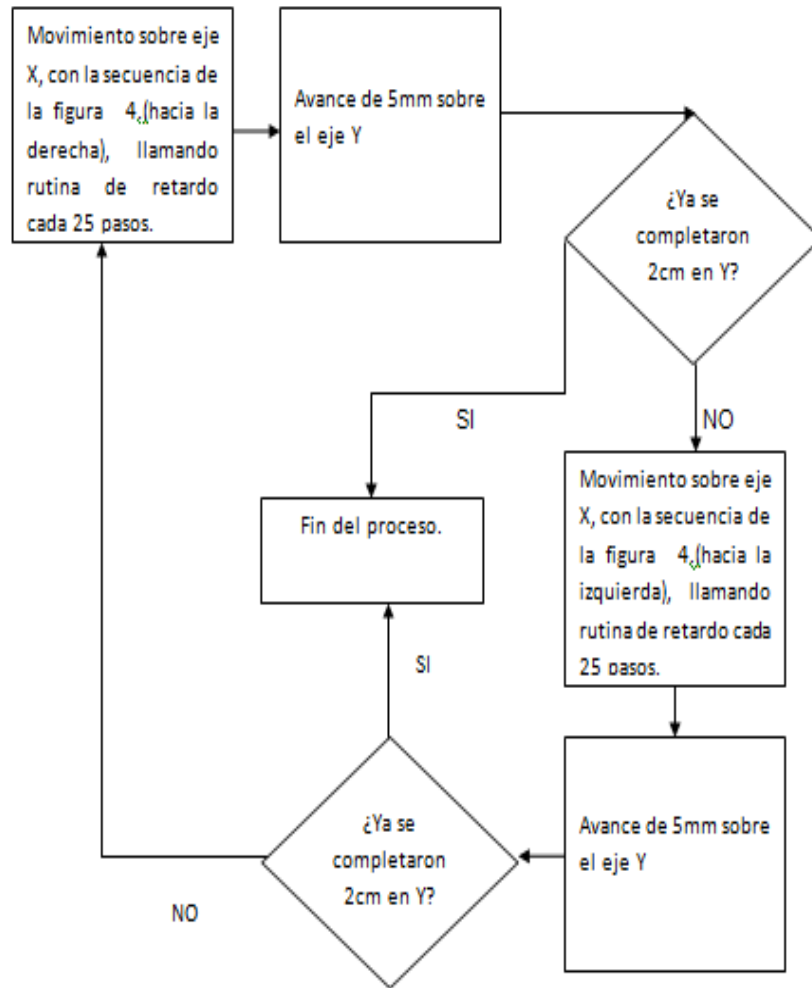
Entonces, una vez definido lo anterior, se procede a escoger 8 pines del micro-controlador para fijarlos como las entradas de alimentación de cada una de las bobinas de los motores.

La programación de las señales de pulsos, deben contener una función de retardo, la cual al ser llamada, permita mantener el motor en una posición determinada durante un tiempo establecido por el programador.

Así mismo, se puede introducir un pequeño retardo entre cada cambio de posición, para evitar la pérdida de pasos.

La estructura general de la programación contiene dos rutinas básicas: una para movimiento hacia la derecha, y otra para el movimiento en sentido contrario. Entre las dos anteriores rutinas, existe una que se ocupa del manejo del motor del eje Y. En la figura 6 se ilustra con un esquema la estrategia de programación seguida.

Figura 6. Esquema de la estrategia de programación.



Fuente: Autores.

Una vez programadas las secuencias, se debe empezar a solucionar un siguiente inconveniente que consiste en que el micro-controlador no podrá mover directamente los motores. Se requieren, entonces, etapas de potencia para amplificar la corriente que llegará a las bobinas, dado que las obtenidas a la salida del micro-controlador son del orden de los microamperios, mientras que los motores requieren entre 0.5 [A] y 1 [A].

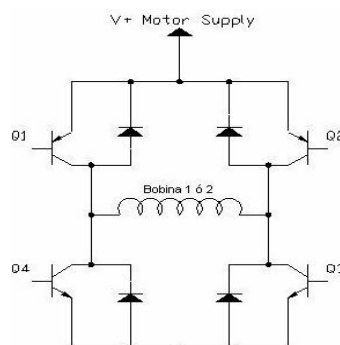
2.3.2 Diseño etapa de potencia para los motores.

Ya habiéndose programado los movimientos requeridos, se procede a garantizar que la corriente que llega del micro-controlador sea suficiente para mover los motores. Se procede a estudiar las características nominales de cada uno de los motores para seleccionar las etapas de amplificación necesarias.

Para el motor que mueve el sistema sobre el eje X se tiene una corriente nominal de 1 [A] y una alimentación de 5 [V]. La amplificación de corriente de un motor de éstas características se puede hacer mediante el uso de circuitos puente H [4] [5] como el mostrado en la figura 6. El integrado L293 tiene las características necesarias para el manejo del motor X, entrega una corriente de hasta 1.2 A y soporta un voltaje de entrada entre 4.5 y 36V.

Para el caso del motor del eje Y se requiere menos corriente. Según las características nominales que aparecen en la placa del motor 0.5 [A] son requeridos a un voltaje de alimentación de máximo 24 [V]. Un integrado ideal para este caso es el ULN2803, dado que genera la corriente necesaria y soporta un voltaje de entrada de más de 30 [V].

Figura 7. Circuito puente H.

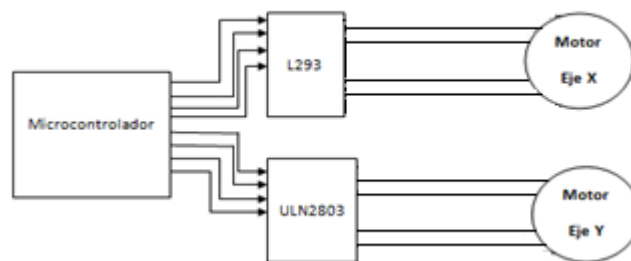


Fuente: Autores

Seleccionados los dos integrados para amplificar la corriente de los motores, se puede hacer un primer esquema del circuito requerido para garantizar el movimiento. Dicho esquema, es mostrado en la figura 8.

El esquema eléctrico planteado, muestra un micro-controlador que contiene programadas las secuencias de movimiento requeridas. A continuación se observa la etapa de potencia formada por los integrados L293 y ULN2803, y por último se tienen los dos motores que están contenidos en la estructura mecánica.

Figura 8. Esquema eléctrico para generar movimiento requerido del sistema.



Fuente: Autores.

Teniéndose programados las secuencias de movimientos y habiéndose implementado la etapa de potencia, la siguiente necesidad es dar al usuario la posibilidad de manejar el modelo implementado. Dicha posibilidad, se puede brindar por medio de una interfaz de usuario, con la cual se tenga la posibilidad de manejar funciones básicas como encendido, pausado y reinicio. En la siguiente sección se estudia más en detalle la interfaz realizada.

2.3.3 Interfaz Gráfica.

Con el fin de obtener un mejor funcionamiento, se realiza una interfaz gráfica que permita al usuario una interacción más sencilla con el dispositivo. Esta interfaz consta principalmente de la selección de la cámara y posterior visualización, además de otras funciones como la comunicación con el micro-controlador, y las funciones de inicio, pause y reinicio.

La interfaz gráfica propuesta se construyó en el software MATLAB, debido a que el procesamiento de la información para obtener la reconstrucción tridimensional se hace precisamente en ese mismo software.

Las funciones inicio, pause y reinicio, se implementan en un panel de botones y funcionan de la siguiente manera

- **Inicio:** Inicializa el proceso. Los motores comienzan a desplazarse realizando un barrido a la superficie y además adquieren las imágenes que posteriormente se utilizan para obtener la reconstrucción 3D.
- **Pausa:** Detiene el proceso de movimiento y adquisición.
- **Reinicio:** Reinicia el proceso cuando el usuario lo considere pertinente por determinada causa.

En la siguiente sección se explica detalladamente el diseño de la interfaz.

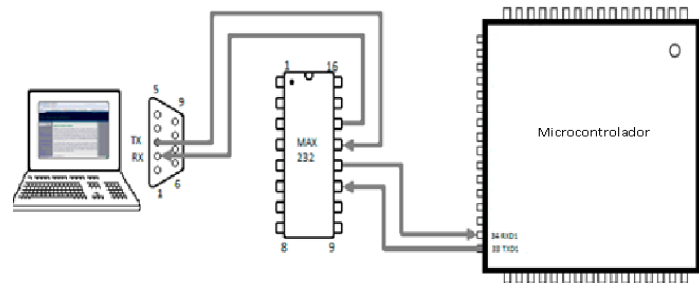
2.3.4 Selección tipo de comunicación a usar.

El intercambio de información entre diferentes dispositivos permite crear aplicaciones más robustas. Como en este caso se desea controlar el sistema mecánico con las funciones encendido, pausa y reinicio, se escoge un tipo de comunicación que permita comunicar la interfaz con el micro-controlador. Dadas

las características del sensor óptico resultaría poco productivo implementar una comunicación inalámbrica, ya que la cámara CCD es de tipo USB y actualmente no es posible adquirir una de tipo inalámbrico, luego sería necesario limitar el manejo del dispositivo a la distancia del cable de la cámara CCD. Por lo anterior se utiliza la comunicación serial ya que tanto el micro-controlador como el software MATLAB soportan el protocolo RS-232 [6].

Para solucionar el problema de conversión de voltajes TTL a voltajes RS-232 se implementa un MAX 232 tal como se muestra en el circuito de la Figura 9. Además se implementa un adaptador RS232-USB para realizar la comunicación.

Figura 9. Conexión circuito MAX 232.



Fuente: Autores.

2.3.5 Establecimiento de la comunicación serial.

Implementar de una forma adecuada y eficiente la comunicación serial, es la base de la interfaz gráfica ya que de ahí depende el control del sistema mecánico. La comunicación serial entre el micro-controlador y MATLAB es bidireccional, ya que una vez se presione cualquier botón, MATLAB es el transmisor (TX) y el micro-

controlador es el receptor (RX); en el caso contrario, cuando se requiere adquirir las imágenes, MATLAB es el receptor (RX) y el micro-controlador es el transmisor (TX).

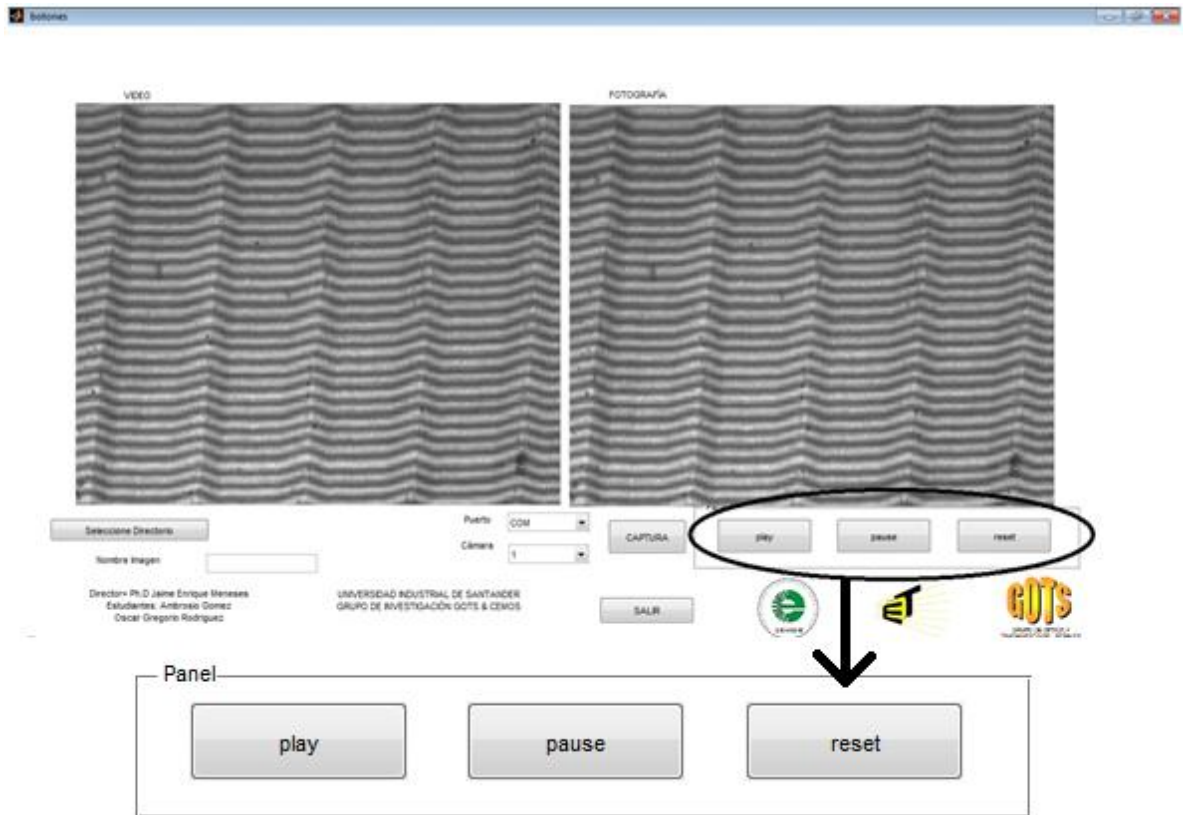
La configuración del puerto serial en MATLAB [7] comprende inicialmente la comprobación de los puertos disponibles. Una vez comprobado se crea el puerto serial y se configura la velocidad de baudios a 9600, el número de bits por dato a 8, el control de flujo y el bit de parada a 1. Después se abre el puerto y se configura el carácter que se desea transmitir o la variable que se desea recibir. Es importante tener en cuenta que el micro-controlador está enviando código ASCII. Finalmente se cierra el puerto serial cuando es cerrada la aplicación.

Para la configuración del micro-controlador [8], [9] se inicializa el módulo SCI, y se configura la velocidad de transmisión o recepción. Se selecciona el divisor de tasa de baudios a 28 y se obtiene una velocidad aproximada de 9600. El micro controlador debe transmitir y recibir a la misma velocidad que se configura en la interfaz gráfica. De forma análoga, se configuran otras características, tales como: no uso de Bits de paridad, numero bits por dato, y habilitación del pin de recepción del micro-controlador. De este modo, se configura la comunicación serial.

2.3.6 Implementación de las funciones de interacción en la interfaz.

Las tres funciones a implementar (encendido, pausa, reinicio), son puestas en modo gráfico y debidamente identificadas mediante el uso de los botones mostrados en la Figura 10:

Figura 10. Interfaz gráfica y Panel de botones.



Fuente: Autores.

Cada vez que se pulsa un botón, este enviará un carácter al micro-controlador e inmediatamente el sistema mecánico tendrá una respuesta. Si se presiona *play*, *pause* o *reset* se enviarán 2, 4 y 8 respectivamente a través de la comunicación serial. Para que el micro-controlador pueda interpretar el carácter enviado en cualquier instante, se requiere utilizar interrupciones que permiten abandonar cualquier rutina dentro del programa principal para atender la interrupción. Para este caso particular se requiere una rutina de interrupción por recepción de datos.

La rutina de interrupción [8] consiste en que cada vez que se reciba un dato, éste sea comparado con los números 2, 4, y 8, y dependiendo del valor se activen

banderas internas, para así, dentro del programa principal ejecutar la rutina requerida.

La estructura de la programación realizada, es resumida en la Figura 11 mediante un esquema que describe la dinámica del programa. Aquí se incluyen además de las funciones del dispositivo, las secuencias de movimiento previamente explicadas.

El esquema muestra en primera instancia la atención a la rutina de interrupción con el fin de establecer la tarea que se debe ejecutar. Como se puede observar, para cada una de las alternativas de datos existe determinada secuencia.

En el caso de la función *play* se inicia el proceso de barrido de toda la región en la que se halla el VIN. Tres rutinas entran a ser utilizadas aquí, las dos del movimiento sobre el eje X (sentido horario, y sentido anti-horario), y la de movimiento sobre el eje Y.

Siempre que se produce el avance sobre el eje Y, se verifica si ya se ha completado la región que se desea barrer. De ser así, automáticamente el proceso finaliza y regresa a la posición inicial.

Durante la ejecución de estas rutinas, se está verificando si ha llegado un nuevo dato por medio de la interrupción. Cuando esto sucede, y el valor de dato es 4 u 8, se ejecutan las rutinas señaladas.

2.3.7 Estrategia de programación de funciones dentro de la interfaz.

Para la programación de cada una de las funciones dentro del micro-controlador, se diseñaron estrategias basadas en máquinas de estado y diseño de circuitos digitales [10], [11]. Aunque sería muy extenso incluir cada módulo en detalle, se dará una idea general de la forma en que fue programado cada uno de éstos.

Para la función *play* se tiene un selector con cuatro entradas, las cuales son las señales de activación de cada bobina. Dicho selector es manejado con un contador módulo cuatro, cada valor del contador es asignado a una entrada del selector.

A parte del contador módulo 4 que controla los pasos del motor X, se tiene otro módulo 25 con el que se controla la captura de imágenes. Cada vez que éste contador se hace 25, significa que el motor ha dado 25 pasos, luego se han avanzado los 5 [mm]. En ese preciso instante se transmite el carácter "I" y de ésta manera MATLAB activa la rutina de adquisición de la cámara CCD.

Existe otro contador con el cual se controla el momento de avanzar sobre el eje Y, dado que se conoce el número de pasos totales para cubrir la longitud del VIN, para este caso 500 pasos, luego cuando el contador llegue a ese valor será el momento de activar el motor Y.

Una vez se ha avanzado en Y el contador módulo cuatro hace un conteo en sentido contrario para garantizar que el motor tenga un movimiento opuesto, para ello se emplea una señal que al estar en alto activa la secuencia.

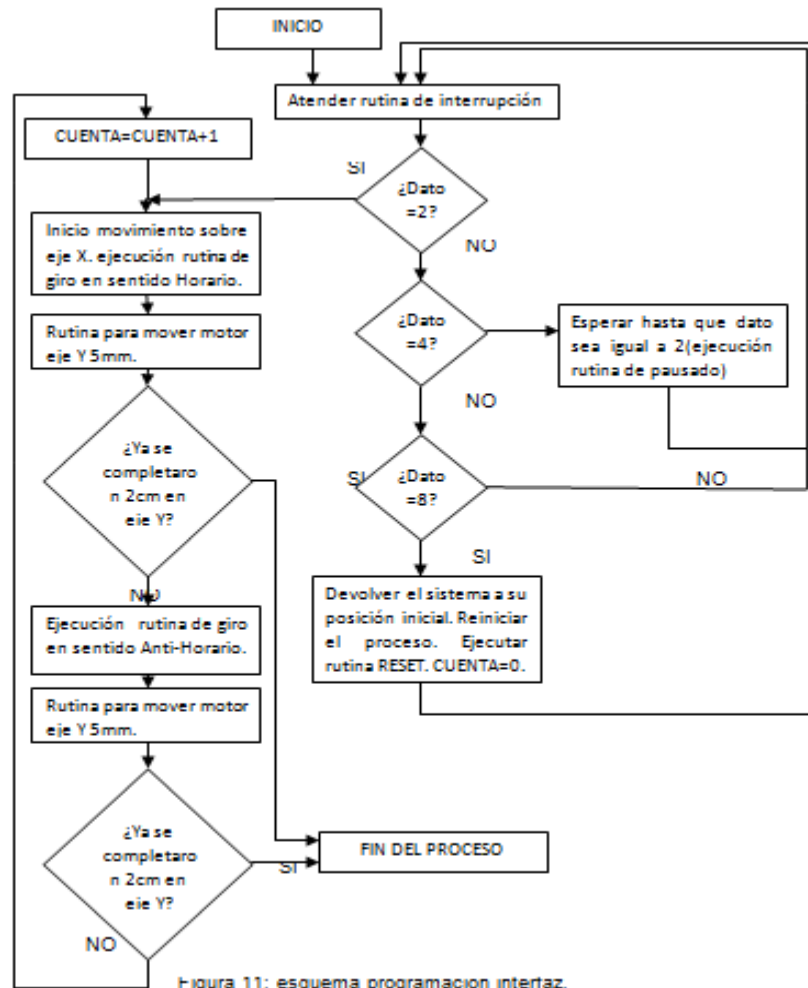
Para la implementación de la función de pausa, se tiene un habilitador que controla la secuencia de movimiento de los motores. Cuando una señal de habilitación se encuentra en bajo, se realizan las secuencias de movimiento, pero cuando dicha señal es habilitada se dejan de transmitir pulsos para el movimiento, de éste modo se detiene el proceso hasta que dicha señal sea de nuevo cero.

La señal que controla el pausado se activa cuando la interrupción detecta el carácter "4" en el buffer de almacenamiento.

En cuanto a la función de reinicio ó *reset*, se emplea un acumulador que almacena el número total de pasos que se han dado en X y Y. El acumulador de X se reinicia cada vez que culmina un barrido. Una vez la rutina de Interrupción detecta el carácter "8" en el buffer, se activa una rutina que hace avanzar cada motor

hacia su posición inicial con el número de pasos que tenga almacenado cada acumulador.

Figura 11. Esquema programación interfaz.



Fuente: Autores

2.3.8 Implementación de la captura de imágenes dentro de la interfaz.

MATLAB cuenta con el toolbox de procesamiento de imágenes, y éste tiene la opción *imaqhwinfo*, el cual identifica las cámaras conectadas al ordenador. La cabeza óptica está integrada por una cámara uEye, que MATLAB identifica mediante un número, generalmente el 3, en función del puerto USB utilizado al conectar la cámara. En la interfaz gráfica se implementa menú desplegable [12], mostrado en la Figura 12, mediante el cual el usuario selecciona la cámara con la cual desea adquirir las imágenes.

Figura 12. Menú desplegable para selección de cámara.

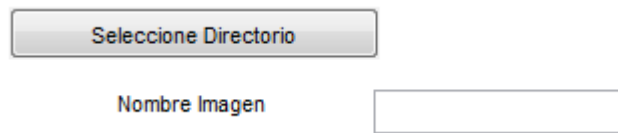


Fuente: Autores.

Instantáneamente se selecciona la cámara y se inicializa la interfaz, esto permite observar en tiempo real lo que la cámara visualiza, de tal forma que pueda ajustar la superficie que se desea reconstruir para obtener un barrido exitoso.

La interfaz gráfica [12] [13] también posee la selección de un directorio, donde se guardan las imágenes adquiridas. El usuario podrá seleccionar ese directorio pulsando el botón: "Seleccione Directorio". De igual forma el usuario podrá nombrar las imágenes adquiridas. Para esto se introduce el nombre con el cual desea almacenar las imágenes en un texto editable de la interfaz gráfica. A medida que se van adquiriendo las imágenes, estas se almacenan en el directorio previamente seleccionado en el formato de imagen *BMP*. En la figura 13 se muestran las funciones previamente señaladas.

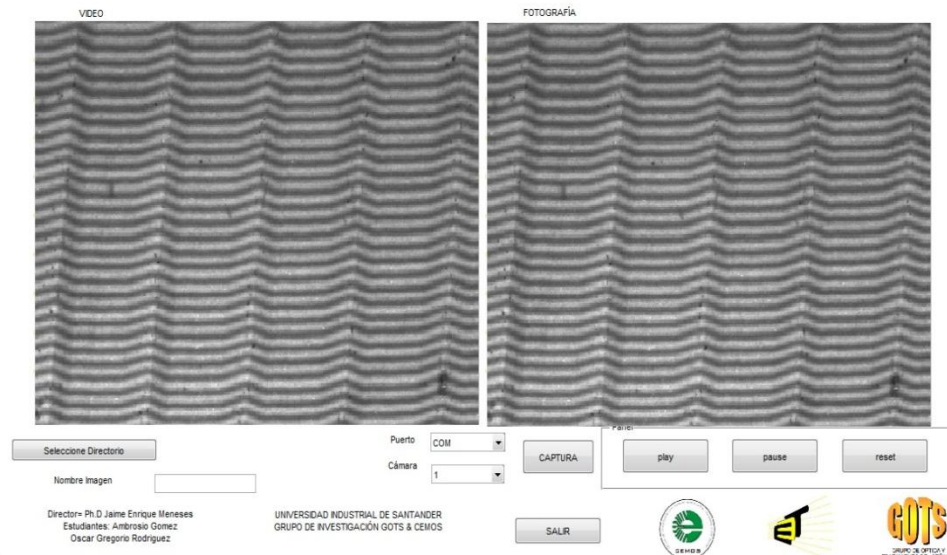
Figura 13. Funciones para nombre de imagen y selección de directorio.



Fuente: Autores

Como la salida gráfica, la interfaz posee dos ejes: El primero sirve para mostrar la imagen de adquisición continua de la cámara y el segundo permite visualizar la imagen adquirida. Cuando se pulsa el botón *play*, el sistema mecánico inicializa el movimiento que permite barrer el VIN. Para la toma de las imágenes, el micro-controlador envía un carácter "I" a través de la comunicación serial, cada vez que se debe hacer la captura de las imágenes. Mediante la programación de la interfaz, se hace que MATLAB interprete dicho carácter activando la cámara para capturar la imagen. Si se presiona el botón *pause* o *reset*, el micro-controlador detiene la transmisión del carácter y no se adquieren las fotografías. En la figura 14 se muestra la interfaz completa.

Figura 14. Interfaz gráfica completa.



Fuente: Autores

2.4 DISEÑO SENSOR ÓPTICO

El sensor óptico está formado por un sistema proyector de franjas y una cámara CCD. El sistema proyector emite las franjas sobre el cuerpo con determinada intensidad luminosa y la cámara CCD permite la captura de imágenes en el campo deseado, para éste caso, 5×5 [mm].

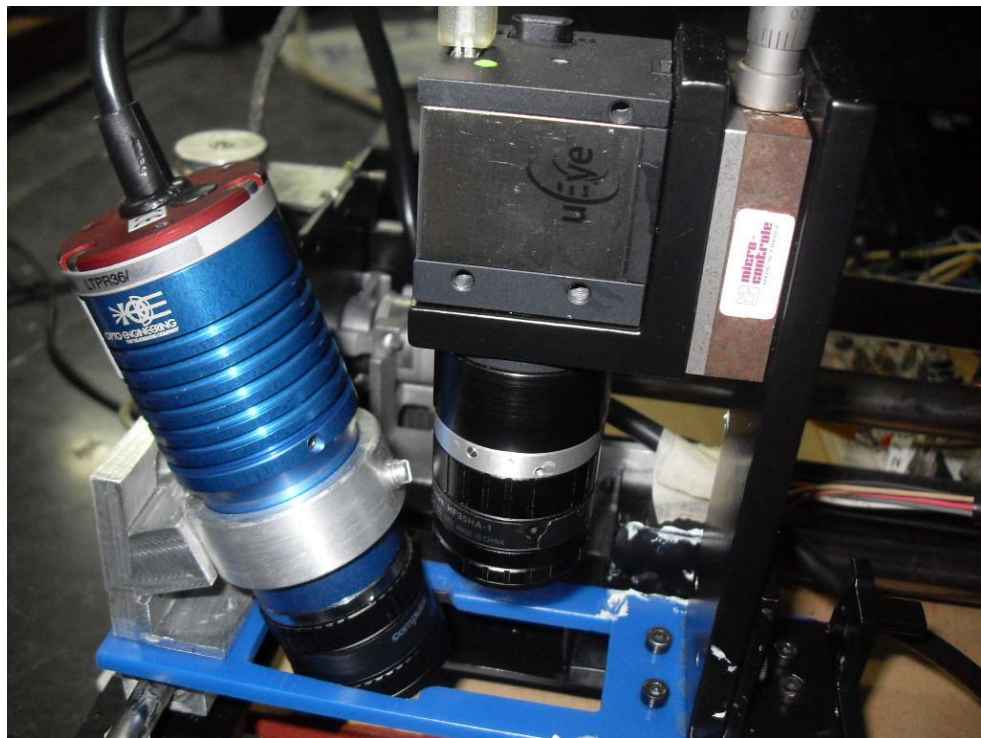
Es importante que las piezas mecánicas que sostienen el sensor óptico se hallen hechas a las medidas adecuadas. Así mismo, se debe ubicar el sensor óptico de manera que en el cuerpo de estudio se produzca la menor cantidad de sombras posibles.

Como el VIN se graba sobre una superficie plana, es importante que el proyector focalice la imagen sobre la superficie plana donde se ubica todo el dispositivo, y la

cámara CCD se sitúa formando un ángulo con el eje óptico del proyector de tal manera que se tenga una imagen nítida.

Para determinar la mejor ubicación del sensor óptico, se debe sintonizar un punto en el cual se puedan ver las franjas de forma apropiada y además, se tenga una buena focalización con la cámara. En la figura 15 se muestra la forma en que se ubica el sensor óptico en el dispositivo.

Figura 15. Ubicación sensor óptico en estructura mecánica.

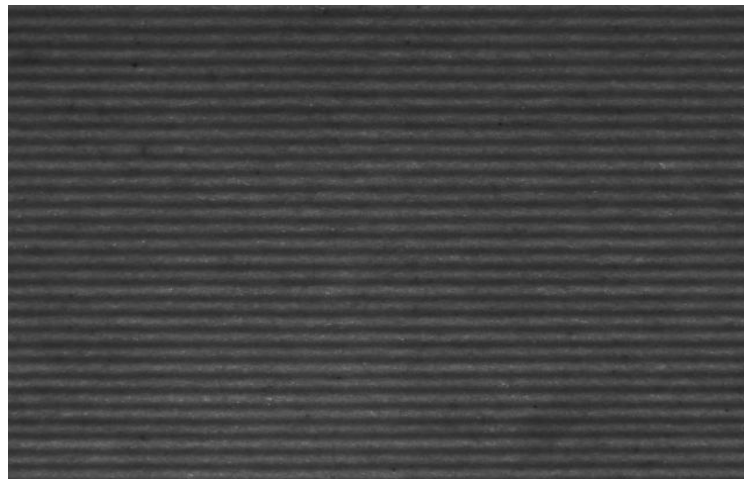


Fuente: Autores.

El sistema proyector de franjas es el dispositivo *LT PR36*, que es uno de los más eficientes y usados a la hora de proyectar patrones tales como: franjas ó líneas, entre otros. Lo anterior, sumado a su practicidad para manejar, su fácil conexión y

además su tamaño, hacen de éste dispositivo una herramienta bastante útil para acoplarlo a la estructura mecánica. El dispositivo posee una forma cilíndrica de diámetro de 32 [mm] y longitud de 92.6 [mm]. En él se encuentra un led de luz blanca, un sistema óptico para generar iluminación homogénea y un soporte que permite alojar el patrón de franjas grabado litográficamente. Las franjas poseen un paso de 18 [μm]. En el extremo del cilindro se ubica una rosca tipo C que corresponde a la montura internacional para los objetivos de cámara CCD, se empleó una lente focal de 12 [mm], con el cual, al ubicar de forma adecuada el dispositivo proyector, se obtienen franjas de paso 250 [μm]. En la figura 16 se muestra una superficie plana adquirida con la cámara CCD.

Figura 16. Superficie plana adquirida por la cámara CCD al proyectar franjas.



Fuente: Autores.

El otro dispositivo que compone el sensor óptico es la cámara *USB CCD uEye 2 UI 2210SE-C*, sus principales características se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros cámara CCD usada.

Interface	USB 2
Tecnología del sensor	CCD(Sony)
Descripción del modelo	UI 2210SE-C
Resolución(anchoxlargo)	640x480
Clase de Pixel	VGA
Alimentación	USB
Peso	79 g

Fuente: *Edmunds Optics*.

2.5 PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.

Las pruebas para definir el tiempo adecuado para la captura de las imágenes, o lo que es lo mismo, tiempo en que el motor se detendrá mientras se hace la captura de la imagen y se guarda, consisten en activar el funcionamiento del modelo funcional y mediante distintas iteraciones empezar a variar el tiempo de adquisición.

Dado que se sabe de ante mano el número de imágenes que se deben obtener en un barrido a lo ancho del VIN, la prueba escogida para fijar el tiempo óptimo, consiste en escoger un tiempo arbitrario y realizar el recorrido sobre el eje X. Al terminar el barrido, se revisan: calidad de las imágenes, número de imágenes adquiridas y tiempo empleado en el proceso.

Si los tres anteriores indicadores son óptimos se reduce el tiempo de captura de imágenes y se repite el anterior procedimiento. Esto se repetirá hasta que alguno de los parámetros no sea óptimo.

Se debe tener en cuenta que cada iteración del proceso, se debe realizar el número de veces necesario para así verificar la repetitividad del proceso.

Durante la ejecución del proceso se encuentran problemas como captura de más de una imagen en un punto, la no toma de imagen en un punto, entre otros. Estos problemas son reducidos a medida que se sintoniza el tiempo adecuado.

Por lo anterior, se requiere medir con un osciloscopio cuantas unidades de la función retardo equivalen a un determinado tiempo.

De este modo, se puede realizar de una forma más clara la prueba de optimización. En la tabla 2 se muestran los resultados de las pruebas realizadas. Allí se pueden apreciar los tres parámetros escogidos como criterios de selección.

Antes de empezar se sabe que en un barrido de 10 *cm* debe haber una captura de 50 imágenes. Esto se deduce de saber que cada 2 *mm* se debe capturar una imagen. La medición del tiempo que produce cada unidad de retardo fueron medidos con un osciloscopio.

Tabla 2. Pruebas de tiempo óptimo para captura de imágenes.

Unidad de retardo	Tiempo[ms]	Calidad imágenes	Numero de imágenes
20	8.7	Mala	19
50	13.5	Mala	25
150	60	Mala	36
250	110	Buena	42

500	198	Buena	44
650	215	Buena	46
850	330	Buena	49
940	370	Buena	50
1000	400	Buena	50
1050	450	Buena	50
1200	540	Buena	50
1800	750	Buena	50
2000	800	Buena	50
2100	816	Buena	50

Fuente: Autores.

Vale la pena agregar que por “Calidad de imagen” se entiende que la imagen capturada no quede corrida, es decir que el tiempo no sea adecuado para que se alcance a capturar la imagen.

Como se ve en la tabla 2, a partir de 940 unidades de retardo tanto la calidad como el número de imágenes son óptimos. Sin embargo se escoge un tiempo un poco más alto, para que el modelo funcional no opere en el límite del tiempo, por tal motivo se selecciona un valor de 1000 unidades de retardo que equivalen a 400 [ms].

Lo anterior significa que el tiempo que tarda el modelo funcional en capturar y guardar una imagen es de 400 [ms]. En las pruebas de repetitividad del capítulo 4 se estudia el comportamiento mecánico y eléctrico en el tiempo.

3. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR PROYECCIÓN DE FRANJAS.

3.1 INTRODUCCIÓN.

En muchas aplicaciones se hace necesario obtener información topográfica de determinados objetos para extraer características como área, volumen, etc. Se ha demostrado que a partir de un sistema clásico de captura de imágenes no es posible recuperar dicha información topográfica debido a que por ejemplo, dos puntos que en el espacio tridimensional se encuentran en distintas posiciones a lo largo del eje óptico, en el espacio bidimensional pueden quedar sobrepuestos en un mismo punto.

De esta manera, cobran especial relevancia los métodos ópticos que permiten mediante procesamiento de imágenes y reconstrucción tridimensional recuperar información topográfica de un cuerpo.

De los métodos ópticos que se muestran en la tabla 3, son de especial importancia los métodos activos, dado que permiten controlar la luz que incide sobre el cuerpo. Entre la categoría de activos, es de interés para este trabajo el método de proyección de franjas, que consiste en un sistema proyector de franjas y una cámara CCD, tal como se muestra en la figura 17.

El método de reconstrucción tridimensional por proyección de franjas consiste en hacer incidir un patrón de franjas como el mostrado en la figura 18, sobre un objeto. Si el objeto es totalmente plano, las franjas se verán totalmente verticales. Pero, si por el contrario, el objeto tiene una topografía, las franjas se deformarán conforme a la forma del objeto. En dicha deformación se encuentra implícita la coordenada Z codificada en la fase de las franjas.

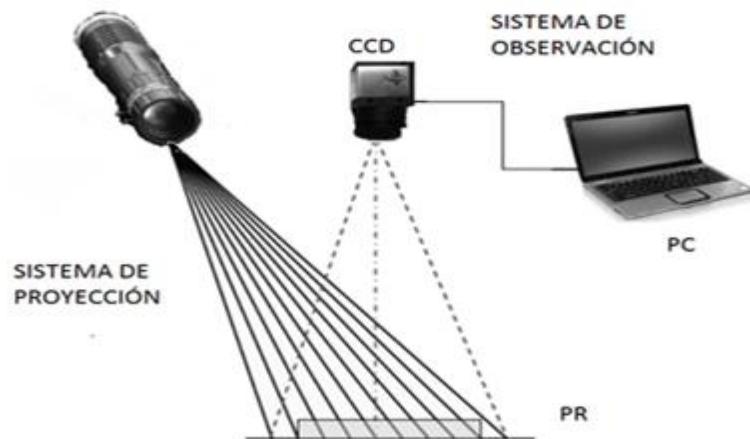
Tabla 3. Clasificación de los métodos ópticos para sistemas de reconstrucción 3D.

	Clasificación	Método	Principio de Codificación	
A C T I V O S	Luz estructurada	Láser	El patrón puede ser un punto, una línea o un patrón definido	Se basa en triangulación, la altura para cada punto se codifica en el corrimiento del patrón con respecto a una referencia debido a la topografía del cuerpo.
		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 grises.	
		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.	
		Moire	La altura del cuerpo se codifica en curvas de Nivel, obtenidas por efecto Moire 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.

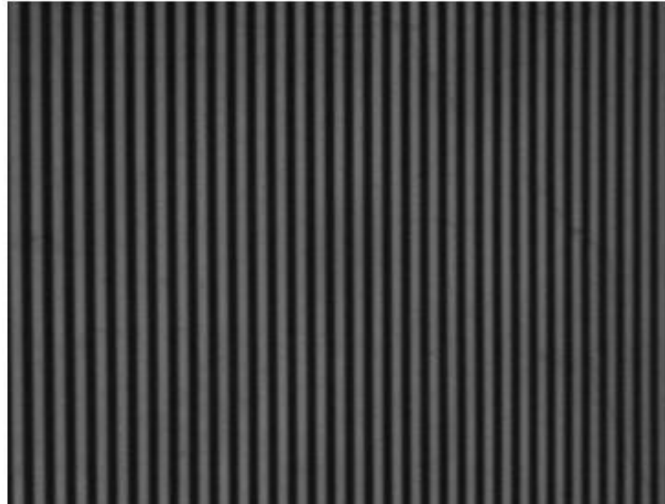
Fuente [2].

Figura 17. Sistema para reconstrucción tridimensional por proyección de franjas.



Fuente. Autores.

Figura 18. Patrón de franjas para incidir sobre un objeto.

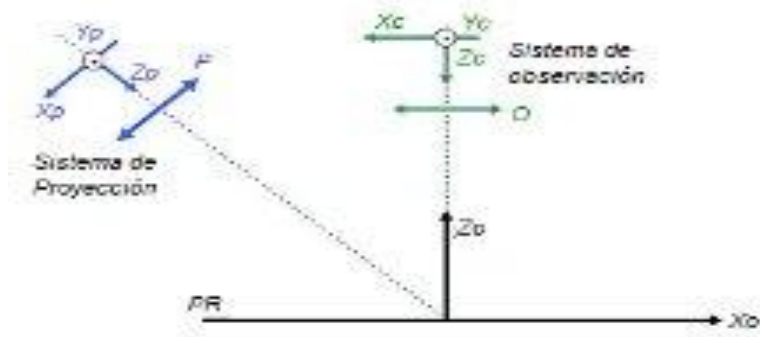


Fuente: [14].

3.2 CONCEPTOS GENERALES

Existen diversas formas de proyectar las franjas; se pueden destacar, entre otras, el efecto Talbot [16] y la interferometría monocromática [15]. Analizando la figura 19 se encuentra información referente a la forma en que actúan el sistema de proyección y observación en el proceso de R3D. Nótese que PR, es el plano de referencia, o plano sobre el cual está el cuerpo. X_p, Y_p, Z_p denotan coordenadas del sistema de proyección y X_c, Y_c, Z_c el de observación. P y O corresponden a los lentes de observación y proyección. P forma la imagen sobre el PR y O forma la imagen sobre la matriz de sensores de la CCD.

Figura 19. Forma en que actúa el sistema proyector de franjas.



Fuente: [14]

Matemáticamente la intensidad luminosa del sistema proyector de franjas ubicado sobre el plano de referencia tiene la forma:

$$I(X_o, Y_o) = I_o(X_o, Y_o) + A(X_o, Y_o) \cdot \cos(2\pi \cdot f_o \cdot X_o + \varphi_o) \quad (1)$$

Donde I_o es el fondo continuo, A es el contraste del sistema de franjas, f_o es la frecuencia espacial media de las franjas, y φ_o es la fase inicial que define la deformación inicial de las franjas. Si se ubica un objeto en el plano de referencia, la ecuación (1) se altera así:

$$I(X_o, Y_o) = I_o(X_o, Y_o) + A(X_o, Y_o) \cdot \cos(2\pi \cdot f_o \cdot X_o + \varphi_o + \Delta\varphi) \quad (2)$$

Donde $\Delta\varphi$ denota la fase que posee información de la topografía del cuerpo ubicado en el plano de referencia.

La ecuación (2), se puede volver a escribir de la siguiente forma:

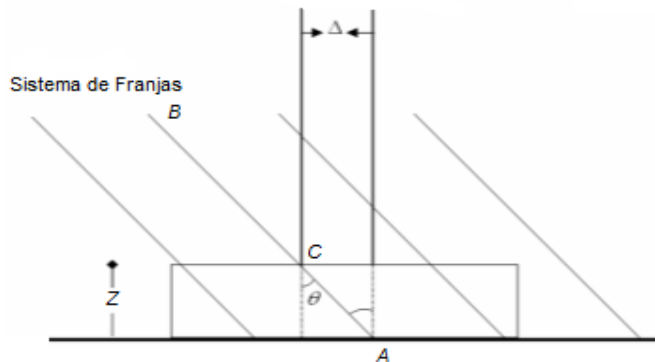
$$I(X_o, Y_o) = I_o(X_o, Y_o) + A(X_o, Y_o) \cdot \cos(\varphi) \quad (3)$$

Donde ahora φ denotará la fase total del sistema de franjas. Las ecuaciones (1) y (2) demuestran que la fase es una función bidimensional que determina el paso y orientación local de las franjas. Como se observa en la figura 20, la franja B intercepta el plano de referencia en el punto A cuando no hay un objeto puesto. Pero debido a la altura Z del objeto, la franja B intercepta la superficie en C , produciéndose un corrimiento Δ en la separación de las franjas. Medido sobre el plano de referencia, dicho corrimiento introduce un corrimiento de fase $\Delta\varphi$ que matemáticamente se puede escribir como:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{Z}{P} \cdot \tan(\theta) \quad (4)$$

Donde P denota la separación entre franjas medida en el plano de referencia, Z la altura del objeto y θ el ángulo entre los ejes de proyección y observación.

Figura 20. Codificación de la altura Z en fase en un sistema de proyección de franjas.



Fuente: [2]

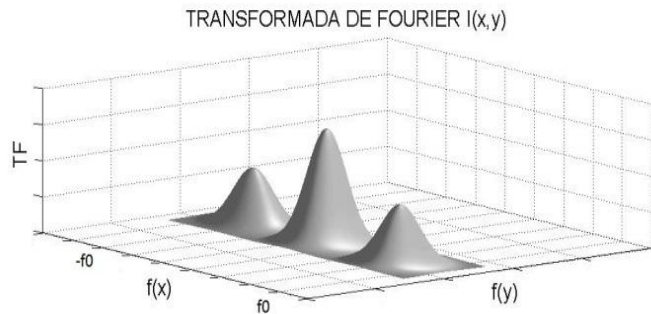
El proceso de reconstrucción consiste en recuperar $\Delta\varphi$ para el sistema de franjas adquirido del objeto y el plano de referencia. Empleando la ecuación (4) y conociendo P y θ se calcula Z para cada coordenada (x,y) del objeto visto por la cámara. Varias técnicas de procesamiento digital se han diseñado para extraer la fase de un sistema de franjas. Se destaca el método de corrimiento de fase [14] y el método de la transformada de Fourier [17] [18]. Para cada punto (x,y) según la ecuación 3, se tienen 3 incógnitas I_0 , A y φ , luego se requieren 3 o más datos linealmente independientes. Estos datos se pueden obtener introduciendo N corrimientos al sistema de franjas en dirección perpendicular a las líneas de las franjas. Este método es conocido por: corrimiento de fase. Este método es imposible de usar con el sistema de proyección empleado ya que implicaría desplazar N veces la placa que contiene grabadas las franjas dentro del dispositivo. Por esta razón se empleó el método de la transformada de Fourier.

3.3 EXTRACCIÓN DE FASE POR EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

De la ecuación (3) es posible determinar la fase geométrica del sistema y el contraste de las franjas empleando el método de la transformada de Fourier.

En primera medida se realiza la transformada de Fourier a la imagen obtenida en la cual se halla implícita la fase como función de la intensidad, ecuación (3). Al hacer la transformada, se obtienen tres lóbulos: uno central debido a la componente continua y dos laterales debidos a la frecuencia portadora $f_0 = \frac{1}{p}$, tal como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Transformada de Fourier de una imagen.



Fuente: [18]

Matemáticamente se demuestra que el lóbulo ubicado en el centro, posee información de I_0 y los lóbulos laterales, información de A y φ . El objetivo consiste en aislar un lóbulo lateral realizando un filtrado pasa-banda. A la señal filtrada se le aplica la transformada de Fourier inversa. Se demuestra que de la distribución compleja se obtiene una amplitud igual a A y una fase igual φ . De esta forma φ se adquiere al emplear la función arco-tangente de la parte imaginaria sobre la real.

Lo anterior supone un inconveniente ya que se tendrán problemas de discontinuidad debido al rango acotado de $\pm \pi$ de la función arco-tangente. Dicha discontinuidad debe ser resuelta de modo que la fase del sistema sea representada mediante una distribución continua 3D.

Para eliminar las discontinuidades del sistema se suma un factor de $2N\pi$ donde N representa un número entero que aumenta cada vez que se avanza sobre el eje X corrigiendo las discontinuidades. Al método de corrección de fase, se le conoce como Unwrapping Algorithm [19] [20].

3.4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL.

La ecuación (4) puede ser empleada para calcular Z en función de θ y P . Estos parámetros son muy complicados para medir y tradicionalmente se emplea un procedimiento de calibración experimental.

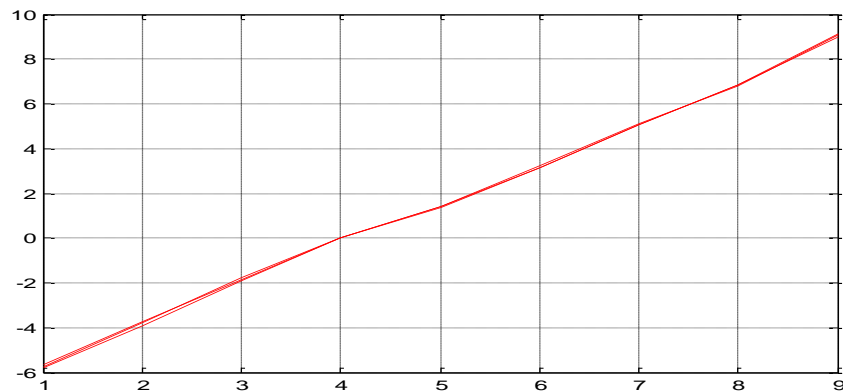
El proceso de calibración experimental [1] [2] [14] permite obtener una curva que asocia la altura o coordenada Z como función de la fase. Consiste en fijar una ubicación del plano de referencia sobre el que se pondrá el objeto, en la cual las franjas inciden de forma adecuada y la cámara se encuentre lo mejor focalizada posible. Una vez fijado lo anterior, se debe variar la posición del plano de referencia en iguales intervalos en dirección de Z , de éste modo se puede relacionar la fase en el punto $Z=0$ con la de cualquier otro punto. Es de especial importancia tener en cuenta que el sensor óptico no puede ser variado en ninguno de sus parámetros pues automáticamente la curva de calibración variará.

La ecuación lineal que caracteriza la curva de calibración se puede calcular por mínimos cuadrados. La relación final viene dada por la ecuación (5)

$$\Delta\varphi = M \cdot Z + B \quad (5)$$

Donde $\Delta\varphi$ es la diferencia entre la fase a determinada altura y la fase en el punto inicial de calibración. La curva de calibración experimental del sistema se muestra en la figura 22. De esta manera se conocen M y B y se almacenan como parámetros del sistema. Para un objeto dado se calcula la fase φ y se le resta la fase a $Z=0$ ó fase del PR (plano de referencia). De ésta manera se obtiene $\Delta\varphi$ y con la ecuación (5) se halla Z .

Figura 22. Curva de calibración experimental para un pixel.

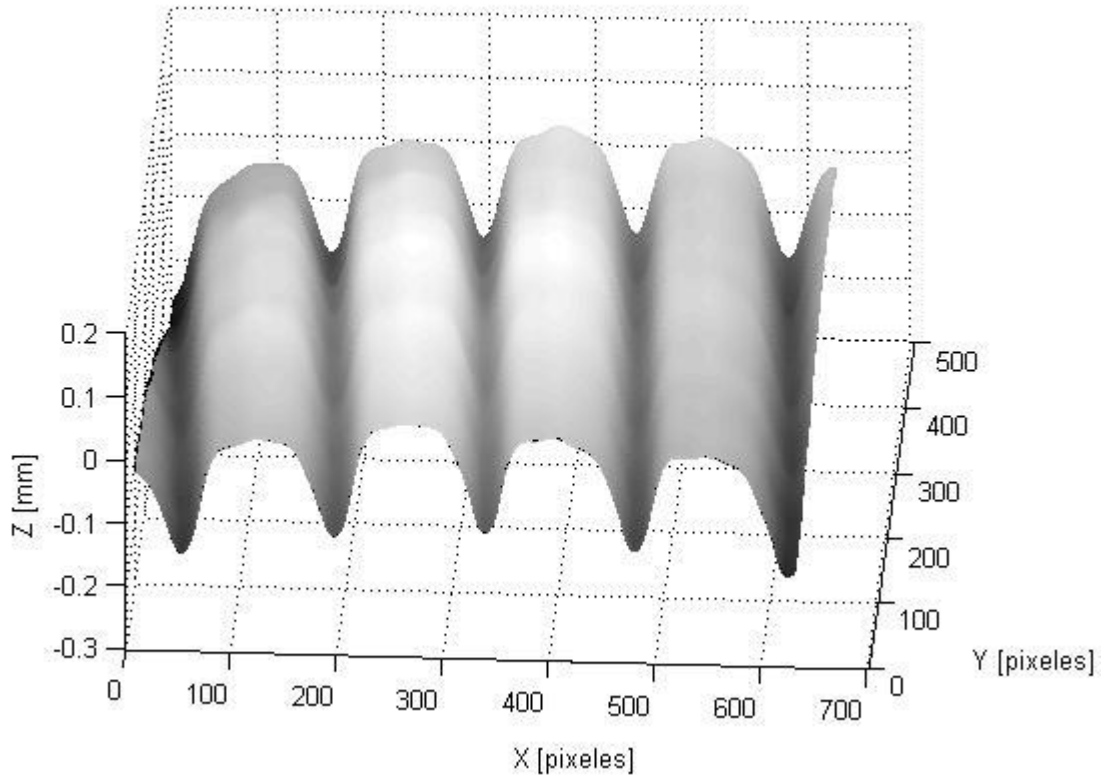


Fuente: Autores.

La figura 23 muestra el sistema de franjas sobre un objeto patrón y la R3D obtenida, X, Y en pixeles y Z en [mm]. Para convertir las coordenadas transversales de pixeles sobre la CCD a [mm] sobre el PR se emplea una cuadrícula milimetrada, y se determina el número de pixeles que corresponden a 1 [mm]. Los factores de conversión son:

$$x = \frac{1\text{mm}}{87\text{pix}} \quad y = \frac{1\text{mm}}{87\text{pix}} \quad (6)$$

Figura 23. Reconstrucción tridimensional de un patrón de medida.



Fuente: Autores.

4. EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.

4.1 INTRODUCCIÓN

En las secciones anteriores se mostró el diseño e implementación del modelo funcional, así como la fundamentación teórica de la reconstrucción tridimensional por proyección de franjas. En este capítulo se caracterizará y evaluará el modelo funcional implementado. Es importante resaltar que este modelo funcional

corresponde al primer paso hacia la obtención de un dispositivo de medida 3D para el control de números de identificación vehicular. Del trabajo realizado para construir y evaluar el modelo funcional implementado se destacan muchas cosas pero también se advierten detalles que se deben corregir. Debido a esto es importante indicar que en esta etapa de caracterización metrológica se desean obtener algunos valores aproximados del error que se comete al reportar la medida de la repetitividad para tener idea de la estabilidad estática y dinámica y la resolución del sistema de medida, es decir, se desea evaluar en primera instancia las incidencias de la componente mecánica, eléctrica y óptica.

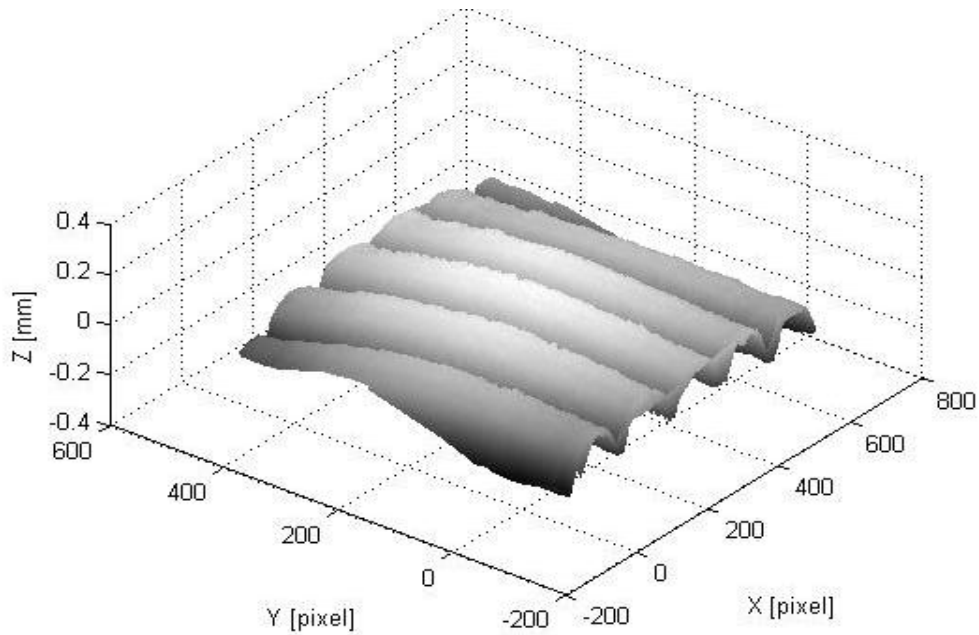
4.2 SELECCIÓN DEL PATRON DE MEDIDA

El patrón de medida seleccionado corresponde a micro-relieves de profundidad 350 [μm] y separación 18.5 [μm] entre cada línea paralela. Este patrón es usado tradicionalmente para evaluar sistemas de medida 3D; su referencia es IVH190-2.

4.3 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DEL PATRÓN DE MEDIDA Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Seleccionado el patrón de medida, se procede a realizar su reconstrucción 3D usando el modelo funcional. El resultado del 3D se muestra en la figura 24. Se reconstruyó haciendo un barrido en X de 8.57 [mm] y en Y de 9.58 [mm], es decir seis campos de exploración.

Figura 24. Reconstrucción 3D patrón de medida.



Fuente: Autores.

De la R3D se puede concluir una profundidad promedio de $335.5 \mu\text{m}$ y una separación entre ranuras de $18 \mu\text{m}$, al comparar con el patrón de medida se obtiene un error en profundidad de $14.5 \mu\text{m}$ y de $0.5 \mu\text{m}$ entre centros, con lo cual se puede concluir una variación de la coordenada Z del 4.32%, porcentaje que resulta admisible al proceso de medición.

4.4 OBTENCIÓN DE IMAGEN 3D TOTAL MEDIANTE EL MÉTODO ITERATIVE CLOSEST POINT.

La información 3D de la figura 24 corresponde al proceso de unificación de los diferentes campos 3D obtenidos en cada posición (x,y) del barrido realizado. Del proceso de barrido se conoce el valor de ΔX y ΔY en [mm], que al emplear los factores de conversión establecidos en la ecuación (6) son convertidos a píxeles en la imagen. Estos valores en principio deben emplearse para pegar imágenes continuamente y obtener una sola imagen final unificada a un único sistema coordenado global.

Bibliográficamente se demuestra [1] [14] [21] que el método de proyección de franjas, es un método de extracción de información 3D relativa. Es decir, si el plano de referencia se desplaza en dirección del eje Z se tendrá una coordenada donde el sistema de franjas se repite, obteniéndose la misma distribución de fase y por ende el mismo valor de Z para diferentes posiciones.

Este inconveniente se manifiesta en el proceso de unificación ya que aunque la coordenada (x,y) se pueda unificar con los valores ΔX , ΔY en [mm] o píxeles, la incertidumbre en Z no se puede eliminar de esta forma. Tradicionalmente se emplea algoritmos de registro de información 3D que permiten corregir éste inconveniente.

El algoritmo de registro empleado se llama ICP por sus siglas en inglés (Iterative Closest Point) [22], que consiste en identificar puntos comunes entre dos superficies 3D y realizar operaciones de traslación 3D y rotación en el espacio para acercarlas. El proceso se realiza minimizando la distancia euclidiana a partir de las partes comunes. El sistema converge a la superposición de las regiones comunes si se aproximan las dos superficies. El algoritmo ICP empleado fue desarrollado en el interior del GOTS en un trabajo de pregrado [23] y con la dirección del director del presente trabajo de grado.

El proceso de unificación de la información 3D obtenida del dispositivo se realizó de la siguiente manera: como los valores de ΔX y ΔY garantizan regiones comunes consecutivas, el proceso inicia con las dos primeras imágenes 3D al inicio del barrido. La segunda imagen se desplaza o bien usando información manual o bien usando ΔX , ΔY , de tal forma que se aproximen sus superficies 3D. Posteriormente el algoritmo ICP acerca la segunda superficie hasta hacerla coincidir sobre la primera, a continuación se usa las imágenes 2 y 3, acercando la tercera a la segunda y se repite el proceso empleando imágenes vecinas, hasta la última. De esta manera toda la información 3D quedará referenciada al sistema coordinado de la primera imagen.

Como los valores ΔX y ΔY acercan inicialmente las dos superficies $\overrightarrow{(r_1)}$, $\overrightarrow{(r_2)}$, que vienen dados por las ecuaciones (7) y (8), los puntos comunes se buscan a partir del criterio de la mínima distancia de un punto de $\overrightarrow{(r_1)}$ a un punto de la nube de puntos 3D de $\overrightarrow{(r_2)}$, que viene dada por la ecuación (9). El punto común o correspondiente al punto en $\overrightarrow{(r_1)}$ de la nube $\overrightarrow{(r_2)}$ es tal que minimiza α_{Ti} , como se indica en la ecuación (10). Una vez calculados los puntos comunes, se evalúan las distancias totales mediante la ecuación (11), para luego optimizar la matriz de rotación y el vector de traslación mediante la ecuación (12).

$$\overrightarrow{(r_1)} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\overrightarrow{(r_2)} = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\alpha_{T_i} = \sqrt{\left((X_{1_i} - X_{2'_i})^2 + (Y_{1_i} - Y_{2'_i})^2 + (Z_{1_i} - Z_{2'_i})^2 \right)} \quad (9)$$

$$\overrightarrow{(r_2)}_i = \min(\alpha_{T_i}) \quad (10)$$

$$\alpha_T = \sum_{i=0}^n \sqrt{\left((X_{1_i} - X_{2'_i})^2 + (Y_{1_i} - Y_{2'_i})^2 + (Z_{1_i} - Z_{2'_i})^2 \right)} \quad (11)$$

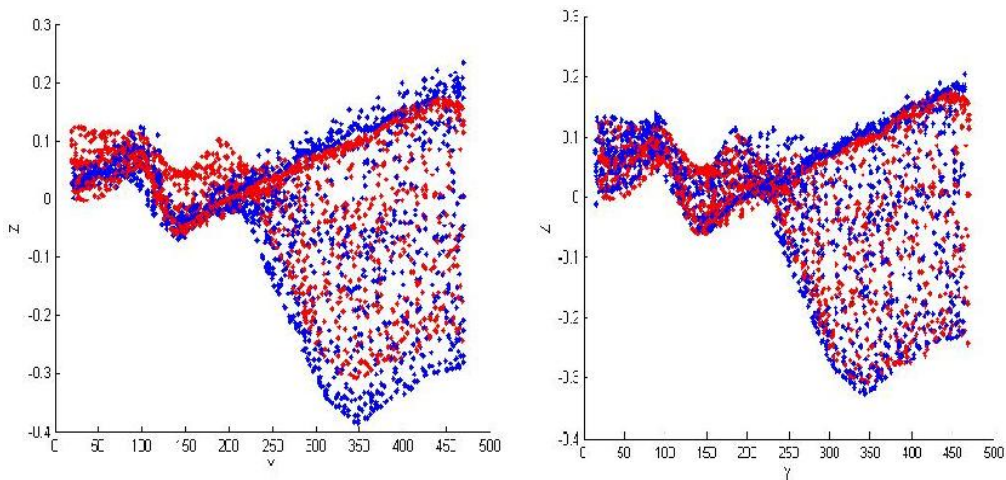
$$\overrightarrow{(r_2')} = \overrightarrow{(r_2)} \cdot \mathbb{R} + \vec{T} \quad (12)$$

Así, la segunda superficie es trasladada y rotada mediante los vectores y matriz correspondientes, empalmándose las dos superficies. El efecto del ICP se muestra en la figura 25. En la figura 25-a se muestran las dos nubes de datos antes de aplicar el algoritmo mientras que en la 25-b se muestran las dos nubes de datos unidas luego de la aplicación del ICP. Se nota así, el efecto de la matriz de rotación y el vector de traslación.

Figura 25. Acercamiento y unión de imágenes.

25-a Antes ICP

25-b Después ICP



Fuente: Autores.

Nótese que en la figura 25-a, la nube de datos azul aún no se ha unido a la roja. Ya en la figura 25-b se observa que las dos superficies se superponen para formar una superficie homogénea.

4.5 REPETIBILIDAD, RESOLUCIÓN Y EXACTITUD DEL SISTEMA

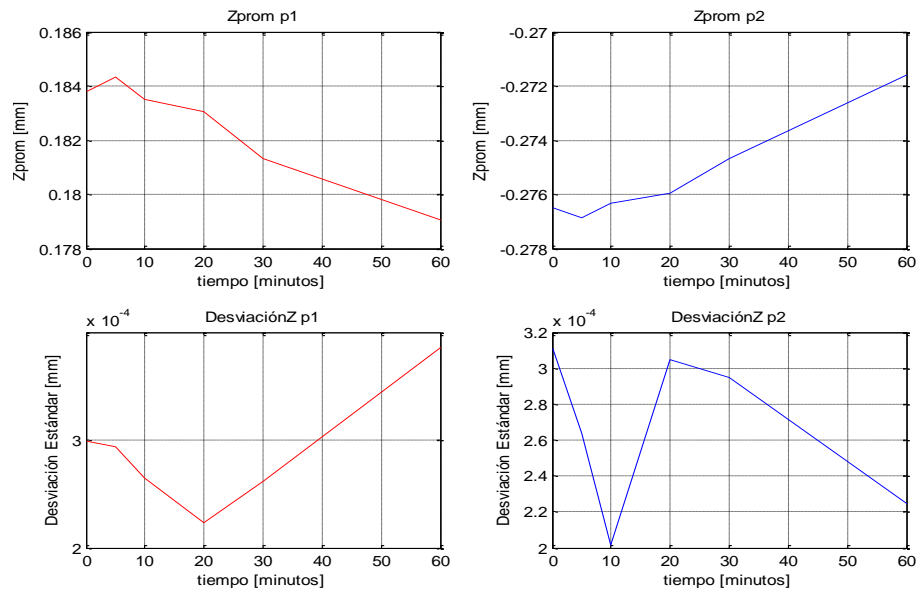
Para la obtención de un estudio más adecuado de la dinámica del modelo funcional y de la confiabilidad que puede tener el usuario después de cierto tiempo de maniobrabilidad, se realizan pruebas de repetitividad, exactitud y resolución.

En primer lugar, para estudiar la repetitividad del sistema, se realizan 2 pruebas que consisten en estudiar variaciones en la información topográfica obtenida a través del tiempo y en condiciones tanto estáticas como dinámicas.

La primera prueba realizada consiste en mantener el sistema estático y el sensor óptico encendido por un lapso de una hora para tomar cierta cantidad de

imágenes sobre una misma región del VIN y estudiar la variación de la coordenada Z en dos puntos, tal como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Variación coordenada Z en el tiempo bajo condiciones estáticas.



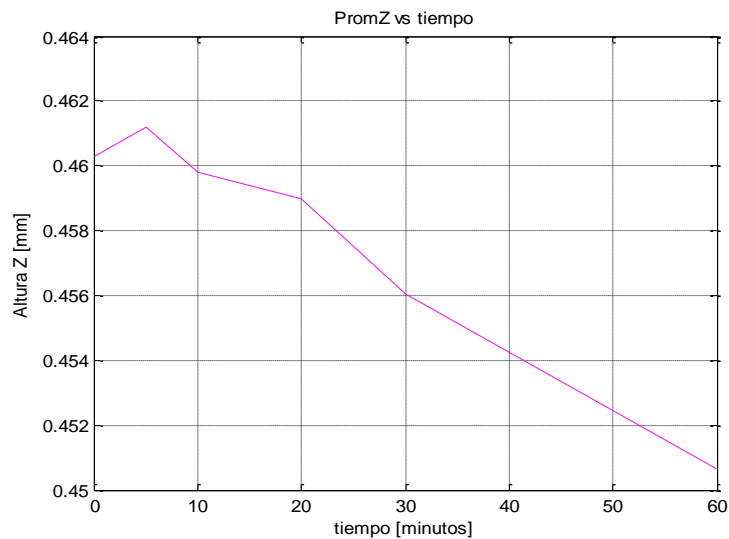
Fuente: Autores

Se puede concluir de la figura 26, después de una hora de medición que la variación máxima de la coordenada Z en los dos puntos es 5.3 $[\mu m]$ y 5.2 $[\mu m]$, una variación que resulta bastante aceptable, pues como se mencionó en el capítulo 1, la profundidad máxima del VIN es de 1 $[mm]$.

Así mismo, se estudia la variación de la distancia promedio entre los dos puntos escogidos a través del tiempo. El resultado es mostrado en la figura 27. Se puede notar que a medida que aumenta el tiempo, la distancia promedio disminuye en unos 10 $[\mu m]$. También se puede observar que en la primera media hora del experimento tan solo hay 2.5 $[\mu m]$ de variación, mientras que en la segunda hay alrededor de 8 $[\mu m]$. Lo anterior permite recomendar no encender el sensor óptico

por un tiempo muy prologado, aun cuando la variación hallada no resulta muy significativa.

Figura 27. Variación distancia promedio entre dos puntos bajo condiciones estáticas.

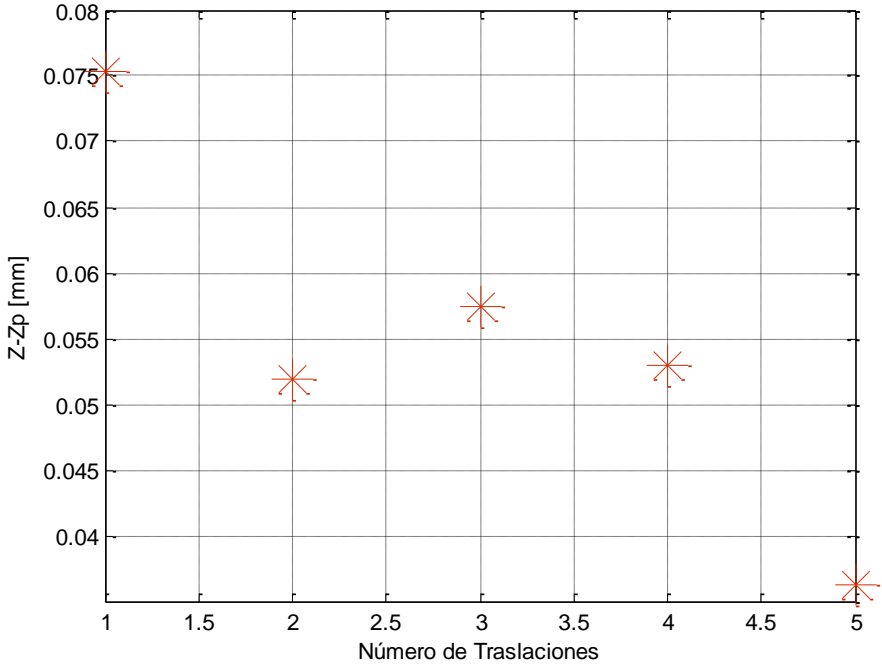


Fuente: Autores

La segunda prueba realizada para la repetitividad consiste en estudiar la variación que puede tener un punto o región del VIN de forma dinámica. Para esto se barre una región del mismo y se estudia el comportamiento de su altura. Se encontró una variación de altura aproximada de $54.8 \mu\text{m}$.

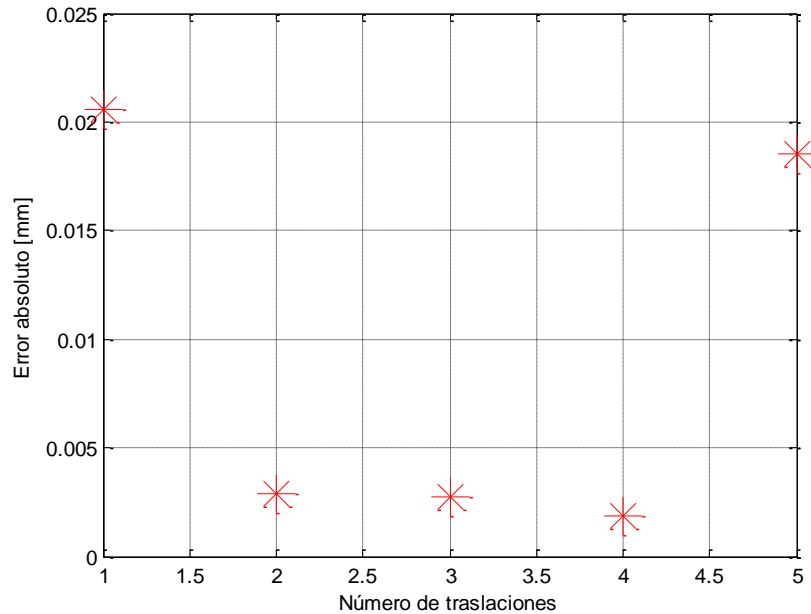
Antes de iniciar la prueba se captura una imagen de la posición inicial. Dicha posición es tomada como referencia para determinar la variación de la coordenada Z en el proceso. El valor inicial de Z es de $135.35 \mu\text{m}$ y en la figura 28 se muestra la variación de cada iteración con respecto al valor Z de referencia.

Figura 28. Variación coordenada Z con respecto a posición de referencia bajo condiciones dinámicas.



Fuente: Autores.

Figura 29. Error absoluto en cada traslación.



Fuente: Autores.

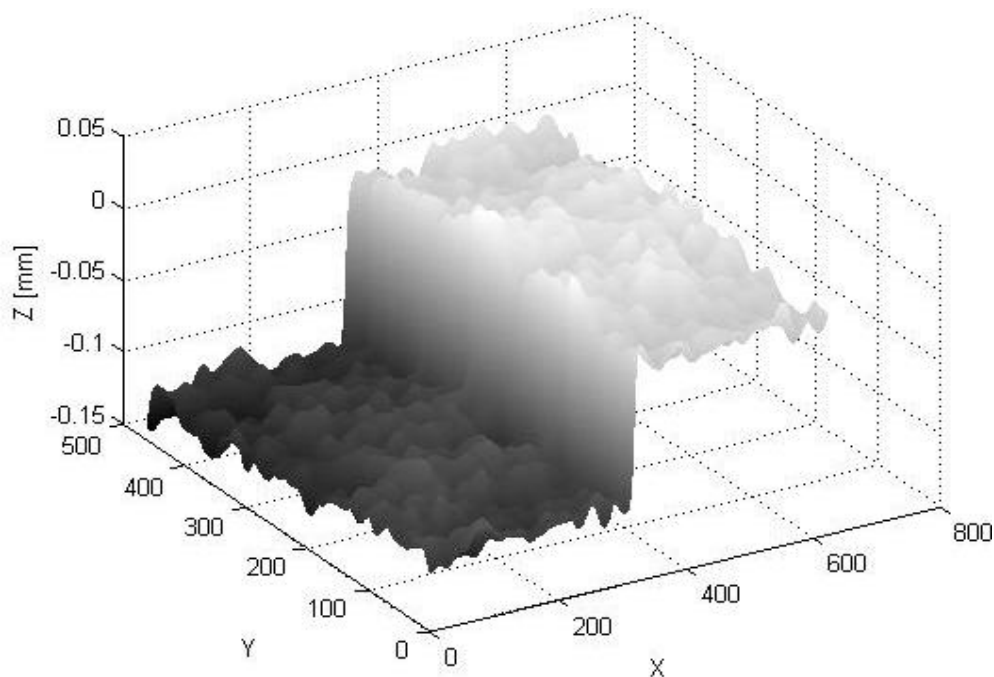
De la figura 28 se concluye que la variación de la coordenada Z con respecto a la posición de referencia es de $39.07 \text{ } [\mu\text{m}]$. Al calcular el error absoluto promedio de las variaciones de Z, se obtiene un error de $9.305 \text{ } [\mu\text{m}]$ de la coordenada Z, lo cual implica que al obtenerse la coordenada Z de un punto sobre el VIN se tendrá una incertidumbre cercana a los $10 \text{ } [\mu\text{m}]$.

La anterior prueba también permitió concluir un error absoluto promedio de la coordenada X de $3 \text{ } [\mu\text{m}]$ y, en la coordenada Y de $2.1 \text{ } [\mu\text{m}]$, lo cual indica una variación mínima de la posición en que se encuentra el modelo funcional, bajo condiciones dinámicas por culpa de las componentes eléctricas y mecánicas. Se tiene entonces, una confiabilidad importante del modelo funcional.

Una vez estudiada la repetitividad del sistema, se realiza un análisis de su precisión. Para esto se escoge como patrón de referencia un escalón que medido

con un comparador de carátulas de $10\ [\mu m]$ de error, arrojó una medida de $100\ [\mu m]$ de altura. Para determinar la precisión del sistema de medida se puede obtener el valor promedio de la altura y así determinar la influencia que tiene el ruido en la medida obtenida. Dicho error puede dar una idea de la precisión del sistema. La imagen tridimensional del patrón obtenido se muestra en la figura 30.

Figura 30. Reconstrucción tridimensional del escalón.

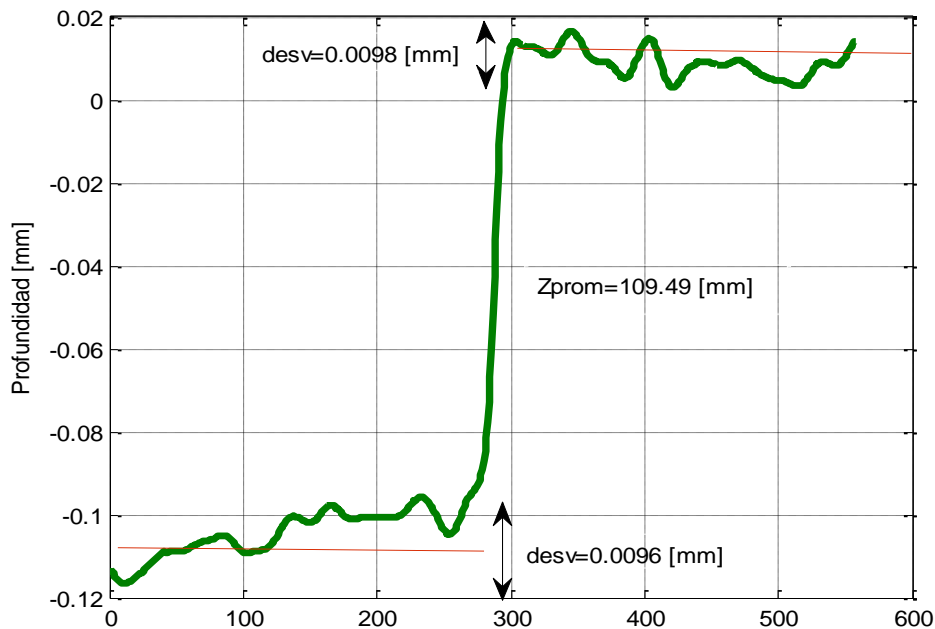


Fuente: Autores

La altura promedio es de $109\ [\mu m]$, dando confiabilidad a la información topográfica obtenida ya que se encuentra en el rango de medición del comparador de carátulas. La precisión se calcula analizando el error que se encuentra en las regiones planas del escalón. Para mejor visualización en la figura 31 se realiza un

corte a la R3D del patrón. Se obtuvo que la precisión del modelo funcional es de aproximadamente $10\ [\mu m]$.

Figura 31. Corte transversal a R3D del escalón.



Fuente: Autores.

En cuanto a la resolución del sistema, se pueden realizar pruebas variando el patrón de medida por uno que tenga cada vez menos altura. Al encontrarse un patrón con el cual el error de medida es muy grande, la presencia de ruido es tanta que se hace imposible la medición, se concluye que esa es la altura máxima que se puede reconstruir con el sistema de medida. Luego se puede inferir la resolución del sistema es dos veces la precisión. Entonces, se tiene una resolución aproximada de $20\ [\mu m]$.

5. RECONSTRUCCIÓN 3D DE NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN VEHICULAR Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN.

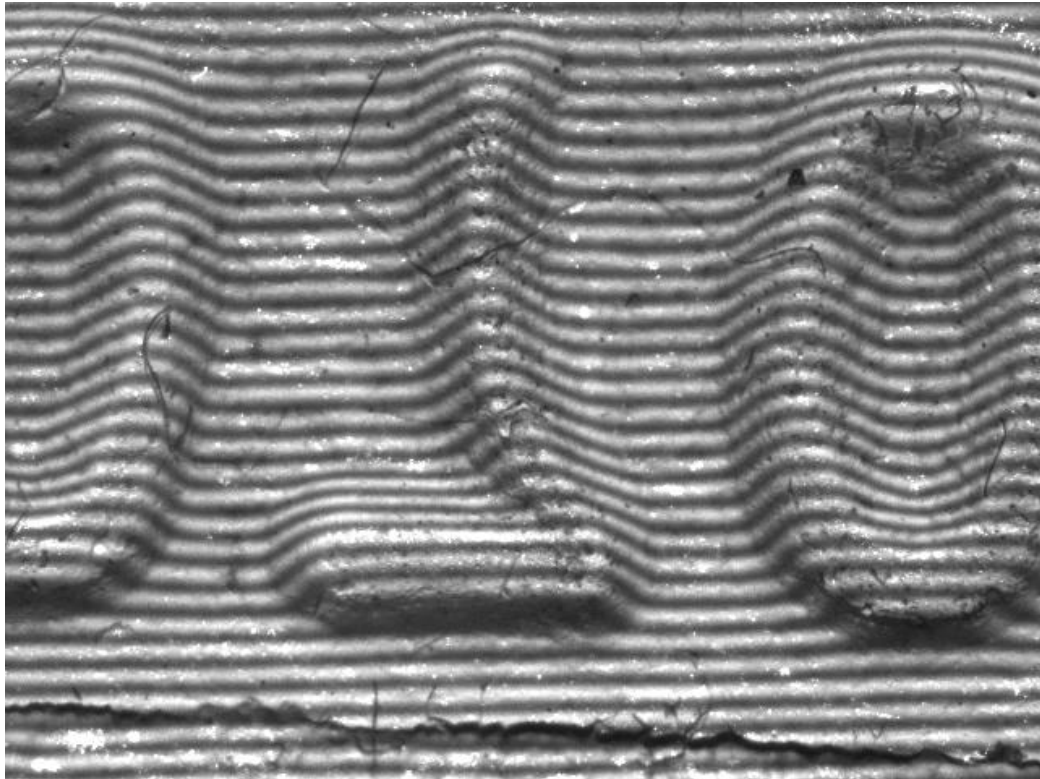
Con el modelo funcional debidamente caracterizado y habiéndose demostrado la confiabilidad de la información topográfica lograda, se procede a obtener la imagen 3D del número de identificación vehicular. Como se mencionó en el Capítulo 1, se escogieron campos de exploración de 5×5 [mm^2].

5.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DEL VIN.

Siguiendo la dinámica ya conocida, se obtienen las imágenes de los últimos 6 dígitos del VIN y posteriormente se unen mediante el método ICP explicado en detalle en la sección 4.4.

El procedimiento comienza con la captura de las imágenes usando el modelo funcional. En la figura 32 se muestra una imagen adquirida en el proceso de barrido del VIN.

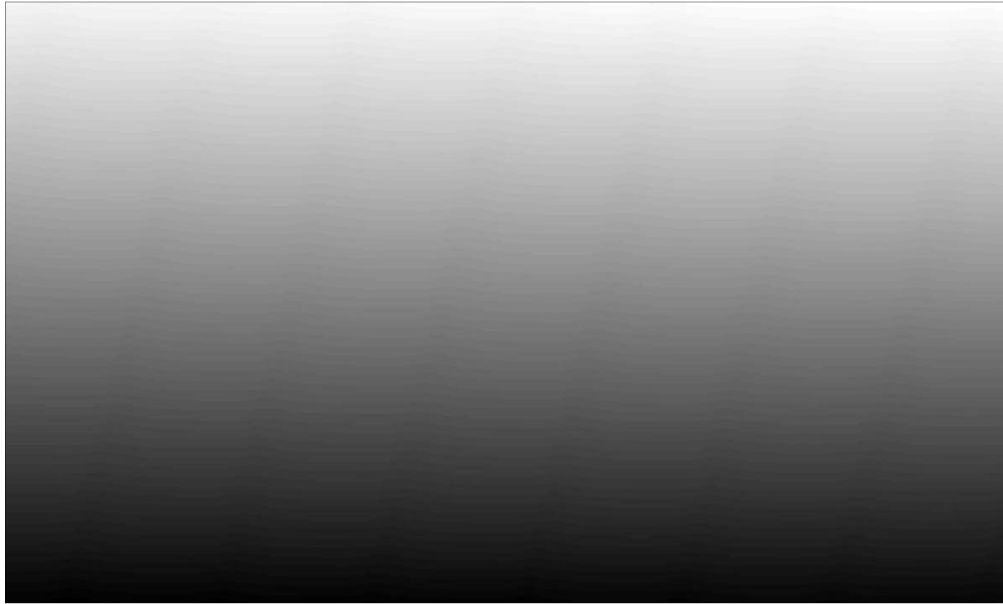
Figura 32. Imagen del VIN adquirida con el modelo funcional.



Fuente: Autores

La reconstrucción tridimensional de cada una de las imágenes se basa en la teoría explicada en el capítulo 3. Como allí se explicó, el método de calibración experimental permite relacionar la coordenada Z con la fase de las franjas, luego al tener la fase del sistema, se puede determinar el valor de Z correspondiente. Sin embargo, como también se explicó, la fase obtenida inicialmente, tiene discontinuidades en los múltiplos enteros de π , las cuales son resueltas mediante el método Unwrapping Algorithm [19] [20] para obtener la fase continua, mostrada en la figura 33.

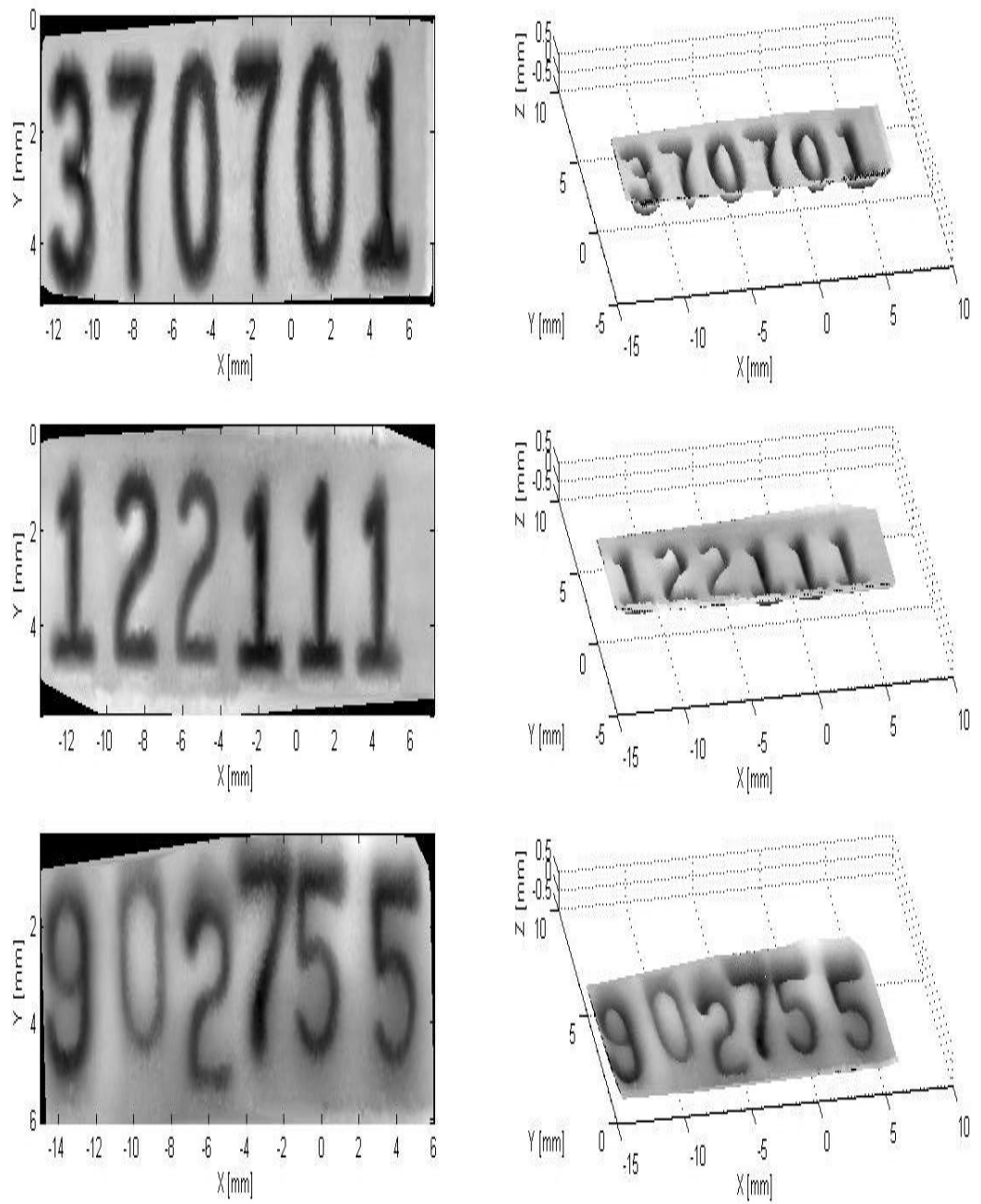
Figura 33. Fase continua obtenida de una imagen del VIN.



Fuente: Autores

Con las reconstrucciones tridimensionales de cada imagen, se procede a realizar el proceso de pegado. Para ésto se usa el algoritmo Iterative Closest Point explicado en el capítulo 4. En la figura 34 se observan los resultados de reconstrucción de algunos números de identificación vehicular

Figura 34.Reconstrucción 3D de números de identificación vehicular.

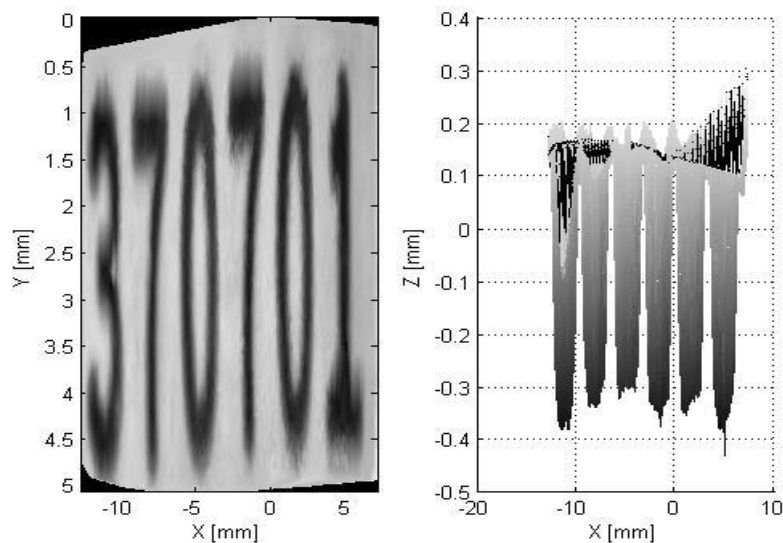


Fuente: Autores.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados mostrados en la sección previa, se tienen en cuenta importantes características de la topografía del VIN como lo son: profundidad, área ocupada por cada dígito y distancia entre centros. Se realiza un análisis de la profundidad obtenida para un VIN que no ha sido modificado y para un VIN que ha sido adulterado en su forma según informa el perito de la Fiscalía. Para el VIN figura 35 que no ha sufrido ninguna modificación se obtienen los resultados de profundidad en la tabla 4.

Figura 35. Reconstrucción 3D VIN no modificado.



Fuente: Autores.

Tabla 4. Profundidad de cada dígito del VIN reconstruido.

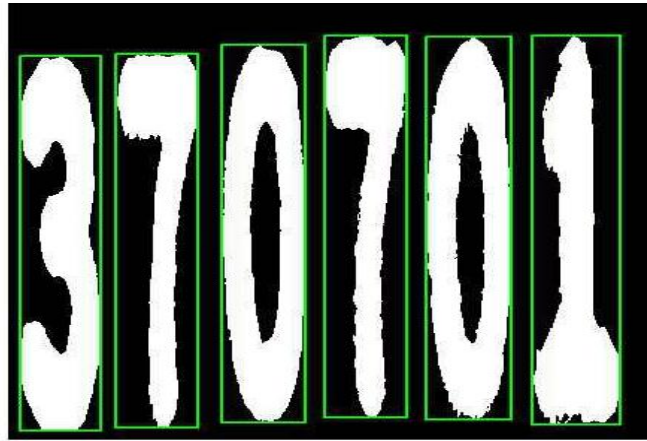
Dígito	Profundidad Z[mm]
1	0.4420
0	0.4416
7	0.4765
0	0.4485
7	0.4684
3	0.4693

Fuente: Autores.

Se encuentra un valor promedio de profundidad 0.4577 [mm] y una desviación estándar de 0.0154 [mm], lo cual era de esperarse, si se tiene en cuenta que los valores de profundidad son homogéneos y varían en un rango de 35 [μm] a lo largo del VIN.

De este número de identificación vehicular se extrae además información topográfica como áreas de cada dígito, y distancia entre centros una vez se ha binarizado la reconstrucción 3D como se observa en la figura 36. Los resultados se consignan en la tabla 5.

Figura 36. Área ocupada por cada dígito del VIN.



Fuente: Autores

Tabla 5. Área y distancia entre centros para VIN no modificado.

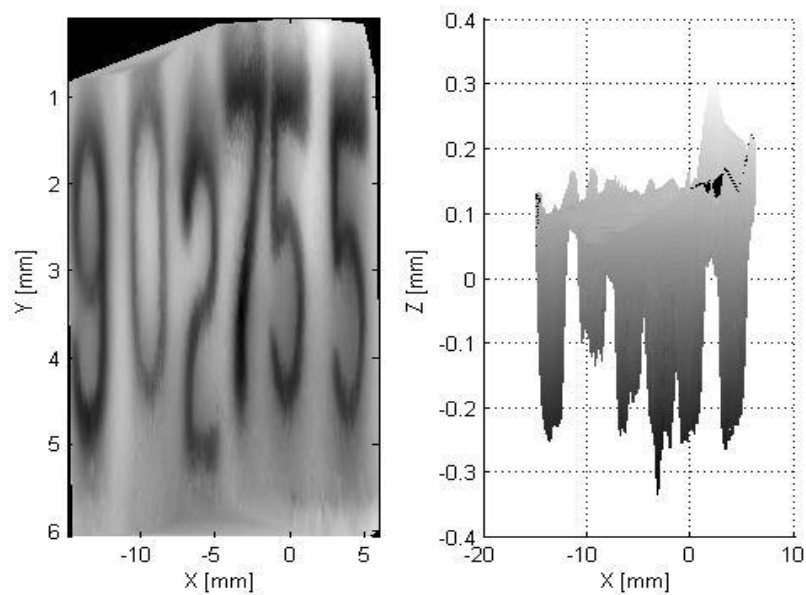
Dígito del VIN	Área [mm ²]	Distancia entre centros [mm]
1	62.053	
		16.233
0	73.355	
		16.055
7	49.518	
		16.048
0	71.291	
		15.801
7	46.834	
		15.456
3	67.169	

Fuente: Autores.

De la tabla 5 se concluye en primera medida que el área que ocupan cada par de dígitos iguales es similar. La diferencia vista se justifica con el ruido producido en el sistema y las variaciones propias del modelo funcional debido a vibraciones mecánicas. De igual forma, la distancia entre dígitos vecinos es aproximadamente igual. Se determinó una distancia entre centros promedio de 1.599 [mm] y una desviación de los datos de 30.38 [μm].

El VIN de la figura 37 ha sido adulterado en su forma. Las profundidades del número de identificación se consignan en la tabla 6.

Figura 37.Reconstrucción 3D del VIN adulterado.



Fuente: Autores.

Tabla 6. Profundidades VIN adulterado.

Dígito del VIN	Profundidad [mm]
9	0.3936
0	0.3037
2	0.3935
7	0.4873
5	0.4715
5	0.4745

Fuente: Autores.

Se observa la no homogeneidad de los datos de profundidad para el VIN adulterado. Los primeros tres dígitos presentan una diferencia de profundidad de aproximadamente 100 [μm] con respecto a los últimos tres dígitos. La desviación estándar de profundidad es 70.70 [μm].

6. CONCLUSIONES

- Dadas las características del VIN y los estudios hechos en trabajos preliminares se generan las bases para construir un modelo funcional que permita barrer el VIN en campos de 5x5 [mm].
- De acuerdo con las características de movimiento requeridas, resulta más fácil implementar un control de tipo digital para la manipulación de motores de paso.
- Teniendo en cuenta que se trata de una etapa preliminar, resulta fundamental la implementación de una interfaz de usuario, mediante la cual se puedan manipular las acciones eléctricas y de captura de imágenes del modelo funcional, de manera que resulte más sencilla la elaboración de pruebas en las siguientes etapas del proceso.
- La correcta ubicación del sensor óptico dentro de la estructura mecánica es de gran importancia, ya que se debe prevenir la aparición de sombras en las imágenes capturadas mediante el modelo funcional.
- El establecimiento de una comunicación inalámbrica en esta primera etapa del dispositivo final resulta inoficiosa toda vez que la cámara CCD implementada es de tipo USB.
- La sincronización entre los tiempos de traslación y captura de imágenes resulta de gran importancia a la hora de implementar la interfaz de usuario, puesto que para obtener una imagen tridimensional adecuada se debe garantizar buena calidad de las imágenes adquiridas.

- Resulta importante que todo el modelo funcional se encuentre dentro de un mismo software de procesamiento, para tener un rendimiento más eficiente del modelo funcional.
- El fijar un plano de referencia y realizar el proceso de calibración experimental permite obtener una relación entre la fase del sistema y la coordenada Z en la superficie.
- La técnica de reconstrucción tridimensional por corrimiento de fase no resulta apropiada para el modelo funcional a implementar, porque la necesidad de correr las franjas implicaría un tedioso trabajo para el operario del modelo funcional, por tal motivo se implementa el método de la transformada de Fourier.
- La escogencia de patrones de medida elaborados a alta precisión, permite obtener una estimación más adecuada del error de medición que usar una técnica de mayor resolución, debido a que se pueden contrastar los valores experimentales con los teóricos incluidos en la referencia del patrón.
- Se encuentra que bajo condiciones estáticas y con el sensor óptico encendido, la coordenada Z tiene una disminución a medida que aumenta el tiempo, debido a condiciones de ruido del sensor óptico.
- Bajo condiciones dinámicas se encuentra un error promedio absoluto de 9.305 [μm] en Z y 0.3 [μm] en X, lo cual indica un amplio margen de confiabilidad en el modelo funcional y permite considerar como poco influyentes los efectos de vibraciones mecánicas del sistema.
- La información topográfica obtenida del VIN permite verificar la homogeneidad entre áreas de dígitos similares, profundidad de cada uno

y separación entre centros de cada dígito, mediante el cálculo de la desviación estándar.

- La manipulación del barrido del VIN y óptimo funcionamiento electrónico es de especial importancia si se tiene en cuenta que en el ensamble de imágenes con el algoritmo ICP se requiere tener zonas comunes entre imágenes vecinas.

7. RECOMENDACIONES

Como primera etapa de un dispositivo final, se requieren diversas mejoras que permitan llegar a obtener un dispositivo versátil y que pueda ser usado por personas que no tengan conocimiento sobre los principios físicos tratados en éste proyecto.

- Se recomienda construir un módulo que permita desplazar el sensor óptico en la coordenada Z y detectar la no focalización del VIN para prevenir la obtención de imágenes no aptas para un adecuado procedimiento.
- Se debe optimizar y adaptar a la interfaz de usuario el procesamiento de las imágenes adquiridas mediante el modelo funcional, a partir de la implementación de un algoritmo de procesamiento y ensamblado total.
- Pensando en el dispositivo final, se sugiere generar una base de datos con patrones del VIN de cada empresa ensambladora y de este modo comparar la topografía extraída para la detección de alteraciones.
- Ensamblar algoritmos que permitan extraer de forma directa los datos de área, profundidad y separación incluidos en este trabajo de grado y, mediante datos estadísticos, como la desviación estándar, determinar si el VIN ha sido o no modificado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1].Pérez G Zayra. “Aproximación Espacio Temporal para la medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas”. Trabajo de Grado. Escuela de Física. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [2].Zayra Pérez, Lenny Romero, Jaime Meneses “Sistema Óptico de reconstrucción 3D para la detección de ampollas en recubrimientos”, Tesis Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [3]. Aguilera Bermúdez, Ernesto, “Extracción de información topográfica a partir de franjas de igual color en interferogramas de luz blanca”. Tesis Postgrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Física
- [4]. Reston Condit, Douglas W Jones “Stepping Motors Fundamentals”, University of Iowa, 2008
- [5]. Texas Instruments “Stepper Motor Controller IC”, 2008
- [6].Diseño Módulo RS232[Online]. [Citado en 11/06/2012]. Páginas 2-6. Disponible en: <http://www2.elo.utfsm.cl>
- [7]. Joel M. Esposito “Serial Communication in Matlab”, United States Naval Academy, 2009
- [8]. Freescale semiconductor “QE128 Quick user Guide”, rev 1 October 2007
- [9]. Freescale Semiconductors “Data Sheet: Technical data QE128 series”, rev 10. October 2008.
- [10]. Carlos A Fajardo, Jorge H Ramon “Introducción al diseño digital avanzado”, Universidad Industrial de Santander, Agosto de 2010
- [11]. Thomas Floyd “Fundamentos de circuitos digitales”, séptima edición, 2000.

- [12] Manual de Interfaz Grafica de Usuario en Matlab[Online]. [Citado en 22/07/2012]. Páginas 5-34. Disponible en: www.matpic.com
- [13].Building GUIs with Matlab[Online]. [Citado en 01/06/2012]. Paginas 2-21. Disponible en: <http://www.phy.ohiou.edu>
- [14] Tejada, Daniel. “Dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de la piel humana por el método de proyección de franjas”. Trabajo de Grado. Departamento de Física. Universidad del Cauca.
- [15] De la Fraga, Luis, Rodríguez, Ponciano “Localización de una Autoimagen en el Efecto Talbot para una Rejilla Binaria”. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,2006.
- [16] G. Lai y T. Yatagai “Generalized phase shifting Interferometry” J. Opt. Soc. Vol8, 1992
- [17] Mitsuo Takeda, Hideki Ina, and Seiji Kobayashi “Fourier Transform method of fringe pattern analysis for computer-based Topography and interferometry” J. Opt. Soc Am 72 152-160, 1982.
- [18] Galindo, Luis Alejandro; Ramírez Camilo “Posicionamiento de un objeto en el plano a partir del procesamiento digital de imágenes en una rejilla radial”. Trabajo de grado. Universidad industrial de Santander, 2012.
- [19].Hong Zhao, Wenyi Chen and Yushan Tan, “Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes”, Applied Optics Vol 33, No 20, July 1994
- [20] S. Xiansu, X Lian. “Phase-Unwrapping algorithm used on fringe frequency analysis in Fourier Transform profilometry”. Opt.Eng.40, 637-643 (2001)
- [21] Zhang Song, Zhang Ping. “Reconstrucción tridimensional del contorno usando el método del desplazamiento de fase”. Depto.de Ingeniería Industrial. SUNY.

[22] Iterative Closest Point and Earth Mover's Distance [Online]. [Citado en 18/08/2012]. Páginas 1-4. Disponible en: <http://www.cs.duke.edu>

[23] Rojas B, Leidy Johana “Exploración Topográfica del rostro humano a múltiples campos con registro unificado tridimensional”. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander, 2012.

[24] Cabezas, Luisa Fernanda “Diseño e implementación de un dispositivo de exploración tridimensional por triangulación láser lineal del número de identificación vehicular”, Trabajo de Grado en Ingeniería Física, Universidad del Cauca, 2009.

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO.

INTRODUCCIÓN

El siguiente manual permite a cualquier tipo de usuario, adquirir imágenes con las cuales es posible reconstruir tridimensionalmente los números de identificación vehicular VIN.

Consta de una estructura mecánico-eléctrica que permite barrer la superficie del VIN para obtener imágenes que luego serán procesadas para obtener el 3D total. Además el modelo funcional contiene dos salidas USB y una de alimentación eléctrica.

OBJETIVOS DEL SISTEMA

- Adquirir las imágenes en un directorio conocido por el usuario, para su posterior tratamiento.
- Con la información adquirida lograr la reconstrucción tridimensional del VIN.
- Reanudar, pausar o reiniciar la adquisición con el objetivo de tomar imágenes de calidad y hacer mucho más fácil su tratamiento.

GUÍA DE USO

1. Instalar el software de la cámara CCD Ueye UI 2210SE-C. Estos se pueden descargar gratuitamente de la página web: <http://www.ids-imaging.com>.
2. Instalar el software del conversor USB-Serial TU-S9. Puede adquirirlo en la página web : http://www.trendnet.com/langsp/downloads/list_subcategory.asp?SUBTYPE_ID=1201

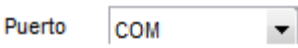

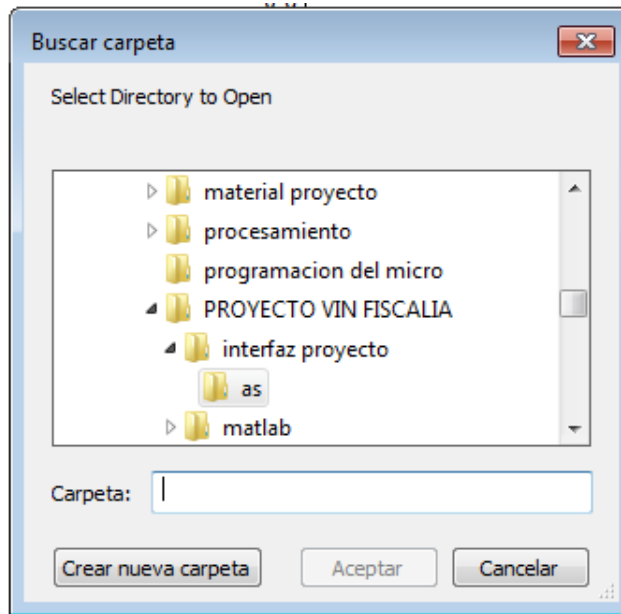
3. Conecte a uno de los puertos USB de su computador la cámara CCD: Ueye UI 2210SE-C.
4. Conecte el cable convertidor USB a Serial TU-S9 a otro de los puertos USB de su computadora.
5. Ingrese a la interfaz gráfica.
6. Seleccione el puerto serial. Para esto seleccione en el menú desplegable  , el puerto que esté activo.
7. Seleccione el directorio donde desea almacenar las imágenes. Para esto presione el botón  . Automáticamente se desplegará un menú como el siguiente:

Figura 38. Selección del directorio.

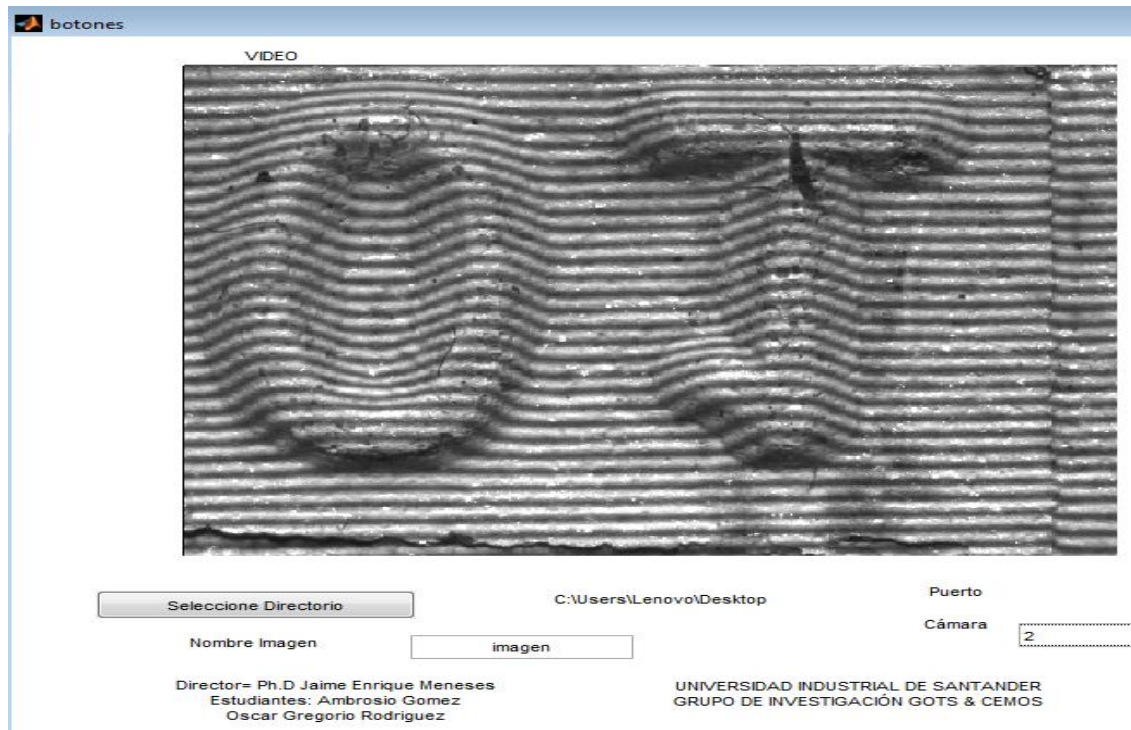


Fuente: Autores.

8. Ingrese al editor de texto el nombre con el cual desea almacenar sus imágenes. Recuerde que éstas se guardarán en el directorio previamente seleccionado.

9. Seleccione la cámara en el menú desplegable .., generalmente MATLAB detecta la cámara Ueye UI 2210SE-C con el número '3'. Instantáneamente se observa en la parte izquierda de la interfaz, lo que la cámara está visualizando. Observe la figura:

Figura 39. Visualización de la cámara.



Fuente: Autores.


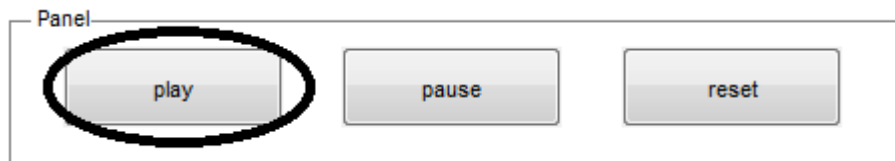
10. Inicialice el proceso presionando el botón  en el Panel de Funciones como se observa en la figura.

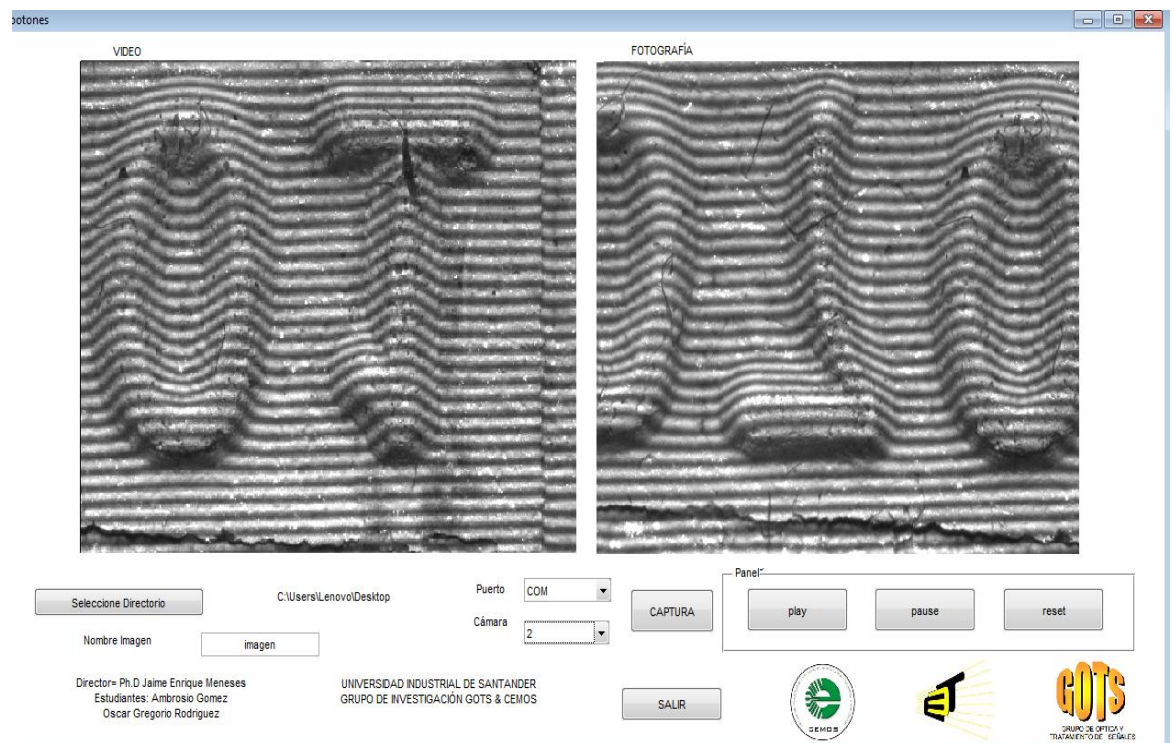
Figura 40. Panel de botones. Función inicio.



Fuente: Autores.

Al inicializar el proceso, los motores empiezan a barrer la superficie y se almacenan las imágenes en el directorio seleccionado y con el nombre establecido. Estas imágenes se pueden visualizar en la parte derecha de la interfaz como se muestra en la figura:

Figura 41. Interfaz gráfica completa.



Fuente: Autores.

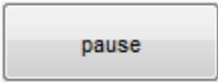
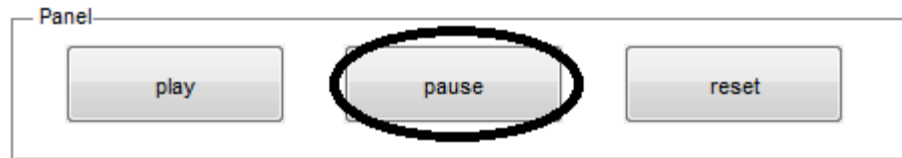
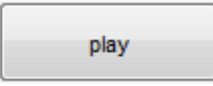
11. Si desea pausar el proceso, presione el botón  del panel de funciones como se observa:

Figura 42. Panel de botones. Función pausa.



Fuente: Autores.

Si desea reanudar el proceso presione el botón .


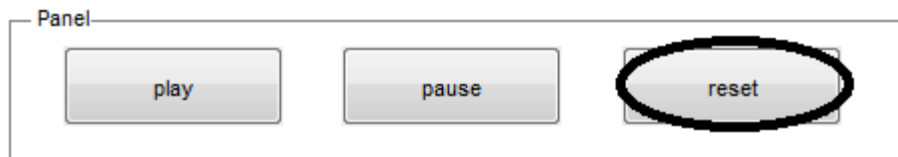
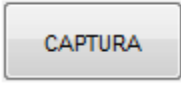
12. Si desea reiniciar el proceso, presione el botón  del p nel de funciones como se observa:

Figura 43. Panel de botones. Función reinicio.



Fuente: Autores.

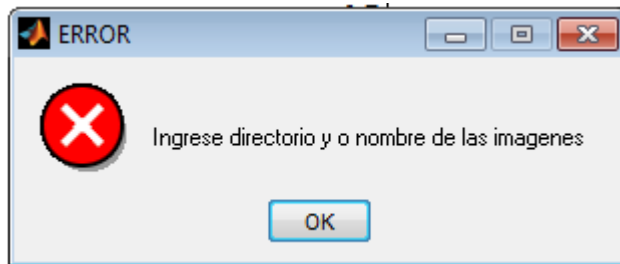
13. El usuario además tendrá la opción de capturar una imagen. Para esto debe presionar el botón .

14. Para salir de la interfaz presione el botón .

SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

- Es fundamental conectar la cámara y el conversor de USB-Serial de la comunicación antes de inicializar la interfaz, ya que MATLAB no reconoce después de inicializar la interfaz.
- Se debe **siempre** seleccionar el puerto serial antes de inicializar la adquisición.
- Antes de empezar la captura, se debe seleccionar el directorio y el nombre como se desean almacenar las imágenes; ya que si se presiona cualquier botón del panel de funciones, aparece un cuadro de error como el de la figura:

Figura 44. Cuadro de dialogo de error.



Fuente: Autores.

- Para salir de la interfaz, **siempre** se debe utilizar el botón



SOPORTE TÉCNICO

Comunicarse a los correos electrónicos:

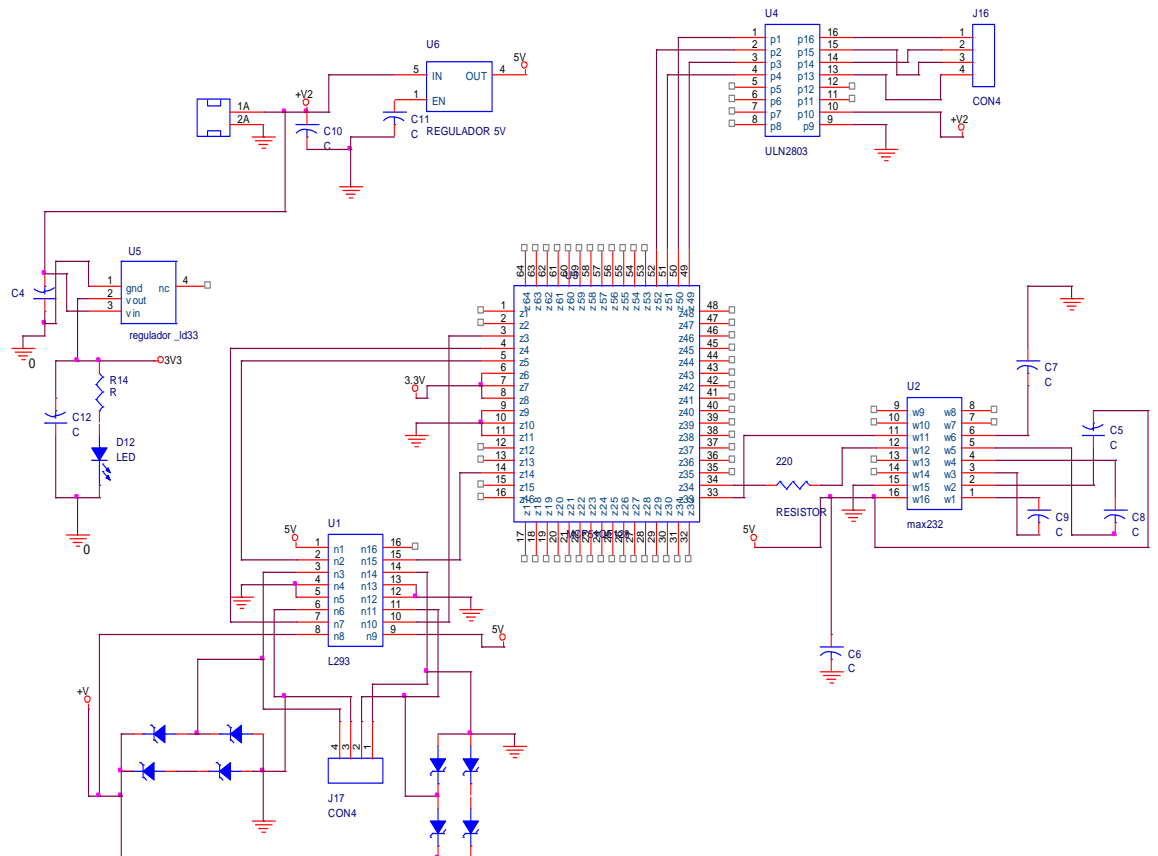
-amgo1806@hotmail.com

-oscaracso27@gmail.com

ANEXO B.ESQUEMA DEL CIRCUITO IMPLEMENTADO EN EL MODELO FUNCIONAL.

Como se mencionó en el capítulo 2 se tienen dos motores de paso, circuitos integrados de amplificación de corriente y un integrado MAX-232 para garantizar adecuados niveles de voltaje. En la figura 2.1 se muestra el esquemático del circuito implementado.

Figura 45. Esquemático del circuito implementado.



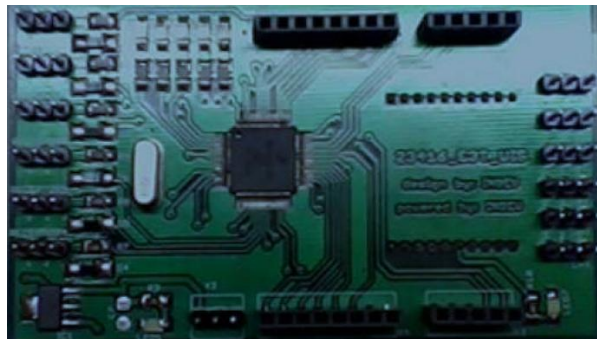
Fuente: Autores.

En el circuito se puede ver un micro-controlador, dos circuitos amplificadores de corriente (L293, ULN2803), el integrado MAX-232 que convierte voltajes TTL a RS232, dos reguladores de voltaje (Uno de 3.3V y otro de 5V), y conectores para conectar las entradas de alimentación de las bobinas de los motores.

El micro-controlador es usado para programar la secuencia de movimiento requerido. 8 pines son designados para alimentar los dos motores de paso, 4 pines van al L293 y otros 4 al ULN2803. Los pines de recepción y transmisión serial del micro-controlador van al MAX-232. Se cuenta con un adaptador de 18V y el regulador de 5V se usa para alimentar al motor X.

La programación del micro-controlador se realizó dentro de la tarjeta diseñada en el curso de diseño de circuitos analógicos en la universidad Industrial de Santander por el estudiante Edwin José Vera Roza. En la imagen 2.2 se muestra la tarjeta usada.

Figura 46. Tarjeta usada para la programación del micro-controlador.



Fuente: Autores.