



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL PRINCIPIO DE
TRIANGULACIÓN MEDIANTE LASER PARA EL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER 3D ROTATIVO PARA EL
LABORATORIO CNC DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS ESPE”**

AUTORES:

SANDRA MARISOL CHASILUISA YANCHATUÑA

GALO MARCELO TAPIA ESTRELLA

DIRECTOR: ING. FAUSTO ACUÑA

LATACUNGA

2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

CERTIFICO

Certifico que el trabajo de titulación, ***“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL PRINCIPIO DE TRIANGULACIÓN MEDIANTE LASER PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER 3D ROTATIVO PARA EL LABORATORIO CNC DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”*** realizado por los señores ***SANDRA MARISOL CHASILUISA YANCHATUÑA*** y ***GALO MARCELO TAPIA ESTRELLA*** ha sido revisado y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores ***SANDRA MARISOL CHASILUISA YANCHATUÑA*** y ***GALO MARCELO TAPIA ESTRELLA*** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, agosto 2016

Ing. Fausto Acuña Coello.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **SANDRA MARISOL CHASILUISA YANCHATUÑA** y **GALO MARCELO TAPIA ESTRELLA**, con cédulas de identidad N° 0502497720 y 0503249153, declaramos que este trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL PRINCIPIO DE TRIANGULACIÓN MEDIANTE LASER PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER 3D ROTATIVO PARA EL LABORATORIO CNC DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, agosto 2016

Sandra Marisol Chasiluisa Yanchatuña

C.C.: 0502497720

Galo Marcelo Tapia Estrella

C.C.: 0503249153



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **SANDRA MARISOL CHASILUISA YANCHTUÑA** y **GALO MARCELO TAPIA ESTRELLA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL PRINCIPIO DE TRIANGULACIÓN MEDIANTE LASER PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER 3D ROTATIVO PARA EL LABORATORIO CNC DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, agosto del 2016

Sandra Marisol Chasiluisa Yanchatuña

C.C.: 0502497720

Galo Marcelo Tapia Estrella

C.C.: 0503249153

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico de manera muy especial a mis padres, que siempre han estado incondicionalmente apoyándome, a mi querida universidad que me ha acogido estos años y me ha llenado de vivencias inolvidables.

A todas las personas que han sido parte de mi formación personal y profesional, les agradezco y los llevare en mi corazón como luces que han guiado mi camino.

Sandra Chasiluisa

Esto se lo dedico a mi familia, en especial a mi madre que siempre me ha brindado su apoyo incondicional, su ayuda en momentos difíciles, sus consejos en etapas de incertidumbre y su amor en todo momento; a mi hermano que ha estado presente las buenas y en las malas; a mis primos que han sido parte fundamental en mi formación gracias a sus consejos, experiencia y su amistad desinteresada.

Galo Tapia

AGRADECIMIENTO

Agradecemos en primer lugar a Dios quien nos ha permitido compartir estos últimos años con amigos y docentes, por las bendiciones y sabiduría para culminar nuestra carrera universitaria.

Gracias a nuestros padres por su apoyo y su gran esfuerzo para darnos una profesión e inculcarnos valores que se han vuelto hábitos en nuestro diario vivir.

Gracias a esta ilustre institución y a sus docentes por su paciencia, por compartir sus experiencias y ayudarnos a formar las nuestras.

Agradecemos también de manera especial al Ingeniero Fausto Acuña, que fue para nosotros mucho más que un docente y deposito sobre nosotros la confianza y conocimiento para el desarrollo del presente trabajo.

Queremos agradecer también al Ingeniero Álvaro Cevallos, que a pesar de ser ajeno a la institución, nos compartió su experiencia en el momento del desarrollo de este proyecto.

GRACIAS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y CONCEPTOS GENERALES

1.1	Escáner 3D.....	1
1.2	Escáner 3D activos.....	2
1.3	Escáner 3D de triangulación.....	3
1.4	Estado del arte del escáner 3D por triangulación	4
1.5	Cámaras web	6
1.5.1	Sensor CCD.	6
1.5.2	Sensor CMOS.....	8
1.5.3	Resolución de la imagen.	9
1.5.4	Calidad de la imagen.....	10
1.6	Laser lineal	10
1.6.1	Tipos de láseres.	11

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y ALTERNATIVAS DE DISEÑO

2.1	Análisis de parámetros de principio de triangulación.....	14
2.2	Condiciones y parámetros de diseño del escáner 3d	15
2.2.1	Parámetros.....	15
2.2.2	Modo de operación.....	19
2.2.3	Condiciones.....	20
2.3	Alternativas de diseño y selección de componentes	21
2.3.1	Estructura.....	21
2.3.2	Dispositivos electrónicos.....	28
2.3.3	Herramientas de software.....	33
2.4	Diseño mecatrónico.....	34
2.4.1	Diseño mecánico	34
2.4.2	Diseño electrónico	36
2.4.3	Diseño de la aplicación.....	42

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

3.1	Manufactura de los elementos de la estructura del escáner 3D	45
3.2	Montaje del escáner 3D.....	46
3.3	Conexiones de los elementos electrónicos y las placas de control	52
3.4	Implementación de la aplicación desarrollada	55
3.4.1	Interfaz de usuario.....	55
3.4.2	Horus.....	56
3.4.3	Desarrollo de la aplicación.....	56

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADO

4.1	Pruebas de funcionamiento del escáner.....	67
4.1.1	Pruebas de funcionamiento general.	67
4.2	Análisis de la capacidad real del escáner.....	73
4.2.1	Análisis de la capacidad de escaneo.....	73
4.2.2	Análisis del posprocesamiento.	76
4.2.3	Comprobación de medidas entre el modelo real y escaneado.	79
4.3	Susceptibilidad a factores externos y fallas	80
4.3.1	Efectos de la variación del entorno en el escáner.	80
4.3.2	Fallas comunes de escaneo.	84
4.4	Comparación entre un escáner profesional y el desarrollado.....	87
4.4.1	PICZA 3D laser scanner LPX 60.	87
4.4.3	Análisis de calidad de digitalización en los escáneres analizados.	90
4.5	Validación de la hipótesis	107
4.6	Análisis de costos vs beneficio	107

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	109
5.2	Recomendaciones.....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		112

ANEXOS

Anexo A: Especificaciones técnicas de BQ Ciclop Escáner 3D

Anexo B: Especificaciones técnicas del rodamiento de bolas 16014

Anexo C: Datasheet técnicas de la placa Zum Scan

Anexo D: Diagrama de flujo de la aplicación

Anexo E: Especificaciones técnicas de la pantalla táctil de Raspberry

Anexo F: Especificaciones técnicas de PICZA 3D Laser Scanner LPX 60

Anexo G: Planos de diseño mecánico del escáner 3D

Anexo H: Manual de Usuario

Anexo I: Manual de posprocesamiento de archivos .ply

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de un escáner 3D autónomo.....	19
Tabla 2: Ventajas y desventajas de las tecnologías de prototipado y manufactura existentes en el laboratorio CNC	22
Tabla 3 Propiedades mecánicas del ABS P400	23
Tabla 4 Propiedades mecánicas del material PA2200	24
Tabla 5: Detalle de componentes de la estructura del disco	26
Tabla 6: Características de distintos tipos de controladores	28
Tabla 7: Ventajas y desventajas de los servomotores DC	29
Tabla 8 Ventajas y desventajas de los motores a pasos PAP.....	30
Tabla 9: Selección del motor	30
Tabla 10: Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi	37
Tabla 11: Listado de piezas a ser impresas en 3D.....	45
Tabla 12: Lista de elementos secundarios	47
Tabla 13: Ensayos de funcionamiento general.....	67
Tabla 14: Resultados con figuras de diferente dificultad	73
Tabla 15: Cuadro de medidas y fallas	79
Tabla 16: Escaneo con luz natural vs luz artificial	80
Tabla 17: Iluminación de entornos de prueba	81
Tabla 18: lista de fallas comunes del proceso de escaneo	85
Tabla 19: Parámetros generales de los escáneres	89
Tabla 20: Costos de implementación	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de escaneado activo	3
Figura 2: Composición de un sensor CCD	7
Figura 3: Composición de un sensor CMOS	8
Figura 4: Clasificación de laser según la norma UNE EN 60825-1/A2.....	13
Figura 5: Variables del modelamiento matemático.....	16
Figura 6: Situación de radio positivo	17
Figura 7: Situación de radio negativo	18
Figura 8: Estructura del disco BQ Escáner 3D Ciclop	26
Figura 9: Cámara Logitech C270 HD	32
Figura 10: Vista general de la cámara Genius WideCam 320.....	32
Figura 11: Cámara Klip KDC-600.....	33
Figura 12: Mesa giratoria ensamblada en Solidworks 2014	35
Figura 13: Despiece de la mesa giratoria	35
Figura 14: Ensamble de la maquina realizado en Solidworks 2014	36
Figura 15: Raspberry Pi 2.....	36
Figura 16: Tarjeta ZUM SCAN	38
Figura 17: Jerarquía en la etapa de control.....	38
Figura 18: Motor NEMA 17.....	39
Figura 19: Pantalla táctil de 7 pulgadas, Raspberry Org.	40
Figura 20 Conexión básica de la electrónica.....	41
Figura 21: Partes básicas del programa.....	43
Figura 22: Piezas a ser impresas en 3D	46
Figura 23: Ensamble del disco de metacrilato con la base de disco	48
Figura 24: Superficie antideslizante	48
Figura 25: Base de la mesa giratoria.....	49
Figura 26: Ubicación de la cámara en el pedestal.....	49
Figura 27: Ubicación de la electrónica dentro del pedestal	50
Figura 28: Soporte de laser ensamblado en el pedestal	50
Figura 29: Perno M3 para ajuste del laser	51
Figura 30: Varillas roscadas para unión del pedestal con la mesa giratoria.....	51
Figura 31: Calibrador de la cámara	52
Figura 32: Conexión de la Raspberry Pi con la pantalla táctil	53

Figura 33: Conexiones del controlador principal	53
Figura 34: Tarjeta microSD clase	54
Figura 35: Logotipo del sistema operativo Raspbian.....	55
Figura 36: Filtrado con operación morfológica	59
Figura 37: Bancarización de una imagen	59
Figura 38: Filtro Blur.....	59
Figura 39: Patrón de calibración del escáner	63
Figura 40: Triangulación laser.....	65
Figura 41: Calibración del disco	66
Figura 42: Montaje final del escáner	67
Figura 43: Primera prueba de escaneo	70
Figura 44: Figura escaneada a color.....	71
Figura 45: Pieza escaneada de color blanco	71
Figura 46: Pieza escaneada a color	72
Figura 47: Archivo STL de la figura snowman, vista 1	76
Figura 48: Archivo STL de la figura snowman, vista 2	77
Figura 49: Archivo STL de la figura snowman, vista 3	77
Figura 50: Snowman, vista 1	78
Figura 51: Snowman, vista 2.....	78
Figura 52: Snowman, vista 3.....	78
Figura 53: medición de la distancia entre puntos de la nube generada	79
Figura 54: Variación de luz natural en el escaneo.....	82
Figura 55: Variación de luz artificial en el escaneo	82
Figura 56: PICZA 3D Laser Scanner LPX 60.	88
Figura 57: PLXEZStudio V3.02	89

RESUMEN

Un escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y ocasionalmente su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. El objetivo principal del escáner es crear un modelo digital a partir de piezas que serán escaneadas utilizando el principio de triangulación, usando dos laser lineales y una cámara, la pieza se coloca sobre una mesa giratoria y el archivo generado será una nube de puntos, la cual puede ser importada por la mayoría de software CAD para su posprocesamiento y uso en diversas aplicaciones como: reproducción mediante impresión 3D, mecanizado CNC, modificación del modelo original, ingeniería inversa, etc. El escáner 3D utiliza hardware y software libre, ya que la Raspberry Pi es la placa encargada del procesamiento de datos y control del proceso, se ha utilizado también una placa arduino y una ZUM Scan para el control de los actuadores, en la parte de software, Raspbian es el sistema operativo principal, sobre el cual corre la aplicación de escaneo, una versión modificada del programa Horus, la interface de usuario se logra con una pantalla táctil de 7 pulgadas de la empresa Raspberry.org

PALABRAS CLAVE:

- **ESCÁNER 3D LASER**
- **PRINCIPIO DE TRIANGULACIÓN**
- **RASPBIAN**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**

ABSTRACT

A 3D scanner is a device that analyses an object or a scene to take data of its shape and, sometimes, its color. The principal objective of the scanner is: to create a digital model of a real object extracting information through the principle of triangulation, using two linear lasers and a digital camera, the object must be placed in the rotatory platform and the generated file, is a cloud of point, that file can be imported by a CAD software for the post processing step, that give the flexibility of use that file in lots of applications like: reproduction of the real object, 3D impression, machining using CNC, modification of the design, inverse engineering, etc. The 3D scanner uses free software and hardware, because of the Raspberry Pi is the device which controls the process and all data, other electronic controllers used like arduino Uno and ZUM scan are part of the free hardware and can be found by a lower price; the operating system used is a variant of Debian that is a popular Linux distribution, Raspbian, the scanning application is a variant of Horus from BQ, that is an open source for scanning platforms based on Ciclop, a free project of BQ , additionally, a touch screen makes the project more friendly and makes the scanner a stand-alone device

KEYWORDS:

- **3D LASER SCANNER**
- **TRIANGULATION PRINCIPLE**
- **RASPBIAN**
- **ARTIFICIAL VISION**

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y CONCEPTOS GENERALES

1.1 ESCÁNER 3D

Un escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y ocasionalmente su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Desarrollados inicialmente en aplicaciones industriales como metrología y automóvil, con el paso del tiempo han encontrado un vasto campo de aplicación en actividades como la arqueología, arquitectura, ingeniería, y entretenimiento como por ejemplo en la producción de películas y videojuegos. (Wikipedia, 2015)

El propósito de un escáner 3D es crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto. Estos puntos se pueden usar entonces para reconstruir la forma del objeto. El modelo obtenido por un escáner 3D describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado. (Crespo Julio & Fernández Zúñiga, 2014)

Un solo escaneo no producirá un modelo completo del objeto. Se requieren múltiples tomas desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del objeto. Estos escaneos tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante un proceso que se llama generalmente alineación, y que transforma las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo. (Wikipedia, 2015)

La construcción básica de un escáner 3D está conformada principalmente por un sensor, un emisor de señales y un sistema de procesamiento de datos. Los dispositivos láser son los más utilizados para emitir la señal que se va capturar y procesar, siendo los láseres de línea los más populares. Se utilizan cámaras como sensores gracias a que son muy eficientes para la captura de ondas electromagnéticas, ya que transforma la luz que captura en datos. Por último, el sistema de

procesamiento de datos es un software diseñado para transformar y procesar las señales provenientes de la cámara, las cuales vienen en forma de puntos de nubes de puntos. (Crespo Julio & Fernández Zúñiga, 2014)

Existen dos tipos de escáneres 3D en función de si hay contacto con el objeto o no. Los escáneres 3D sin contacto se pueden dividir además en dos categorías principales: escáneres activos y escáneres pasivos. Hay una variedad de tecnologías que caen bajo cada una de estas categorías (Wikipedia, 2015)

1.2 ESCÁNER 3D ACTIVOS

Los escáneres activos emiten alguna clase de señal y analizan su retorno para capturar la geometría de un objeto o una escena. Se utilizan radiaciones electromagnéticas o ultrasonidos. (Wikipedia, 2015)

Una vez terminado el proceso completo se envía al software que se encarga de generar una malla de puntos en el espacio tridimensional, es decir, un modelo 3D. El software normalmente permite editar el resultado para crear una malla uniforme de puntos, porque en ocasiones los datos de escaneado dan como resultado un objeto “roto” al que le falta algún fragmento de superficie. Una vez terminada la edición, es posible exportar el resultado a un archivo STL compatible con una impresora 3D para imprimir el objeto, en la figura 1 se muestra como funciona un escáner de este tipo. Dentro de los sistemas activos de corto alcance, que son los utilizados para impresión 3D, podemos encontrar escáneres 3D láser, de luz infrarroja y de luz blanca. La precisión, que depende del sistema y su calidad, puede ser entre 0,001 milímetro y 5 milímetros. (formizable, 2015)



Figura 1: Sistema de escaneo activo (formizable, 2015)

1.3 ESCÁNER 3D DE TRIANGULACIÓN

En (Wikipedia, 2015), el escáner 3D de triangulación es un escáner activo que usa la luz láser para examinar el objeto. En este caso el brillo del láser en el objeto se examina mediante una cámara fotográfica para determinar su posición. Dependiendo de lo lejano esté el punto del objeto en que brilla el láser, incidirá en diversos sitios del campo visual de la cámara. Esta tecnología se llama de triangulación porque el punto donde brilla el láser, el emisor laser y la cámara forma un triángulo. De este triángulo conocemos el lado que une la cámara con el emisor, el ángulo de la esquina de este también es conocido, y el ángulo de la esquina de la cámara se puede determinar examinando la localización del punto en el campo visual de la cámara. Así con estos tres valores se obtiene la forma y tamaño del triángulo formado y se determina la posición tridimensional de cada punto del objeto.

En la mayoría de los casos, en lugar de analizar un solo punto, se analiza un segmento, acelerando el proceso de captura. Con respecto a los escáneres de tiempo de vuelo, los escáneres de triangulación son más precisos, del orden de 10 micrómetros, pero tienen un campo de acción de

unos cuantos metros; mientras que los de tiempo de vuelo pueden operar en radios de acción de hasta kilómetros con precisiones del orden de milímetros. (udc.es, 2016)

1.4 ESTADO DEL ARTE DEL ESCÁNER 3D POR TRIANGULACIÓN

Actualmente las tecnologías de modelación de objetos o escenarios están incrementándose gracias al desarrollo de nuevos software y la incorporación de estas en diferentes aplicaciones tales como juegos de computador, antropología, industria, etc.

En (Milroy, Weir, Bradley, & Vickers, 1996), especifica que el uso de escáneres 3D es más eficiente para aplicaciones de ingeniería inversa, más específicamente, el que utiliza laser, ahí se detalla que gracias al modo de operación, para la digitalización de formas libres, como por ejemplo las que son talladas y llevan una geometría compleja, además se soluciona el problema de los métodos de escaneo mediante máquinas CMM que necesitan palpar la pieza, y que podrían dañar superficies frágiles, o podrían ser ineficaces en piezas con superficie suave.

Con respecto a los escáneres 3D de triangulación utilizando laser de luz, se han desarrollado múltiples investigaciones como el prototipado de piezas arqueológicas para conservar el patrimonio cultural, la digitalización de cabezas y rostros, la animación facial, entre otro tipo de aplicaciones como videojuegos. (Crespo Julio & Fernández Zúñiga, 2014)

No podemos decir que es una tecnología totalmente nueva, puesto que escanear significa captar y modelar los objetos o escenas para ser representadas en un computador.

Se han ido desarrollando las técnicas para escaneo 3D para mejorar la precisión, disminuir tiempo y costes, de este modo se han realizado múltiples investigaciones con distintas técnicas y componentes para los escáneres, especialmente en el campo de la arqueología.

En (Tejado Sebastián , 2005), referente a la conservación y difusión del patrimonio arqueológico redacta la experiencia práctica en la utilización de un escáner 3D llamado KONICA MINOLTA Non-Contact 3D Digitalizer VI-910 para la digitalización de pequeños objetos arqueológicos, con una precisión máxima de 8 micras, este escáner laser demostró una mayor calidad de información que un estereoscópico. Además, tiene la ventaja de capturar imágenes a color y representarlas virtualmente con el color original de la pieza. Uno de las desventajas fue la orientación para realizar el escaneo, para esto se realizar pruebas para determinar la orientación más idónea así evitar zonas muertas o sin lectura.

Para conseguir resultados óptimos se colocó una pantalla blanca y se realizaron tomas con giros de 90 grados con cuatro lecturas de la pieza, mediante este proceso se obtuvieron 300.000 puntos de lectura, el procesamiento y tratamiento fue realizado en el programa rapidform2006 el cual dio excelentes resultados.

En (Mañana Borrazás, Rodríguez Paz, & Blanco Rotea, 2008), utilizando la tecnología Leica Cyclone y su respectivo software, determino que la utilización de láser para el proceso de recolección de información o crear la nube de puntos es de mayor eficacia que otro tipo de escáneres, incluso presenta mayor facilidad en la unión de distintos escaneos para la nube de puntos, en caso de la existencia de elementos que interfieren con el escaneado, estos pueden ser eliminados a través de un proceso de depuración manual. La desventaja presentada en esta investigación fue que el procesamiento de la información debía ser ágil y el archivo digital requería de una gran inversión de trabajo por parte de técnicos especialistas.

La empresa "BQ" en los últimos años ha estado trabajando en proyectos de software y hardware libre los cuales se enfocan en tecnologías de prototipado rápido, y el producto que en especial nos interesa es el escáner 3D llamado Ciclop, es un escáner láser rotativo de triangulación 3D, sus especificaciones técnicas se muestran en el anexo A. Utiliza la proyección de 2

láseres sobre el objeto para capturar la geometría y textura del objeto que rota sobre una plataforma giratoria. (bq E. , 2015)

1.5 CÁMARAS WEB

En (Wikipedia, 2015), Es una pequeña cámara digital conectada a una computadora la cual puede capturar imágenes y transmitir las a través de Internet, ya sea a una página web o a otra u otras computadoras de forma privada. Las cámaras web necesitan una computadora para transmitir las imágenes. Es frecuente la aplicación de cámaras web de cierta calidad en diferentes áreas de la investigación científica.

La instalación básica de una cámara web consiste en una cámara digital conectada a una computadora, normalmente a través del puerto USB. El software de la cámara web toma un fotograma de la cámara cada cierto tiempo, puede ser una imagen estática cada medio segundo y la envía a otro punto para ser visualizada, puede alcanzar una tasa de unos 15 a 30 fotogramas por segundo.

Están formadas por una lente, un sensor de imagen y la circuitería necesaria para manejarlos. Existen distintos tipos de lentes, siendo las lentes plásticas las más comunes. Los sensores de imagen pueden ser CCD (charge coupled device) o CMOS (complementary metal oxide semiconductor). Este último suele ser el habitual en cámaras de bajo coste.

1.5.1 Sensor CCD.

En (Liarte, 2016) , este convierte las cargas de las celdas de la matriz en voltajes y entrega una señal analógica en la salida, que será posteriormente digitalizada por la cámara. En los sensores CCD, se hace una lectura de cada uno de los valores correspondientes a cada una de las celdas, como se muestra en la figura 2. Entonces, es esta información la que un convertidor analógico-digital traduce en forma de datos. En este caso, la estructura interna del sensor es muy simple, pero se tiene como inconveniente la necesidad de un chip adicional que se encargue del tratamiento de la información

proporcionada por el sensor, lo que se traduce en un gasto mayor y equipos más grandes.

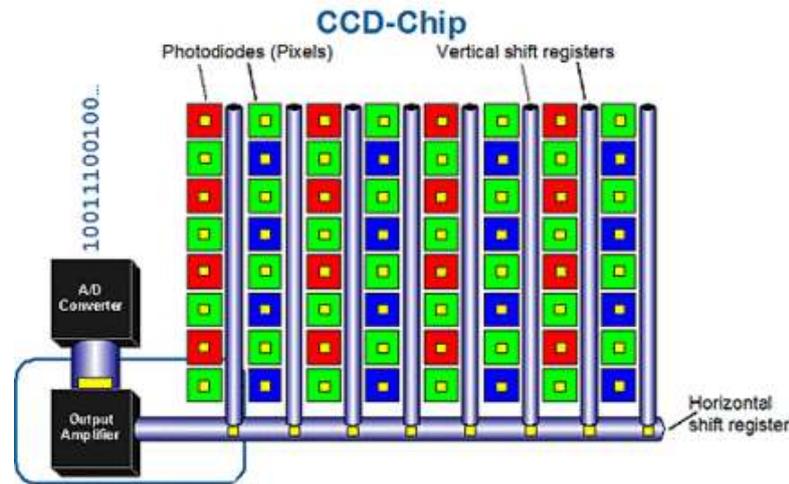


Figura 2: Composición de un sensor CCD

En el aspecto del rango dinámico, es el sensor CCD el ganador absoluto, pues supera al CMOS en un rango de dos. El rango dinámico es el coeficiente entre la saturación de los píxeles y el umbral por debajo del cual no captan señal. En este caso el CCD, al ser menos sensible, los extremos de luz los tolera mucho mejor.

En cuanto al ruido, también son superiores a los CMOS. Esto es debido a que el procesado de la señal se lleva a cabo en un chip externo, el cual puede optimizarse mejor para realizar esta función. En cambio, en el CMOS, al realizarse todo el proceso de la señal dentro del mismo sensor, los resultados serán peores, pues hay menos espacio para colocar los fotodiodos encargados de recoger la luz.

La respuesta uniforme es el resultado que se espera de un píxel sometido al mismo nivel de excitación que los demás, y que éste no presente cambios apreciables en la señal obtenida. En este aspecto, el que un sensor CMOS esté constituido por píxeles individuales, le hace más propenso a sufrir fallos. En el CCD, al ser toda la matriz de píxeles uniforme, tiene un mejor comportamiento. A pesar de todo, la adición de circuitos con realimentación nos permite subsanar este problema en los CMOS, los CCD están un poquito por encima igualmente.

1.5.2 Sensor CMOS.

En (Liarte, 2016), cada celda CMOS es independiente. La diferencia principal es que aquí la digitalización de los píxeles se realiza internamente en unos transistores que lleva cada celda, por lo que todo el trabajo se lleva a cabo dentro del sensor y no se hace necesario un chip externo encargado de esta función, tal como muestra en la figura 3. Con esto conseguimos reducir costes y equipos más pequeños.

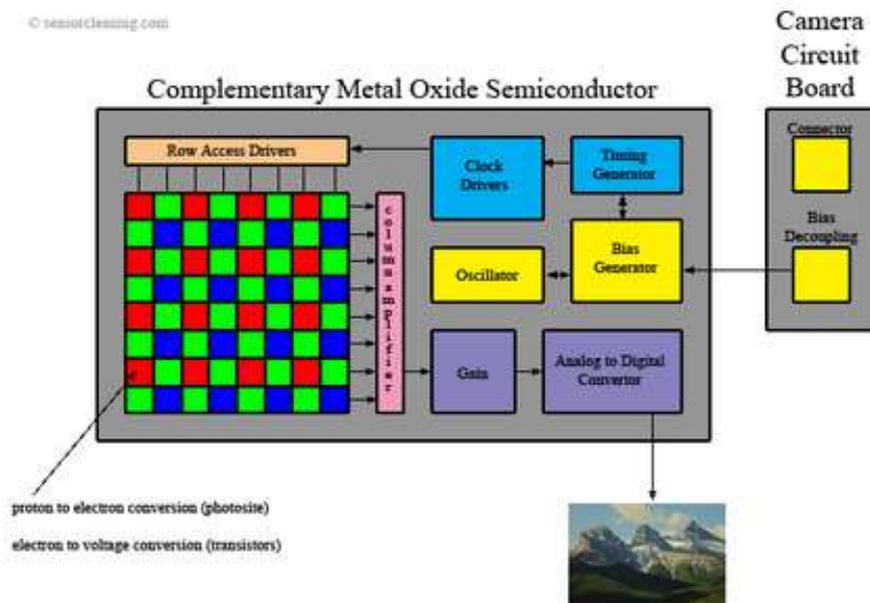


Figura 3: Composición de un sensor CMOS

Además de poseer más calidad, los CMOS son más baratos de fabricar. Otra de las grandes ventajas es que son más sensibles a la luz, por lo que en condiciones pobres de iluminación se comportan mucho mejor. Esto se debe principalmente a que los amplificadores de señal se encuentran en la propia celda, por lo que hay un menor consumo a igualdad de alimentación. Todo lo contrario que ocurría en los CCD.

En cuanto a la velocidad, el CMOS es claramente superior al CCD debido a que todo el procesado se realiza dentro del propio sensor, ofreciendo mayor velocidad. Es esta una de las principales razones por las que Casio empezó a imponer los sensores CMOS en sus cámaras y por la cual éstas permiten grabar vídeos a velocidades de hasta 1000 fps.

Otro aspecto en el que los sensores CMOS son superiores a los CCD es en el blooming. Este fenómeno se produce cuando un píxel se satura por la luz que incide sobre él y a continuación empieza a saturar a los que están a su alrededor. Aunque este defecto puede subsanarse gracias a algunos trucos en la construcción, en el caso de los CMOS nos olvidamos del problema.

1.5.3 Resolución de la imagen.

Es el grado de detalle o calidad de una imagen digital ya sea escaneada, fotografiada o impresa. Este valor se expresa en ppp (píxeles por pulgada) o en inglés dpi (dots per inch). Cuantos más píxeles contenga una imagen por pulgada lineal, mayor calidad tendrá. (Ite.educacion, 2016)

En (Wikipedia, 2016), menciona que la resolución de una cámara fotográfica digital está limitada por el sensor de la cámara que responde a las señales de luz, sustituyendo el trabajo de la película en fotografía tradicional. El sensor se compone de millones de cubos que se cargan en respuesta a la luz, estos cubos responden solamente a una gama limitada de longitudes de onda ligeras, debido a un filtro del color sobre cada uno. Cada uno de estos cubos se llama un píxel, y se utiliza un algoritmo de mosaicismo e interpolación para unir la imagen de cada gama de longitud de onda por píxel en una imagen del RGB donde están las tres imágenes por píxel para representar un color completo.

Los dispositivos CCD transportan la carga a través del chip hasta un conversor analógico-digital. Este convierte el valor de cada uno de los píxeles en un valor digital midiendo la carga que le llega. Dependiendo del número de bits del conversor obtendremos una imagen con mayor o menor gama de color. Por ejemplo, si se utilizase un sólo bit tendríamos valores de 0 y 1, y sólo podríamos representar presencia o ausencia de luz, lo que supondría una imagen en blanco y negro puro.

Por otro lado, los aparatos CMOS contienen varios transistores en cada píxel. El proceso de conversión digital se produce en la propia estructura del sensor, por lo que no se necesita un conversor añadido.

1.5.4 Calidad de la imagen.

En (Wikipedia, 2016), menciona que la cuenta de píxeles comúnmente es lo único que se muestra para indicar la resolución de una cámara fotográfica, pero esta es una idea falsa. Hay varios factores que afectan la calidad de un sensor. Algunos de estos factores incluyen, el tamaño del sensor, la calidad de la lente, la organización de los píxeles y el rango dinámico del sensor.

A muchas cámaras fotográficas compactas digitales se las critica por tener demasiados píxeles en relación al pequeño tamaño del sensor que incorporan. El aumento de la densidad de píxeles disminuye la sensibilidad del sensor. Pues cada píxel es tan pequeño que recoge muy pocos fotones, y así para conservar la relación señal-ruido se deberá iluminar más el sensor. Esta disminución de la sensibilidad conduce a cuadros ruidosos, calidad pobre en sombras y generalmente a imágenes de pobre calidad si están escasamente iluminadas.

1.6 LASER LINEAL

En (Crespo Julio & Fernández Zúñiga, 2014), explica que el láser es una forma de radiación electromagnética que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza controlados. El primer dispositivo láser con resultados satisfactorios fue diseñado y patentado por Theodore H. Maiman en 1960, el cual consistía en un rubí bombeado por una lámpara de flash.

Generalmente los rayos láser son emitidos de forma unidimensional. La utilización de un dispositivo láser de este tipo para el diseño de un escáner 3D es muy ineficiente, haciendo lento el proceso de captura de datos del objeto a escanear. Por esa razón se han diseñado láseres de línea, los cuales despliegan los rayos láser en un determinado ángulo formando un plano luminoso, cuya área dependerá del ángulo de su apertura y su distancia con respecto al objeto, pasando de cubrir un

punto en el espacio a una línea, con lo cual se reduce la dificultad y el tiempo de toma de datos.

1.6.1 Tipos de láseres.

1.6.1.1 Semiconductores.

Diodos láser: es el emisor láser más común, utiliza una unión semiconductor p-n similar a la que se utiliza en los led pero en este caso está colocada en una cavidad reflectora. Son utilizados en punteros láser, impresoras láser, grabadores/reproductores de CD, DVD, Blu-Ray, HD-DVD y como energía de bombeo de muchos láseres de estado sólido.

Láser de punto cuántico: usa puntos cuánticos como el medio activo en su región de emisión de luz, exhiben una estructura electrónica similar a la de los átomos, presentan un comportamiento bastante cercano a los láseres de gas, pero no los inconvenientes asociados a los tradicionales láseres de semiconductores basados en medios activos sólidos o de pozo cuántico. Se han observado mejoras en la modulación de ancho de banda, umbral de excitación, ruido relativo de intensidad, factor de realce de ancho de línea y estabilidad con la temperatura.

Láser de cascada cuántica: (comúnmente llamado QCL en inglés), funciona con inyección eléctrica en un material semiconductor estructurado. Bajo un determinado potencial eléctrico, la inversión de población es realizada cuando niveles energéticos de la banda de conducción se alinean de una forma determinada, estos forman una serie de «cascadas» o «escalones energéticos». Un electrón, al recorrer una a una estas cascadas energéticas, genera cuantos de luz, fotones, en cada uno de estos saltos energéticos.

1.6.1.2 Gas.

Láser de Helio-Neón (HeNe): es un tipo de láser de gas que utiliza como medio activo una mezcla gaseosa de helio y neón, emiten una longitud de onda de 633 nm, luz visible de color rojo. Son utilizados en aplicaciones de metrología de alta precisión. Es una mezcla de helio y

de neón en una proporción de 5:1. Los láseres de helio-neón tienen unas potencias de salida de entre 1 mW y 100 mW; y una longitud de onda es de 632.816 nm en el aire, que corresponde a una longitud de onda de 632,991 nm en el vacío.

Láser de dióxido de Carbono: emite en el infrarrojo lejano a 10.6 μm .

Láser de Nitrógeno: emite en el UV a 337 nm normalmente en régimen de operación pulsado.

Láser excimer: el medio activo puede estar formado por diversas moléculas excímeras de vida muy corta formadas por gases nobles y halógenos, producen luz ultravioleta.

Láser de Argón: tiene varias líneas de emisión aunque las principales son 514 nm y 488 nm. Trabaja en régimen continuo con potencias de hasta unas decenas de W.

1.6.1.3 Estado sólido.

Estos láseres emplean típicamente vidrios, cristales o fibras dopadas como medio activo. Aunque los semiconductores son también de estado sólido, se suelen tomar en una categoría diferente. Algunos láseres de estado sólido son:

Materiales dopados con tierras raras:

- Láser neodimio-YAG (Yttrium Aluminium Garnet) dopado con neodimio trivalente. Emite en el infrarrojo cercano a 1064 nm.
- YAG dopado con erbio trivalente, emite a eficientemente a 2900nm
- YAG dopado con tulio trivalente, que opera normalmente a 2015 nm.
- YAG dopado con holmio trivalente, que emite a 2090 nm.
- Láser de fibra dopada con erbio, se utiliza principalmente como amplificador para comunicaciones ópticas de larga distancia.

Materiales dopados con metales de transición:

- Láser de zafiro dopado con titanio trivalente, entre 650 y 1100 nm.
- Láser de rubí. Fue el primer tipo de láser que se produjo, emite luz a 694.3 nm (Wikipedia, 2016).

Los laser también son regulados por la norma UNE EN 60825-1/A2, la cual regula su operación y los peligros que estos pueden representar, la clasificación es la figura 4:

Clase 1	Productos láser que son seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa.
Clase 1M	Láseres que emitiendo en el intervalo de longitudes de onda (λ) entre 302,5 y 4000 nm son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero que pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos para visión directa. (Ver 8.2 en la norma).
Clase 2	Láseres que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400 y 700 nm. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección aunque se usen instrumentos ópticos.
Clase 2M	Láseres que emiten radiación visible (400 y 700 nm). La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral, pero la visión del haz puede ser peligrosa si se usan instrumentos ópticos. (Ver 8.2)
Clase 3R	Láseres que emiten entre 302,5 y 106 nm, cuya visión directa del haz es potencialmente peligrosa pero su riesgo es menor que para los láseres de Clase 3B. Necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control del usuario que los aplicables a láseres de Clase 3B. El límite de emisión accesible es menor que 5 veces el LEA de la Clase 2 en el rango 400-700 nm, y menor de 5 veces el LEA de la Clase 1 para otras longitudes de onda.
Clase 3B	Láseres cuya visión directa del haz es siempre peligrosa (por ej. dentro de la Distancia Nominal de Riesgo Ocular). La visión de reflexiones difusas es normalmente segura (véase también la nota 12.5.2c).
Clase 4	Láseres que también pueden producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños sobre la piel y pueden también constituir un peligro de incendio. Su utilización precisa extrema precaución.

Figura 4: Clasificación de laser según la norma UNE EN 60825-1/A2

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y ALTERNATIVAS DE DISEÑO

2.1 ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE PRINCIPIO DE TRIANGULACIÓN

Anteriormente se realizó un estudio sobre escáneres 3D utilizando el principio de triangulación espacial, sin embargo no se ha investigado a fondo de que trata y por qué se lo utiliza en la tecnología de digitalización 3D.

La mayoría de los sistemas de digitalización tridimensional de piezas para tamaños comprendidos entre unos pocos centímetros y hasta dos o tres metros se basan en el principio de la triangulación espacial. (Rubio Gil, Martínez Rubio, Baena Preysler, Fernández Martín, & Finat Codes, 2010)

En (Lerma, Cabrelles, Navarro, & Seguí, 2013) hacen referencia a la eficiencia de la luz láser sobre la fotogrametría, incluyendo en estos dos trabajos que el sensor receptor de la señal de luz CCD debe capturar los datos de profundidad del objeto, es otras palabras la posición del espectro del láser en la superficie del objeto en análisis. Al acercarse la superficie al sensor, el espectro reflejado se desplaza en sentido horizontal, si el observador se encuentra a un lado del láser. El desplazamiento censado, se puede relacionar directamente con la distancia en la que se ubica la superficie respecto al sensor CCD. (Cock, 2012)

No solo se puede aprovechar el CCD de la cámara para guardar la matriz de datos sino también para dotar de color a cada uno de los puntos registrados, simplemente actuando como cámara fotográfica capturando el escenario, este proceso requiere de un mayor análisis, puesto que para determinar el color se debe tomar el valor de la matriz RGB la cual es excesivamente sensible a la luz. (Rubio Gil, Martínez Rubio, Baena Preysler, Fernández Martín, & Finat Codes, 2010)

En el último caso, si se toma en cuenta el color de los puntos del objeto es necesario trabajar con seis coordenadas para cada punto; ya sea X, Y, Z, R, G, B . (Rubio Gil, Martínez Rubio, Baena Preysler, Fernández Martín, & Finat Codes, 2010). O $r, \alpha, \theta, R, G, B$ en coordenadas esféricas (Cock, 2012), tal como se muestra en la figura 5.

La cámara proporciona los parámetros más importantes para el cálculo de la profundidad, cuando se trata de calcular las coordenadas espaciales a partir de imágenes es imprescindible que estas sean lo más exactas posible, para ello es necesario un proceso de calibración el cual da a conocer que variaciones se producen como consecuencia de la formación y adquisición de imágenes con una determinada cámara, mediante este proceso también se obtienen los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara.

Con la anterior especificación de que los láser y la cámara deben situarse en puntos fijos, muchos fabricantes como Konica Minolta e investigadores han coincidido en implementar un sistema rotativo para incrementar el ángulo de visión y limitar el movimiento. Mientras más resolución posea este sistema rotativo proporciona mayor información al sensor sobre la superficie del objeto. (Gil, Manchón, Torres, Pomares, & Ortiz, 2002)

2.2 DETERMINACIÓN DE CONDICIONES Y PARÁMETROS DE DISEÑO DEL ESCÁNER 3D

2.2.1 Parámetros.

Según la publicación (Cock, 2012), el método de triangulación mediante laser consiste en determinar a qué profundidad se encuentra la superficie del objeto escaneado mediante la interpretación de la imagen generada por un haz de luz láser reflejada en la superficie analizada, basándose en los planteamientos teóricos del comportamiento de la perspectiva, esto se logra capturando estos valores de posición en un CCD.

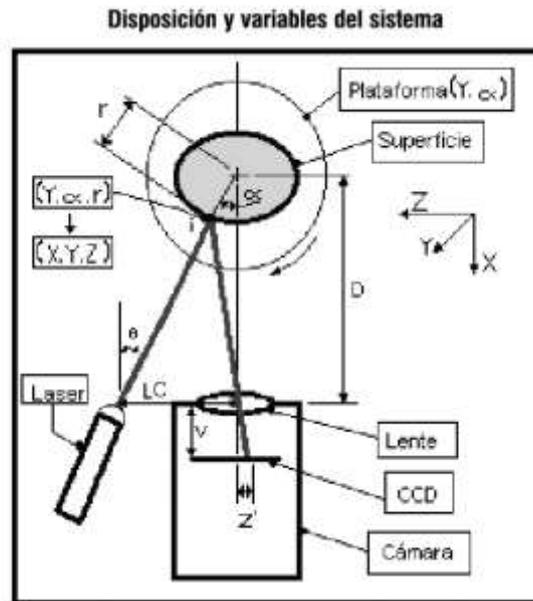


Figura 5: Variables del modelamiento matemático

En la figura 5 se puede apreciar como varía la posición del reflejo láser sobre el objeto en análisis desde el punto de vista CCD, permitiendo así medir los cambios de señal debidos a la variación en la distancia de la superficie respecto al sensor.

Para determinar las ecuaciones del sistema, se definen las variables como:

LC: Distancia entre el láser y la cámara.

V: Distancia del CCD a la lente de la cámara (Se obtiene experimentalmente).

i: Punto de incidencia del láser en la superficie del objeto.

D: Distancia de la cámara al centro e giro de la plataforma de la máquina.

Θ : Ángulo respecto a la cámara.

σ : Ángulo de visión del reflejo del láser en la cámara.

Y: Ángulo auxiliar de cálculo.

ξ : Ángulo Auxiliar de cálculo.

Bl: Distancia del punto de incidencia del láser a la cámara.

R: Proyección del radio en el eje óptico de la cámara.

r: Radio del objeto en el punto de incidencia del láser.

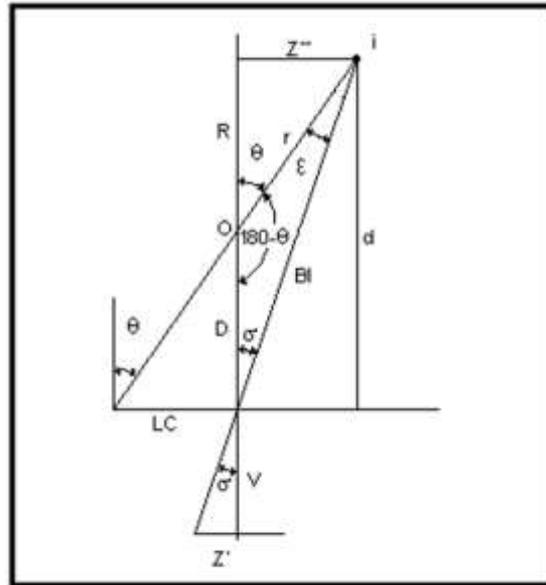


Figura 7: Situación de radio negativo

Cuando se tiene radio negativo tenemos la siguiente ecuación:

Ecuación 2: Situación de radio negativo

$$r(Z') = \frac{\left[\frac{D * \text{sen}(180 - \theta)}{\text{sen}\left(\theta - \tan^{-1}\left(\frac{Z'}{V}\right)\right)} \right] * \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{Z'}{V}\right)\right) - D}{\cos\theta}$$

Al emplearse el método de triangulación se puede obtener el radio de un objeto en una determinada posición. Si esta posición se denota en coordenadas cilíndricas (Y, α) , al encontrar el radio r , se tienen las tres coordenadas para conocer la posición completa de un punto (r, Y, α) las cuales pueden ser convertidas a sistema rectangular (X, Y, Z) y luego de conocer todos los puntos del sólido, se puede reconstruir virtualmente el modelo escaneado.

En base a las formulas anteriores, ya se pueden generar algoritmos para desarrollar el software del escáner, en nuestro caso se utilizaran dos laser y una cámara, el principio no cambia por el hecho de usar dos laser, solamente realiza dos triangulaciones, una triangulación para cada laser, el proceso será sistemático, los laser se activaran intercalados y realiza el cálculo de coordenadas de los puntos de un solo fotograma a la vez, es decir, se realiza un proceso de triangulación para cada fotograma, el hecho de usar dos laser

en lugar de uno tiene ventajas, como el incrementar la cantidad de puntos obtenidos, generando un modelo digital con mayor fidelidad al objeto escaneado.

2.2.2 Modo de operación.

Un punto importante a considerar es como funcionara el escáner; primero, se determina si será un equipo autónomo en términos de funcionalidad, lo que quiere decir que no requerirá equipo adicional para funcionar, ya sean computadores, monitores o algún tipo de periférico como por ejemplo un teclado, un mouse, etc.

Las ventajas y desventajas de construir un escáner autónomo en términos de operación se detallan en la tabla 1.

Tabla 1:

Ventajas y desventajas de un escáner 3D autónomo en términos de operación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Se evitan conexiones adicionales a las que estarán previamente establecidas en la máquina. • Podrá funcionar sin la necesidad de instalar software adicional. • Podrá ser utilizado como una maquina independiente, en cualquier lugar que cuente con la alimentación eléctrica necesaria. • Se evitan problemas de compatibilidad tanto de software como de hardware que tienen las maquinas que requieren un computador o periféricos adicionales para funcionar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tamaño • Su poder de procesamiento será limitado al diseño, ya que se utilizara un controlador cuyo poder de procesamiento es inferior a la de un ordenador doméstico. • Poca flexibilidad para realizar mejoras que impliquen modificaciones de hardware.

Otro aspecto importante a considerar es si el escáner tendrá iluminación controlada sobre el objeto a ser escaneado o se utilizara la luz ambiente existente al momento de realizar el escaneo, como sabemos, al no utilizar un

ambiente de luz controlado, podemos suponer el peor de los escenarios posibles en un entorno que utiliza la luz ambiente, y este produce una variación de luz que puede ser aleatoria o con un patrón fijo, de cualquier manera esto supone un problema para el proceso ya que se basa en adquirir y tratar imágenes mediante una cámara digital, pero al usar laser para la adquisición de imágenes, será en teoría menos sensible a los cambios de luz, por otro lado, si usamos un ambiente controlado de luz para realizar el proceso, se corre el riesgo de que una mala ambientación produzca errores, sombras indeseadas o que la iluminación no sea homogénea en todo el objeto.

Es difícil saber de una manera teórica o proyectarse que tanto influenciara los cambios de luz en este escáner, así que estas dos alternativas, tanto el ambiente de luz controlado que implicara encapsular el escáner como el de generar un escáner que use la luz ambiente serán consideradas hasta el final de la construcción y se determinara la mejor opción de una manera experimental realizando pruebas de escaneo.

2.2.3 Condiciones.

Lo primordial es definir el espacio de trabajo para el objeto a escanear, es decir es necesario definir el tamaño, textura, peso, material del objeto.

Empezando por el tamaño podemos decidir las dimensiones basados en el área de visión de la cámara y el tamaño deseado por el diseñador. También es necesario destacar que las dimensiones no pueden ser muy grandes debido a que este tipo de escáner 3D con sistema de rotación no puede tolerar dimensiones de más de un metro en los más sofisticados desarrollados en laboratorios (Rubio Gil, Martínez Rubio, Baena Preysler, Fernández Martín, & Finat Codes, 2010), por este motivo el nuestro diseño se lo realizara para unos cuantos centímetros, en referencia al trabajo de BQ escáner 3D Ciclop que se habló en el capítulo uno, hemos impuesto una área de escaneo de 200mmx200mm.

La geometría de la figura es un parámetro a discutir también, puesto que en las investigaciones realizadas existen un sinnúmero de dificultades en

cuanto a geometrías complejas, lo ideal son geometrías cilíndricas o similares, así lo explica el documento citado en el apartado anterior.

Con respecto a la textura debemos tomar en cuenta que trabajaremos con una cámara, una superficie reflejante representa un obstáculo para este tipo de escáner, de esta manera una de las condiciones iniciales y característica técnica del mismo será que opera con superficies no reflejantes, debido a que la luz del láser no puede ser visto por el CCD de la cámara.

Continuando con el peso, tomando en cuenta que se implementara un sistema o la mesa rotativa y las dimensiones, se utilizara como condición de diseño un peso de 1.5kg, con este se realizara la selección del motor y mecanismo para la mesa.

Respecto a la precisión de escaneo, esperamos conseguir una precisión de 0.5 mm.

Finalmente el material no tiene complicación alguna, mientras cumpla con la textura y peso requeridos.

2.3 ALTERNATIVAS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

2.3.1 Estructura.

Las dimensiones del escáner estarán en base a la cámara, laser, placas de control, etc.

Antes de comenzar con el diseño de la estructura es necesario definir las tecnologías a las que se tiene acceso, como son el mecanizado CNC e impresión 3D en los laboratorios de la universidad, teniendo las ventajas y desventajas siguientes mostradas en la tabla 2 se seleccionara la tecnología de prototipado:

Tabla 2:

Ventajas y desventajas de las tecnologías de prototipado y manufactura existentes en el laboratorio CNC

	Ventajas	Desventajas
Impresión 3D	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo es menor al del mecanizado. • EL costo es menor • Reducción de desechos de material (Chancusi Toapanta & Navarrete Parra, 2014) • Versatilidad, capacidad de cambiar fácilmente el diseño de una pieza e imprimirla. • El procedimiento de impresión es relativamente sencillo 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisión limitada para impresoras con el método FDM • Dimensiones de impresión inferiores. • Las propiedades mecánicas de los materiales usados en impresión 3D son inferiores a las propiedades de los materiales que se usan en el mecanizado.
Mecanizado CNC	<ul style="list-style-type: none"> • Las propiedades mecánicas, dependiendo del material son superiores a los materiales usados en impresión 3D. • Mayor precisión. • Se pueden generar piezas de dimensiones superiores a las de la impresión 3D 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo mayor • Se necesita equipo y herramientas especiales si se requiere mecanizar geometrías demasiado complejas • El tiempo de mecanizado es mayor al requerido por la impresión 3D • Falta de alternativa en fallas. (Clemente, 2015) • El procedimiento de mecanizado, en general es más complicado que el proceso de impresión 3D

En el análisis de la tabla 2 se determina que la estructura será manufacturada en una impresora 3D.

Se han estudiado las diferentes opciones disponibles para alcanzar la mayor resistencia y acabado, de las opciones disponibles al momento del desarrollo de la estructura se destacan las siguientes:

a. Impresora 3D Dimensión BST 768.

Disponible en el laboratorio CNC, esta impresora usa el principio de impresión por inyección. Esta tecnología es la única que permite la impresión de prototipos a todo color.

Esta impresora tiene una resolución máxima de 0.254 mm, pero este parámetro se puede ajustar a las necesidades del modelo final, esto influirá en el tiempo de impresión; esta impresora tiene un volumen máximo de prototipado de 203x203x305 mm. (Stratasys, 2007)

Utiliza el material P400, sus propiedades mecánicas se muestran a continuación en la Tabla 3

Tabla 3:

Propiedades mecánicas del ABS P400 (*Buildparts, 2014*)

Propiedades técnicas	TEST	METRIC	IMPERIAL
Resistencia a la tracción	ASTM D638	30.3 MPa	4,390 PSI
Módulo de tensión	ASTM D638	1,860 MPa	270,000 PSI
Alargamiento a la rotura (%)	ASTM D638	6%	6%
Resistencia a la flexión	ASTM D790	41 MPa	6,000 PSI
Módulo de flexión	ASTM D790	1,834 MPa	266,000 PSI
Temperatura de deformación por calor	ASTM D648	@264 PSI: 98.9°C	@264 PSI: 210°F
Temperatura de transición vítrea	DMA, (E)	104 °C	219 °F
Dureza	Shore D	D 108	D 108
Clasificación de la llama	UL94	HB	HB

b. Impresora 3D EOS Formiga P110

Esta impresora usa el principio de sinterizado laser selectivo (SLS). Es una técnica de adición de prototipado rápido en el cual se deposita una capa de polvo, de unas décimas de milímetro, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO2 sinteriza el polvo en los puntos seleccionados causando que las partículas se fusionen y solidifiquen, utiliza finos de mineral de hierro, polvos recolectados en filtros y otros materiales que contienen hierro, etc (Wikipedia, 2016)

Esta impresora tiene una resolución de: 0.06 mm, 0.1 mm, 0.12 mm; dependiendo del material y su volumen de impresión es de: 200 mm x 250 mm x 330 mm. En cuanto al material, puede utilizar diversas variaciones de poliamida, pero el que podemos conseguir y utilizar en este equipo es el P2200 (EOS, Asiannet, 2007), sus propiedades mecánicas se listan en la tabla 4.

Tabla 4:

Propiedades mecánicas del material PA2200 (EOS, Shapeways, 2008)

Propiedades técnicas	TEST	METRIC	IMPERIAL
Resistencia a la tracción	ASTM D638	48 MPa	6,962 PSI
Módulo de tensión	ASTM D638	1,700 MPa	247,000 PSI
Alargamiento a la rotura (%)	ASTM D638	24%	24%
Resistencia a la flexión	ASTM D790	58 MPa	8412 PSI
Módulo de flexión	ASTM D790	1,500 MPa	217,000 PSI
Temperatura de fusión	ASTM D648	172 – 180 °C	

Como podemos apreciar en las características mecánicas de cada material, el PA2200 tiene una mayor resistencia a la tracción y a la flexión que el material P400, lo que significa que será más resistente a las cargas axiales y normales, por otro lado su módulo de tensión y flexión es menor al del material P400, lo que indica que es menos flexible, pero más resistente, para nuestra aplicación, que prácticamente es una estructura fija cuyas medidas deben ser lo más exactas posibles, se utilizará el material PA2200.

En cuanto a las diferencias entre las impresoras, se destaca la resolución, ya que la Dimensión BST 768 tiene una máxima de 0.256 mm y la EOS Formiga P110 tiene una máxima de 0.06mm, esto indica que se obtendrá un acabado más fino y preciso.

Después de comparar ambas alternativas de impresión, se ha decidido utilizar la impresora EOS Formiga P110, gracias a que las propiedades mecánicas del material se ajustan más a nuestras necesidades y a una resolución adecuada para obtener acabados más detallados.

Seguido de analizar las tecnologías a las que se tiene acceso para desarrollar este proyecto, se debe analizar la manera en la que el escáner funcionará en términos de movilidad, básicamente solo hay dos maneras de funcionamiento:

- La pieza a ser escaneada se mantiene fija y la cámara junto con los laser se mueven para obtener la información del sólido.
- La cámara y los laser se mantienen fijos y la pieza se coloca en una mesa móvil, la cual hará girar la pieza para obtener la información necesaria.

Se ha determinado que la mejor opción es construir una mesa giratoria, la cámara y los laser fijos, en primer lugar por su facilidad en el diseño, además que el trabajar con una cámara móvil, puede conllevar problemas de estabilización de imagen y descalibración, adicionalmente, por tratarse de un escáner que tomara información de piezas relativamente pequeñas.

La necesidad de crear un sistema con cámara y laser móviles, podría ser aplicable a un escáner para digitalizar piezas grandes y difíciles de rotar, dicho esto se establece que existirá una mesa giratoria para rotar los objetos y el resto de componentes serán fijos.

Se optará como alternativa de diseño la mesa giratoria de la compañía BQ, presente en su Escáner 3D Ciclop, el escáner características similares a las que se requieren en este diseño y se detallan en el apartado 1.4.

El diseño de la mesa rotativa de BQ Escáner 3D Ciclop se presenta en la figura 8 y descritos sus componentes en la tabla 5.



Figura 8: Estructura del disco BQ Escáner 3D Ciclop

Tabla 5:

Detalle de componentes de la estructura del disco

No	Nombre	Uds	Descripción
1	Motor	1	Motor paso a paso Nema 17 con conector
2	Soporte de motor	1	Pieza imprimible que conecta el motor con el rodamiento. El motor se sujeta mediante los tornillos M3, mientras que

			el rodamiento encaja por presión
3	Tornillo Allen M30x10mm	5	Se utilizan cuatro para anclar el motor al soporte del motor y uno para fijar el eje del motor al acoplamiento del eje
4	Tuerca M3	1	Se aloja en el acoplamiento del eje
5	Acoplamiento del eje	1	Pieza imprimible que transmite el movimiento del motor al disco. Se acopla al eje chavetado mediante una tuerca y un tornillo M3
6	Tornillo M8x30	3	Tornillos de cabeza hexagonal utilizados para anclar el soporte del disco con el rodamiento y el disco
7	Pestañas de anclaje	3	Pieza imprimible que conecta el rodamiento con el disco mediante tuercas y tornillos M8
8	Rodamiento de bolas 16014	1	Soporta el peso del objeto para que no actúe directamente sobre el eje, permitiendo el giro
9	Soporte del disco	1	Pieza imprimible que conecta el rodamiento con el disco mediante las pestañas de anclaje. Esta pieza transmite el movimiento de rotación del eje del motor al disco
10	Disco de metacrilato	1	Plataforma de 20 cm de diámetro y 8 mm de espesor. Tiene 3 orificios para los tornillos M8. Garantiza que la superficie es perfectamente plana y resistente
11	Superficie antideslizante	1	Superficie de 20 cm de diámetro de caucho EPDM antideslizante que se pega al disco. Aumenta la adherencia de los objetos a escanear

El componente principal de este disco es el motor paso a paso Nema 17 con conector, capaz de soportar 2kg sin tomar en cuenta el peso de los demás componentes que conforman el disco, con 1.8° por paso, compone 200 pasos por rotación, y hasta 1600 pasos modificado por software.

Básicamente el principio de funcionamiento de esta mesa giratoria es el mismo que en otros escáneres, así que no consideramos necesario poner más ejemplos de mesas giratorias.

2.3.2 Dispositivos electrónicos.

a. Controlador.

Al arrancar con las alternativas de control electrónico, un punto clave es la selección del controlador que será el que maneja todos los actuadores y, de ser el caso los sensores del sistema, este es un punto clave ya que se debe tener en cuenta aspectos esenciales como la estabilidad, escalabilidad, facilidad de programación y reprogramación, compatibilidad con protocolos de comunicación y por supuesto, la disponibilidad en el mercado y su costo.

Entre las principales alternativas de microcontroladores tenemos las siguientes:

- PIC
- dsPIC
- AVR
- Arduino
- Raspberry Pi

En la tabla 6 se ha ponderado los parámetros que son más importantes para el proyecto con una valoración del 1 al 10, siendo el 10 la mejor calificación.

Tabla 6:

Características de distintos tipos de controladores

Controlador	Costo	Accesibilidad	Rapidez	Robustez	Entorno de programación	Promedio
PIC	9	10	7	7	7	8
AVR	10	8	8	8	8	8,4
DSPIC	8	7	9	7	7	7,4
Arduino	8	9	8	9	9	8,4
Raspberry Pi	7	7	10	10	10	8,8

Como podemos apreciar en la tabla 6, la mejor opción es la Raspberry Pi, y gracias a sus características, hace posible la opción de crear un escáner

autónomo, ya que no es necesario el uso de un computador para su funcionamiento y será una máquina que no necesitará ningún equipo adicional para escanear.

b. Laser lineales.

Respecto a los laser que serán utilizados, como se analizó en el apartado 1.6, se ha optado por usar laser lineales clase 1; se tomó esta decisión en primer lugar por sus requerimientos de funcionamiento, no necesita una potencia alta para funcionar, en segundo lugar no representan un riesgo para la salud a pesar de que siempre se deben tomar las respectivas precauciones.

c. Motor.

En cuanto a la selección del motor, recordemos que será utilizado para una mesa giratoria, por ende se necesita controlar exactamente la posición, así que las alternativas se reducen a dos, los motores a pasos y los servomotores, a continuación se muestran las ventajas y desventajas de utilizar uno u otro en las tablas 7 y 8.

Tabla 7:

Ventajas y desventajas de los servomotores DC

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada respuesta dinámica • Estabilidad de velocidad, maneja altas velocidades y gran aceleración. • Gran precisión de posicionamiento. • Bajo momento de inercia. • Alta capacidad de sobrepasar. • Eficiencias del 80 al 90%, desprenden menos calor, generan menos ruido. • Mayores capacidades de torque. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad muy baja en el mercado nacional. • Costoso. • La conmutación depende de: la resolución del encoder o la capacidad de cálculo del controlador. • Los encoder también necesitan ser cambiados. • Las escobillas deben ser cambiadas cada 2000 horas de operación. • No se pueden mantener completamente estables en una posición con aplicación de

fuerzas.

- Propenso a daños mecánicos por sobre torques.

Tabla 8:

Ventajas y desventajas de los motores a pasos PAP

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Solución más económica. • Alta disponibilidad. • Gran resolución de micro pasos. • Precisión en su movimiento. • Pueden quedar enclavadas sus bobinas para mantener la posición con el máximo torque. • Elevada respuesta mecánica. • Controladores más simples. • Menos propenso a daños por sobre torque. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajas potencias • Resonancia a altas velocidades, se genera ruido y vibraciones. • Eficiencia aproximada del 70%. • No cuentan con un sistema de control en lazo cerrado. • Velocidades bajas limitadas por la frecuencia de conmutación. • Los motores a pasos poseen su mayor torque solo a bajas velocidades.

Para seleccionar el motor se realizara una ponderación de 0 a 10, siendo 10 la mejor puntuación de accesibilidad y se detalla en la tabla 9.

Tabla 9:

Selección del motor

Ítem	Servomotor	Motor a pasos
Disponibilidad	8	10
Solución económica	8	10
Utiliza menos recursos	9	10
Precisión de posicionamiento	10	9
Resolución de micropasos	8	10
Mayor torque a bajas velocidades	10	9
Controlador más simple	6	9
Total	59	67

La ponderación más alta resulta ser la del motor a pasos, con 67 puntos. Por lo tanto, se rectifica la decisión de utilizar el motor a pasos NEMA 17.

d. Cámara.

La selección de la cámara es un punto muy importante ya que será la encargada de tomar la información necesaria para realizar el escaneo, como se explica en el apartado 1.5, existen diversos parámetros que influyen en el rendimiento de una cámara, así que se tomará en cuenta esos parámetros para la selección una cámara acorde a las necesidades, entre las opciones más destacadas se encuentra la cámara usada en el escáner 3D Ciclop de la empresa BQ citado en el apartado 1.4; se tomará como opción esta cámara ya que el escáner en el que se usó, tiene unas especificaciones técnicas similares a las que se pretende llegar con este escáner, especialmente la precisión de escaneo de 0,5mm.

Otras opciones pueden ser las siguientes cámaras, las cuales están disponibles en el mercado local y están al alcance al momento de la realización del proyecto:

Logitech C270 HD

Esta es la cámara que se muestra en la figura 9, fue utilizada en el escáner 3D Ciclop de la empresa BQ, sus especificaciones son las siguientes:

- Videoconferencias HD (1280 x 720 píxeles) con el sistema recomendado
- Captura de vídeo: Hasta 1280 x 720 píxeles
- Tecnología Logitech Fluid Crystal™
- Fotos: Hasta 3.0 megapíxeles (mejora por software)
- Micrófono integrado con reducción de ruido
- Certificación USB 2.0 de alta velocidad (se recomienda)
- Clip universal para monitores LCD, CRT o portátiles



Figura 9: Cámara Logitech C270 HD

Genious WideCam 320

Como se muestra en la figura 10, a pesar de ser una cámara web, cumple con parámetros de resolución elevados además de otras características que la hacen idónea para el uso en el proyecto, sus especificaciones son:

- Ángulo de visión de hasta 100 grados
- Excelentes fotografías de 8MP
- Zoom digital 3X
- Sensible micrófono incorporado
- Foco manual
- Enganche universal incorporado



Figura 10: Vista general de la cámara Genious WideCam 320

Klip KDC-600

En la figura 11 se muestra una cámara con dimensiones similares a las descritas anteriormente, sus especificaciones son las siguientes:

- Video resolution: up to 1600 x1200 píxeles*
- Picture resolution: 12.0 megapíxeles*
- Frame rate: up to 30 fps

- Focus distance: 30mm ~ infinito (VGA)
- Image format: RGB24 y YUY2
- Interface: USB 2.0
- Configuration: Plug and play
- Cable length: 1.5 m
- System requirements: Windows family or Mac OS



Figura 11: Cámara Klip KDC-600

Las cámaras presentadas anteriormente son algunas de las disponibles en el mercado, se considera que las anteriores son las que mejor se adaptan a los requerimientos del escáner, además que son las que se puede adquirir fácilmente.

2.3.3 Herramientas de software.

La selección de herramientas de software es un punto crítico, ya que prácticamente el software es la parte más importante de este proyecto, este será el encargado del manejo de la información y de realizar las operaciones necesarias para el desarrollo de la aplicación propuesta, hay que tener en cuenta que se trabajará manejando imágenes, así que es imprescindible el uso de librerías de OpenCV, por lo tanto se limita un poco las opciones de elección del lenguaje de programación que se puede utilizar para realizar el programa principal, así que tomando en cuenta que se realizaran operaciones usando OpenCV, una interfaz gráfica, comunicación serial con los actuadores del sistema y con la cámara digital, se considerará que los lenguajes de programación que pueden ser utilidad para este propósito son esencialmente:

- Python
- C++

En el caso de requerir un controlador auxiliar para manejo de actuadores, este sería arduino, gracias a su facilidad de programación y por ser muy versátil al hablar de comunicación, en ese caso se requerirá el uso de la herramienta de software IDE de arduino.

2.4 DISEÑO MECATRÓNICO

2.4.1 Diseño Mecánico

Para el diseño mecánico, se ha tomado en cuenta la estructura del escáner Ciclop de la compañía BQ, su estructura básicamente consta de dos partes, un pedestal, el cual es fijo y donde están ubicados los laser y la cámara, la otra parte es la mesa giratoria y como su nombre lo dice, es móvil y aquí es donde se colocara la pieza a ser escaneada, tendrá la capacidad de girar 360 grados y soportara el peso correspondiente a las especificaciones técnicas del escáner que se está desarrollando, la mesa se muestra en la figura 12.

Al ser una estructura de varias piezas y tomando en cuenta el análisis descrito en el apartado 2.3 que se refiere a las alternativas de diseño, se ha decidido que la estructura será impresa en 3D, al menos las piezas principales, ya que incluyeron elementos secundarios para compensar la limitante de no poder imprimir piezas con dimensiones superiores a una impresora 3D estándar, estos elementos son arandelas, tuercas, varillas roscadas M8 además de un rodamiento de bolas de numeración: 16014; el cual se utilizó para dar mayor movilidad a la mesa giratoria, por tanto los elementos principales del escáner se diseñaron para no superar las dimensiones especificadas en las características técnicas de las impresoras 3D estándar, y sin preocuparnos en que la geometría pueda ser compleja, todos los planos y la lista de elementos secundarios se adjuntaron en el anexo G.



Figura 12: Mesa giratoria ensamblada en Solidworks 2014

Como se puede apreciar en la figura 13 correspondiente al despiece de la mesa giratoria, la mayoría de piezas de la estructura principal serán impresos en 3D, cabe destacar que se utilizó un rodamiento de bolas 16014, cuyas características serán detalladas en el anexo B, el criterio de selección de este dispositivo está en base a las dimensiones, tanto del diámetro externo como interno, además de que es el mismo utilizado en el escáner 3D BQ Ciclop, descrito en el apartado 1.4, la superficie de la mesa donde se colocará la pieza a ser escaneada será una superficie antideslizante la cual estará pegada en una placa redonda de metacrilato que ira fijada mediante pernos al resto de componentes.

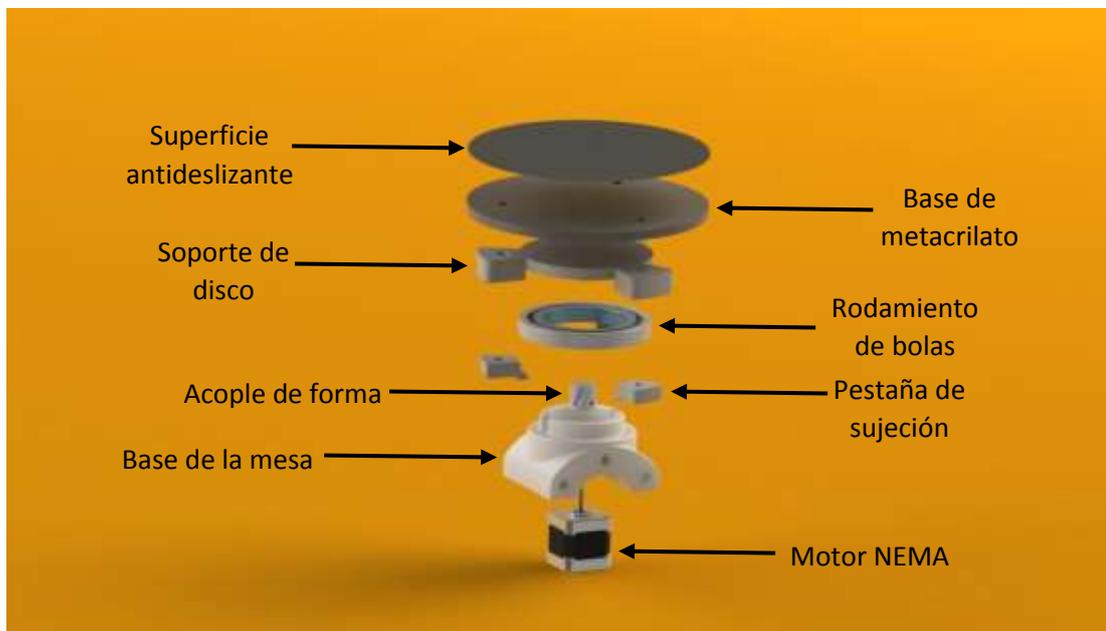


Figura 13: Despiece de la mesa giratoria

La estructura constará de varios elementos como se puede apreciar en la figura 14, se lo hace de esta manera para que el proyecto pueda ser desmontable y en el caso de que se requiera, sea más fácil de transportar,

además si algún elemento se rompe, sería fácilmente reemplazado sin comprometer la funcionalidad del resto de la estructura.

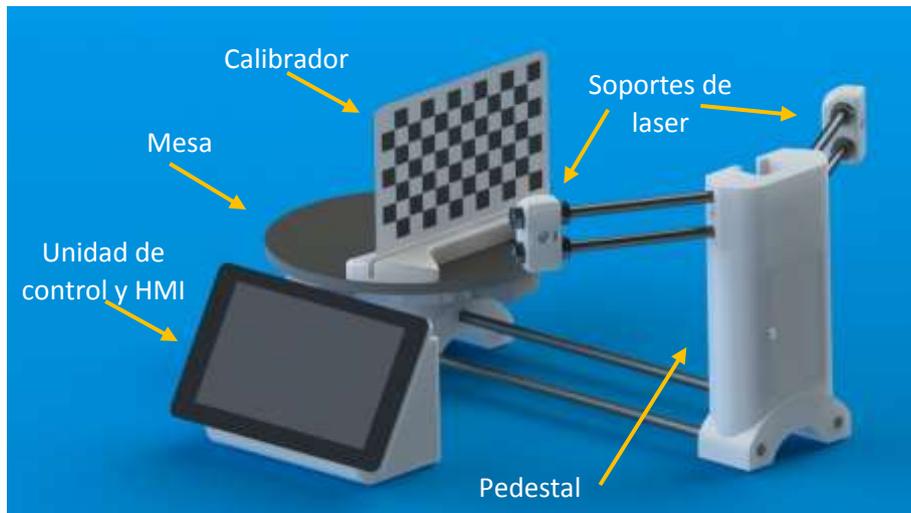


Figura 14: Ensamble de la maquina realizado en Solidworks 2014

2.4.2 Diseño electrónico

Se seleccionó el controlador electrónico, la Raspberry Pi en el apartado 2.3.2, y gracias a sus capacidades, se puede prescindir de un computador, haciendo que el escáner no requiera de equipo adicional para funcionar, adicionalmente se considera necesario utilizar una placa de control auxiliar para el control de los actuadores, siendo en este caso los laser y el motor a pasos, para lo cual se ha seleccionado una placa arduino por las razones expuestas en las alternativas de diseño, el controlador se muestra en la figura 15 y sus especificaciones técnicas en la tabla 10.



Figura 15: Raspberry Pi 2

Tabla 10:Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi (*Doutel, 2015*)

Ítem	Raspberry Pi Model B+	Raspberry Pi 2 Model B
SoC	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2836
CPU	ARM11 ARMv6 700 MHz	ARM11 ARMv7 ARM Cortex-A7 4 núcleos @ 900 MHz
Overclocking	Sí, hasta velocidad Turbo; 1000 MHz ARM, 500 MHz core, 600 MHz SDRAM, 6 overvolt. de forma segura	Sí, hasta arm_freq=1000 sdram_freq=500 core_freq=500 over_voltage=2 de forma segura
GPU	Broadcom VideoCore IV 250 MHz. OpenGL ES 2.0	Broadcom VideoCore IV 250 MHz. OpenGL ES 2.0
RAM	512 MB LPDDR SDRAM 400 MHz	1 GB LPDDR2 SDRAM 450 MHz
USB 2.0	4	4
Salidas de vídeo	HDMI 1.4 @ 1920x1200 píxeles	HDMI 1.4 @ 1920x1200 píxeles
Almacenamiento	microSD	microSD
Ethernet	Sí, 10/100 Mbps	Sí, 10/100 Mbps
Tamaño	85,60x56,5 mm	85,60x56,5 mm
Peso	45 g	45 g
Consumo	5v, 600mA	5v, 900mA, aunque depende de la carga de trabajo de los 4 cores
Precio	35 dólares	35 dólares

En la tabla 10, están presentes las características de la Raspberry Pi y su estructura se parece a un PC doméstico, el modelo que se utilizó será el de la Raspberry Pi 2 model B.

Ya que se ha seleccionado este equipo, se debe tener en cuenta la manera en cómo funciona, su base es un sistema operativo basado en debian, una de las distribuciones de Linux más populares, existe la posibilidad de utilizar otro sistema operativo, como por ejemplo Windows 10 IoT u otro sistema basado en diversas distribuciones de Linux como Ubuntu; para este caso en específico se ha decidido utilizar Raspbian.

Adicional a esto se requieren drivers tanto para el motor a pasos, y los laser, existe una solución que abarca ambos tipos de actuadores, se trata de la placa ZUM Scan del fabricante BQ, la cual soporta hasta dos motores a pasos y hasta cuatro dispositivos con las características de los laser, la tarjeta se muestra en la figura 16.

Las características de la placa y su diagrama correspondiente se adjuntaran en el anexo C.



Figura 16: Tarjeta ZUM SCAN

Esta placa es compatible con arduino, por lo que se necesitará una placa arduino la cual será un controlador secundario, que servirá para comandar todos los actuadores de esta máquina por medio de la placa ZUM Scan para control de potencia, la manera de interacción de los actuadores es la figura 17:



Figura 17: Jerarquía en la etapa de control

Como se muestra en la figura 17, el controlador principal, la Raspberry Pi 2 enviara información al controlador secundario, la placa Arduino, que

mediante la placa de control de potencia ZUM Scan controlará los actuadores, el motor a pasos y los laser.

Con respecto al motor a pasos, el motor NEMA 17 que se muestra en la figura 18, se ha seleccionado este motor por sus características, además que se puede encontrar en el mercado actual, sus dimensiones son ideales para nuestra aplicación y su potencia es suficiente para hacer girar la mesa de trabajo con una pieza que alcance el máximo peso especificado en características técnicas del apartado 2.2.3, las características de este motor se muestran a continuación.

Características:

- Tamaño: 42.3x48mm, sin incluir el eje (NEMA 17)
- Peso: 350 gramos (13 oz)
- Diámetro del eje: 5 mm "D"
- Longitud del eje: 25 mm
- Pasos por vuelta: 200 (1,8°/paso)
- Corriente: 1.2 Amperios por bobinado
- Tensión: 4 V
- Resistencia: 3.3 Ohm por bobina
- Torque: 3.2 kg/cm (44 oz-in)
- Inductancia: 2.8 mH por bobina



Figura 18: Motor NEMA 17

En cuanto a la selección de láser, según la clasificación descrita en el apartado 1.6.1; se ha decidido utilizar dispositivos de clase 1, debido a que son seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa, además, no son necesarias las características de clases superiores y sus requerimientos de potencia son bajos.

Una parte esencial del diseño es la cámara, y como se detalla en el inciso d, en el apartado 2.3.2, la mejor opción es la cámara Logitech C270 HD, esta estará montada en la parte superior del escáner y conectada por USB en el controlador.

Para el diseño, se ha decidido construir una máquina completamente autónoma en términos de funcionamiento, lo que quiere decir que no requerirá de ningún tipo de equipo adicional, como monitores o computadores para realizar el proceso de escaneado, se ha decidido incluir una pantalla táctil de 7 pulgadas la cual es un accesorio de la Raspberry Pi la cual es fabricada por la misma empresa, el diseño de la aplicación será en base a la resolución de la pantalla y se procurará hacer la interfaz de usuario lo más intuitiva y cómoda de usar para este tipo de pantalla, tomando en cuenta su resolución y tamaño, la pantalla se muestra en la figura 19.



Figura 19: Pantalla táctil de 7 pulgadas, Raspberry Org.

De una manera general, la conexión de los componentes electrónicos se muestra en la figura 20.

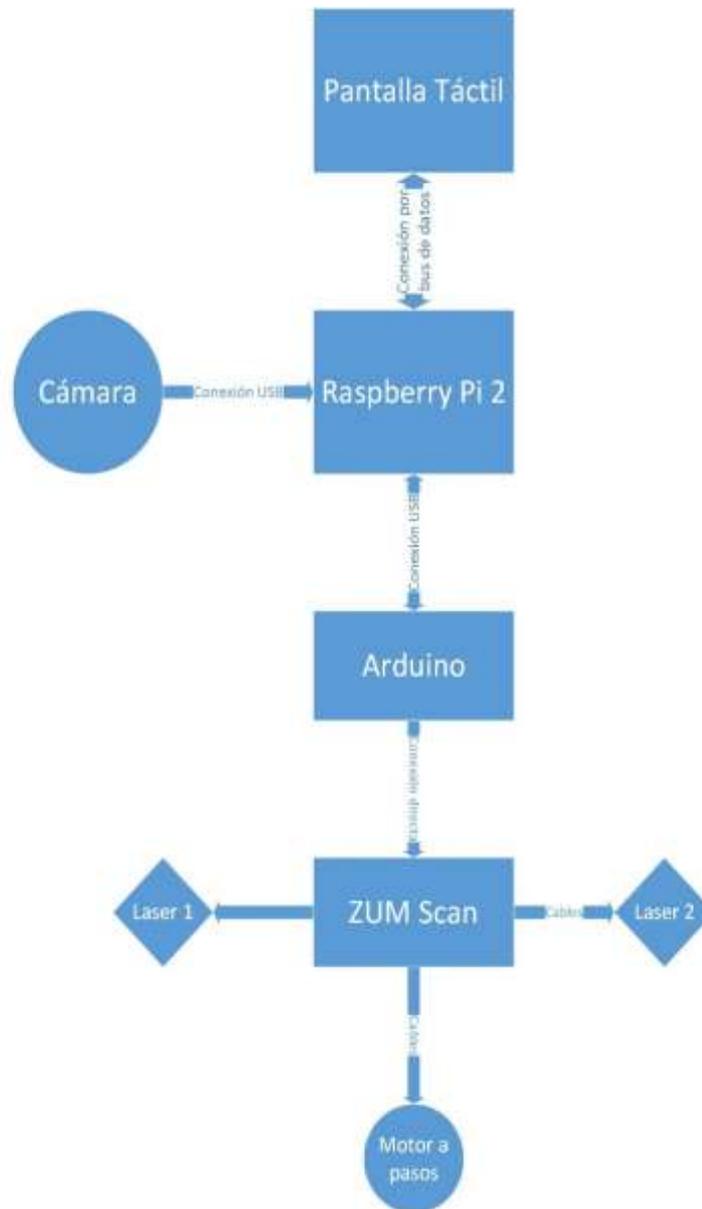


Figura 20 Conexión básica de la electrónica

Como se puede ver en la figura 20, que corresponde al diagrama básico de conexión de los elementos electrónicos, a la Raspberry Pi 2 se conectan la cámara, un teclado y la placa arduino mediante conexión USB, mientras que la pantalla táctil se conecta por bus de datos y es esta la que servirá como HMI; la placa ZUM Scan se conectara de manera directa a la placa arduino, esto significa que ira montada sobre este controlador secundario, utilizando una conexión directa entre los pines de cada placa; La placa Zum Scan es la

encargada de comandar el motor a pasos y los laser de nuestro equipo, estos se conectaran directamente a la placa, los pines en donde se colocará cada elemento están escritos y separados en la placa Zum Scan, esto es de gran ayuda en el caso de que se requiera conectar los elementos sin tener a la mano la documentación necesaria, el motor será conectado en los pines de Motor 1, los laser en los pines de Laser 1 y Laser 2, los pines restantes de la placa Zum no llevan ninguna conexión.

Otra parte importante del diseño electrónico, es la selección de la fuente de poder del escáner, que para el caso serán 2, una para la división de potencia y otra para la división de control.

Tal como se muestra en la tabla 10, que corresponde a las especificaciones técnicas de la Raspberry Pi, se requiere una fuente de 5V y 900mAh, pero no hay que olvidar que a este dispositivo se conectara la cámara y la pantalla táctil, con respecto a la pantalla táctil, al usarse una fuente independiente se sugiere una salida de 5V y 500mA como mínimo, tomando en cuenta estas consideraciones se ha utilizará una fuente de alimentación de 5V y 1000mA, ya que los 900mA de corriente que requiere la Raspberry Pi, son tomando en cuenta el uso de sus conectores USB, por lo tanto se asume que con 1000mA no existirá ninguna complicación, gracias a que la entrada de alimentación de la Raspberry Pi es una conexión micro USB, presente en los Smartphones actuales (Exceptuando dispositivos de la compañía apple), se utilizó un cubo de carga de la marca Samsung con las especificaciones nombradas y un cable de datos convencional de USB a micro USB (RaspberryPi.org, 2015).

Para la división de potencia, ya que los actuadores serán administrados por la placa ZUM Scan, se analiza la recomendación del fabricante de usar una fuente de 12V a 1500mA (Arroyo, bq.com, 2015).

2.4.3 Diseño de la aplicación

En el apartado 2.3.3, se realizó un análisis de las herramientas de software, dos lenguajes de programación serían las opciones principales para arrancar con el diseño, pero gracias a que el controlador principal será una

Raspberry Pi, se estableció que la mejor opción es utilizar Python, simplemente porque es un lenguaje que viene de forma nativa dentro del sistema operativo de dicho controlador, además de ser compatible con el terminal de ejecución de comandos de sistema (el cual está presente en todos los sistemas operativos basados en Linux).

El programa que se desarrollará está en base al algoritmo que se adjuntara en el anexo D.

Básicamente la aplicación constará de tres partes como se muestra en la figura 21:



Figura 21: Partes básicas del programa

La primera parte se encargará de la comunicación, aquí se conectarán todos los dispositivos y se realizará una prueba de comunicación, en caso de existir algún problema de comunicación, se le permitirá al usuario cambiar manualmente los parámetros tales como puerto com de la placa controladora, velocidad de comunicación por el puerto serial, el tipo de placa controladora, ID de la cámara que será utilizada por el escáner la cual solo se mostrará en el caso de que exista una o varias cámaras conectadas y una opción para cargar el programa en la placa Arduino para el manejo de los actuadores. Esta parte también se encargará de manejar los movimientos del motor y de encender o

apagar los laser por medio de la placa controladora obviamente, también se encargará de capturar, almacenar y administrar las imágenes de la cámara.

La segunda parte se encargará de la calibración, idealmente debería ejecutarse antes de usar el escáner, pero su utilización será opcional ya que el usuario podrá escoger si calibra o no el escáner antes de usarlo ya que guardará todos los parámetros de calibración en un archivo y en caso de no ejecutarse la calibración, los últimos valores serán cargados automáticamente, en el caso de no existir parámetros anteriores, el escáner pedirá calibración de manera obligatoria, con esto se garantizará que se calibre al menos una vez durante su vida útil, esta parte es importante, ya que se encargará de determinar valores constantes esenciales para la operación de escaneo como por ejemplo sentido correcto del motor, equivalencia de distancia con respecto a un conjunto de pixeles tomados de una imagen, área de trabajo del escáner, etc.

Por último, la tercera parte se encargará de escanear los sólidos y generar el archivo de nube de puntos, aquí se realizarán las operaciones con imágenes y los cálculos necesarios para acomodar cada pixel de interés en nuestro archivo final de la nube de puntos.

Estas tres partes no son fases secuenciales, durante su ejecución interactuarán entre sí para realizar el proceso de escaneo, la única razón para separarlas es para entender mejor el funcionamiento del programa final y para ordenar de una manera ideal las operaciones.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

3.1 MANUFACTURA DE LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DEL ESCÁNER 3D

Una vez determinada la máquina a ser utilizada y el material en el apartado 2.3.1, se procede con la fabricación de los elementos del escáner.

Los elementos a ser impresos se listan en la tabla 11 y se muestran en la figura 22:

Tabla 11:

Listado de piezas a ser impresas en 3D

Nombre	Cantidad	Descripción
Pedestal	1	Pieza sobre la cual se ensamblara los soportes de los laser junto con la cámara y a su vez alojara las placas de electrónica correspondientes al manejo de actuadores y al controlador secundario.
Soporte de pantalla	1	Pieza en la cual se ensamblara la pantalla junto con el controlador principal
Soporte de laser	2	En esta pieza se colocaran los laser
Tapa del pedestal	1	Corresponde a la tapa trasera del pedestal
Tapa de soporte de pantalla	1	Corresponde a la tapa trasera del soporte de la pantalla
Acople de forma	1	Pieza que se colocara en el eje del motor a pasos, su función es hacer que dicho eje se acople con la forma del soporte de disco para transmitir el movimiento circular a la mesa giratoria.
Pestaña de sujeción	3	Estas piezas son las encargadas de sujetar el soporte de disco con el rodamiento de numeración 16014 para posteriormente colocarse en la base de la mesa giratoria.
Base de la mesa	1	Pieza sobre la cual se ensamblara la

giratoria		mesa giratoria.
Soporte de disco	1	Pieza sobre la cual se colocara el disco de metacrilato de la mesa giratoria, también es la que se acopla con el motor a pasos para la transmisión del movimiento circular.
Base de calibrador	1	Pieza que no se utiliza en el ensamble principal, su función es sportar la placa que contiene el patrón cuadrículado para la calibración de la cámara.
Cubre cables del motor	1	Pieza destinada a cubrir y sujetar los cables del motor a pasos
Cubre cables del laser	2	Pieza destinada a cubrir y sujetar los cables del laser



Figura 22: Piezas a ser impresas en 3D

Todas las piezas con sus respectivas medidas serán adjuntadas en el anexo G.

3.2 MONTAJE DEL ESCÁNER 3D

Una vez impresas las piezas necesarias para la construcción del escáner, se procede con el montaje, tanto de la estructura como de la electrónica, como se menciona en el apartado 2.4.1, se han utilizado elementos

secundarios que se pueden adquirir en el mercado local y se listan en la tabla 12:

Tabla 12:

Lista de elementos secundarios

Nombre	Número de piezas
Rodamiento de bolas axial 16014	1
Disco metacrilato negro Ø200 x 8 mm	1
Superficie antideslizante Ø200 mm	1
Varilla roscada negra M8 x 400 mm	2
Varilla roscada negra M8 x 292 mm	1
Varilla roscada negra M8 x 170 mm	4
Tornillo M3 x 10 mm - DIN-912 clase 8.8 negro	7
Tornillo M8 x 30 mm - DIN 931 clase 8 negro	3
Tuerca M3 - DIN 934 clase 8 negra	3
Tuerca M8 - DIN 934 clase 8 negra	28
Arandela M8 - DIN-125 clase 6 negra	18

Después de haber especificado los elementos secundarios para el ensamble del escáner, se procede con el montaje:

El montaje es relativamente simple, a continuación se muestra el disco de metacrilato ensamblado con el rodamiento de bolas 16014 y la base de disco (pieza impresa en color blanco) mediante las pestañas de sujeción impresas (piezas impresas de color rojo) y los tornillos M8, en la figura 23.



Figura 23: Ensamble del disco de metacrilato con la base de disco

Sobre el disco de metacrilato se ha colocado una superficie antideslizante la cual se muestra en la figura 24, la cual nos ayudara a evitar que la pieza se mueva de su posición durante el proceso debido a que mientras se ejecute el escaneo la mesa se moverá constantemente.



Figura 24: Superficie antideslizante

En la base de la mesa giratoria se coloca el motor a pasos por la parte inferior, luego de que esté asegurado con los tornillos M3, se coloca el acople de forma en el eje del motor y de igual manera se asegura con un tornillo M3 tal cual se muestra en la figura 25, posteriormente se coloca el ensamble de la mesa de metacrilato y el soporte de disco sobre la base de la mesa giratoria, procurando que el acople de forma encaje en el soporte de disco.



Figura 25: Base de la mesa giratoria con el motor a pasos y el acople de forma

El pedestal, pieza impresa en 3D, será la que soporte el controlador secundario y los drivers de los actuadores, la cámara y las barras roscadas en las que se asegurarán los soportes de los laser, en la figura 26 se muestra la manera en que se debe colocar la cámara y en la figura 27 se observa la forma en que la electrónica es alojada dentro del pedestal, el diagrama de conexión de la electrónica se encuentra detallada en el anexo E.



Figura 26: Ubicación de la cámara en el pedestal



Figura 27: Ubicación de la electrónica dentro del pedestal

Los laser están ubicados en los soportes de láser, y estos se ensamblan con el pedestal mediante varillas roscadas, tal como se muestra en la figura 28.



Figura 28: Soporte de laser ensamblado en el pedestal

Como en un principio, se desconoce si los laser están alineados correctamente sin encender los laser, es posible girar este dispositivo hasta alcanzar la posición deseada, y una vez llegado a ese punto, se fijara el láser utilizando un perno M3 como se muestra en la figura 29, de esta manera, si en un futuro existe una descalibración de posición del láser, se podrá fácilmente solucionar, es necesario colocar los laser de tal manera que la línea sea lo más

vertical posible, es improbable que se coloque perfectamente vertical, este problema será solucionado con la calibración de los láser.



Figura 29: Perno M3 para ajuste del laser

En cuanto al pedestal y la mesa giratoria, serán unidos mediante barras roscadas tal y como se muestra en la figura 30, cabe recalcar que las piezas impresas no tienen rosca, fueron diseñadas con cavidades para insertar tuercas, tanto M3 como M8; en cuanto a los cables, gracias a que su longitud es mayor al de las barras roscadas y quedan sueltos, se han impreso elementos para sujetar y cubrir los mismos.



Figura 30: Varillas roscadas para unión del pedestal con la mesa giratoria

El controlador principal irá ensamblado junto a la pantalla táctil del escáner, estos dos elementos estarán dentro del soporte de pantalla e irán fijados con tornillos M3, aquí también se juntarán todas las conexiones del dispositivo.

Uno de los elementos que de alguna manera se lo puede considerar como complemento, es el patrón de calibración de la cámara, este es un ensamblaje que no tiene nada que ver con el principal, consiste básicamente de dos piezas, la base del patrón y una placa de acrílico en la cual lleva una calcomanía del patrón necesario para la calibración, su montaje final se muestra en la figura 31.



Figura 31: Calibrador de la cámara

3.3 CONEXIONES DE LOS ELEMENTOS ELECTRÓNICOS Y LAS PLACAS DE CONTROL

En primer lugar, el controlador principal irá conectado con la pantalla táctil mediante bus de datos tal como se muestra en la figura 32, la cámara y el controlador secundario se conectan mediante USB.



Figura 32: Conexión de la Raspberry Pi con la pantalla táctil

La cámara, el controlador secundario y el teclado, se conectan mediante USB al controlador principal, tal y como se muestra en la figura 32, en cuanto a la alimentación, el controlador principal junto a la pantalla es independiente del controlador secundario y la placa de control de los actuadores, al estar la cámara conectada al controlador principal recibe energía de este dispositivo, en la figura 33 se muestran las conexiones del controlador principal.

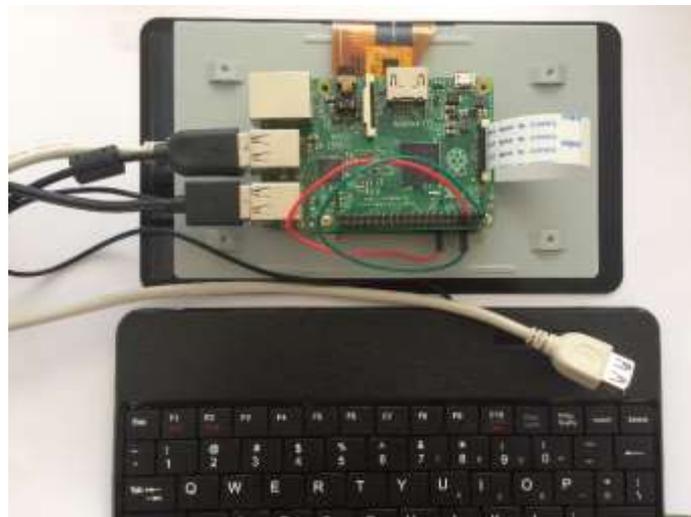


Figura 33: Conexiones del controlador principal

El cable de color blanco de la figura 33 es una extensión USB la cual servirá para conectar los dispositivos de almacenamiento en los que se almacenará las nubes de puntos generadas por el escáner, si bien el escáner cuenta con almacenamiento propio, es necesario sacar los archivos de la máquina para un postprocesamiento de los modelos en un software CAD.

El controlador principal cuenta con una ranura micro SD en la cual se cargara el sistema operativo y a su vez servirá para almacenar todos nuestros archivos y aplicaciones, para el caso en específico del escáner, se necesita al menos una memoria de 8Gb, porque el sistema operativo ocupa un espacio de 4Gb. El programa, las librerías y aplicaciones necesarias para que se pueda ejecutar ocupan 1.5 Gb, lo que suman 6.5Gb; debido a los test realizados, se demostró que cuando existe poco espacio disponible en la tarjeta de memoria, el sistema se hace poco a poco más lento, por esta razón y considerando que con el tiempo se generaran archivos de nubes de puntos que tal vez el usuario del equipo quiera dejarlos almacenados en el escáner, se optó por utilizar una memoria de 16Gb.

La memoria micro SD que utiliza el escáner es fácil de conseguir y es la estándar que utilizan los equipos electrónicos convencionales como cámaras, teléfonos celulares, reproductores de mp3, etc; se recomienda una tarjeta de memoria de al menos clase 4 para que el escáner funcione de una manera fluida, puede reconocer la clase de la tarjeta observando el número que se indica en la figura 34.



Figura 34: Tarjeta microSD clase

En cuanto al procedimiento de cargar el sistema operativo en la tarjeta micro SD, es sencillo, se necesita la “Imagen del sistema operativo”, la Raspberry Pi es un pequeño ordenador, que requiere un sistema operativo para arrancar todos los procesos necesarios para que todas las capacidades de hardware y de computación estén disponibles para las aplicaciones que se quieran ejecutar. Pues bien, una *Imagen* es un conjunto de sistema operativo y aplicaciones que ha preparado alguien. Esa persona se ha preocupado de que

simplemente con grabar o flashear un único archivo en la tarjeta SD, se consiga recuperar toda la información necesaria para que la Raspberry Pi arranque cuando sea encendida y cargue los programas necesarios (Doutel, 2015). Lo único que se necesita es un pequeño programa que se debe instalar en un computador con ranura micro SD o en la que se pueda conectar de alguna manera mediante adaptadores, está disponible en Windows, Linux o OS X. Para el presente proyecto se ha creado una “Imagen de disco” en la que se encuentra instalado el programa del escáner, ya que el proceso de cargar las librerías y las aplicaciones necesarias para que esta aplicación funcione partiendo de un sistema operativo limpio es complicado y requiere mucho tiempo, la imagen de disco generada está basada en un sistema operativo Raspbian Jessie, que es la versión más actual del sistema operativo al momento del desarrollo de este proyecto.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA

3.4.1 Interfaz de usuario.

Para empezar con el desarrollo del software hemos optado por utilizar una interfaz de usuario para una mejor comunicación con el equipo que en este caso es la Raspberry Pi 3 y los diferentes dispositivos complementarios del escáner que son la cámara, placas de control, teclado y accesorios. Además de esto, podemos hacer uso de las herramientas para desarrollo de aplicaciones, es así que esta aplicación será desarrollado sobre el sistema operativo Raspbian, cuyo logotipo se muestra en la figura 35.

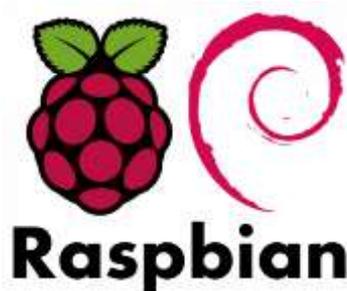


Figura 35: Logotipo del sistema operativo Raspbian

Este sistema será grabado como una Imagen en una microSD que se colocará en la Raspberry PI, se pueden encontrar tutoriales de como instalar Raspbian en su página oficial “Raspbian.org”

3.4.2 Horus.

Existen aplicaciones de escaneo 3D tanto software propietario como software libre, por lo tanto no es necesario partir desde cero, uno de ellos es Horus.

Horus es una aplicación multiplataforma orientada al control de escáneres 3D libres. Proporciona una interfaz gráfica para gestionar las comunicaciones, la captura y sincronización de datos, el procesamiento de imagen, los procesos de calibración y la generación y visualización de nubes de puntos.

Ha sido desarrollado y optimizado para GNU/Linux Ubuntu. Sin embargo también se ha probado en sistemas Windows y estará soportado para Mac. El software está programado en Python. Utiliza los módulos wxPython, NumPy, SciPy, Matplotlib, OpenGL y una versión optimizada para Linux de OpenCV.

Horus es software libre. Su código está publicado en GitHub, liberado bajo la licencia GPL v2. Esta licencia garantiza que se cumplen las libertades fundamentales en el uso del software libre. Todo código liberado bajo la licencia GPL pertenece automáticamente al Patrimonio Tecnológico de la Humanidad. (Arroyo, bq.com, 2015)

Horus es la aplicación en la que se basara nuestro trabajo, por las características que este posee, se puede modificar a conveniencia.

3.4.3 Desarrollo de la aplicación.

Horus puede ser instalado en Windows, Mac, Ubuntu y otras distribuciones de Linux, pero carece de soporte para Raspbian, el desarrollo consiste en partir de esta aplicación y crear una que funcione en esta distribución de Linux; la razón por la que carece de soporte aun siendo una distribución basada en debían, es por su arquitectura, la Raspberry Pi funciona con un procesador de arquitectura ARM, la cual es diferente a la de los computadores domésticas, que cuentan con arquitectura de 32 o 64 bits, por este motivo son necesarios cambios en la aplicación para que se puedan ejecutar en la Raspberry Pi.

a. Proceso de escaneo.

En el apartado 2.4.3 se mencionó tres partes básicas del programa, comunicación, calibración y escaneo, que funcionan simultáneamente, a continuación se detalla el procedimiento que debe realizar cada una de ellas, sus herramientas y ecuaciones.

Para exponer las tres partes mencionados, primero se va a desarrollar los algoritmos que se utilizaran para cada proceso.

1. Datos de calibración.

En este punto se obtienen los parámetros fundamentales de la cámara y los laser, tales como:

Valores Intrínsecos: calibración del sensor de la cámara y la lente.

Triangulación Láser: calibración entre la cámara y los módulos láser.

Parámetros Extrínsecos: calibración entre la cámara y la plataforma giratoria.

Mediante el cálculo de estos parámetros con ayuda de las herramientas de OpenCv y el módulo md5, se obtiene la resolución, el plano de distorsión y los planos de los láseres

2. Capturar imagen.

Se define los siguientes parámetros de la cámara:

Brillo: luminosidad de la imagen

Contraste: diferencia relativa de intensidad

Saturación: intensidad del color de la imagen

Exposición: tiempo de apertura del objetivo en milisegundos.

Una vez definidos e inicializados, se otorgan valores por default o desde la interfaz gráfica de la aplicación.

Dicho anteriormente, todos los procedimientos son simultáneos, así es como cada vez que un láser se encienda, la cámara capturará imágenes y las guardará en matrices, a estas imágenes se aplica la herramienta `cv2.subtract` para remover el fondo, es decir, solo se guardarán en una matriz los puntos iluminados por el láser, esto se realiza restando la imagen del objeto iluminado por el láser en una posición definida de una imagen del objeto sin iluminar en la misma posición.

3. Detectar imagen.

Primero se calcula y forma las matrices de puntos del patrón de la figura 39, mediante los módulos `cv2` (OpenCV) para aplicaciones de visión artificial y `np` (Numpy) que son herramientas para manejo de vectores y matrices, usado para cálculos matemáticos complejos.

Toman el número de filas y el número de columnas del patrón, determinan el tamaño del cuadrado y calculan la distancia de las esquinas hasta el origen.

Estos valores son guardados en arrays, para luego ser comparados con los valores obtenidos de la captura del objeto iluminado con el láser.

También se obtiene el color de los puntos usando `cv2.cvtColor`, y utilizando `cv2.solvePnP` como herramienta principal se empieza a comparar los bordes con el patrón, así se determina las distancias, para luego ser compensadas con los valores del vector de distorsión y la matriz de parámetros intrínsecos.

4. Segmentación del láser.

En este punto realiza el filtrado de las imágenes, con la herramienta `cv2.getStructuringElement`, `cv2.MORPH_RECT` y `cv2.morphologyEx` se obtiene una imagen sin ruido, esta operación se realiza después de la remoción del fondo, los resultados de filtrado se aprecia en la figura 36.



Figura 36: Filtrado con operación morfológica

Con esto garantizamos una mejor calidad de los píxeles que reflejan la forma del objeto.

Después de eliminar el ruido se aplica un umbral de nivel bajo, de esta manera solo se obtendrá una imagen binaria, mejorando así la calidad de los datos, la figura 37 muestra un umbral.

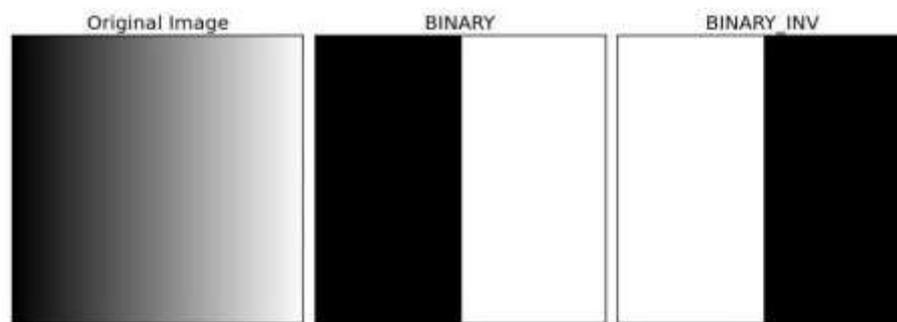


Figura 37: Bancarización de una imagen (opencv.org, 2016)

Tomando los datos únicamente de interés se aplica un nuevo filtro `cv2.blur`, este elimina contenido de alta frecuencia (por ejemplo: ruido, bordes) de la imagen. Así bordes se desdibujan un poco en esta operación, tal como se muestra en la figura 38.

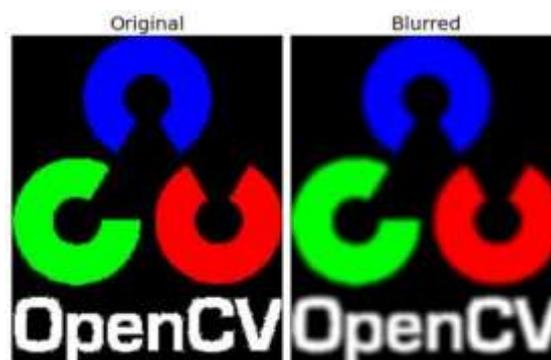


Figura 38: Filtro Blur (opencv.org, 2016)

Continuando con `cv2.bitwise_and`, se realiza la extracción del área de interés y se guarda en un vector, el área de interés son los píxeles que representen el canal rojo del láser.

5. Generación de la matriz de la cámara

En este punto se determina los valores de la matriz de la cámara, las matrices de rotación y traslación, con la función `np.concatenate` se enlazan en una matriz que podrá ser utilizada para el cálculo de la proyección de la nube de puntos

6. Nube de puntos de la ROI

Como primer punto cabe destacar que en python no se necesita declarar el tipo de variable, un dato puede tomar un valor entero, flotante, complejo, booleano, cadena de caracteres, etc., con tan solo ser declarado, así mismo, no es necesario especificar el valor máximo de datos que guardaran los array, gracias a esto, los valores de la nube de puntos pueden variar dependiendo de incontables condiciones, la más importante, la definición de la ROI, esta limita el diámetro y la altura del espacio donde se tomaran los datos que formaran parte de la nube.

Se calcula únicamente la proyección de aquellos puntos que se encuentren en el rango especificado por la ROI, para el cálculo de triangulación se utilizan las matrices de posición de los píxeles (u,v) y la matriz de la cámara, y para generar el punto en el plano 3D se utiliza las matrices de rotación y traslación, la desviación de los planos de los laser y la matriz de transformación homogénea del disco rotativo .

Matemáticamente esta operación es mucho más compleja, el tratamiento de matrices es extenso. Por lo cual se recomienda leer el trabajo de Javier Sánchez Pérez titulado “Visión Tridimensional”, en caso de interés por las fórmulas matemáticas del proceso. También se puede investigar a fondo sobre la calibración de cámaras web usando OpenCV.

b. Comunicación.

Se realiza la comprobación de todos los dispositivos necesarios del escáner, estos son: cámara USB, placa ZUM BT 328, láseres.

1. Cámara.

El acceso a la cámara se la realiza utilizando las librerías glob y cv2 de python.

Cuando se conecta un dispositivo USB se genera un archivo en el sistema, el módulo glob provee una función para hacer listas de archivos a partir de búsquedas con comodines en directorios, lo que hace posible la localización del archivo generado para verificar la conexión de la cámara USB y mediante las herramientas de cv2 se realiza la lectura continua de imágenes con cv2.VideoCapture(i), i representa el ID del dispositivo, por default la cámara tomara el nombre de ID=0. En el caso que no se encuentre el archivo generado ya sea por un defecto en la conexión o no estuviera conectado el USB, el código generara un archivo de error, solicitando que se conecte el dispositivo o verifique su conexión.

2. Placa controladora, láseres y motor.

Del mismo modo, al conectar la placa controladora se genera un archivo que utilizando el módulo "blog" se verifica su conexión y con la librería pyserial o serial se abre el puerto serie reconocido, ajustando la velocidad de transmisión.

En esta placa controladora se encuentran preconectados los laser y el motor, con su respectivo driver, por lo tanto no hace falta más herramientas para la comunicación de estos elementos.

Para los láseres y el motor se ha optado por usar códigos específicos, como:

G1 Fnnn: feed rate

G1 Xnn : move motor

M70 T: switch off laser n

M71 Tn: switch on laser n

M50 Tn: read ldr sensor

Estos códigos facilitan el manejo de los componentes desde la aplicación, como apagar y prender los láseres, cambiar la velocidad del motor, etc. Los códigos son enviados desde la aplicación hasta la placa controladora.

En caso de no estar conectada la placa o exista un defecto en la conexión, se genera un error, el cual solicitará al usuario que conecte o verifique la conexión de la placa.

La aplicación está diseñada para reconocer cualquier placa compatible con arduino, por tanto solo es necesario cargar el programa para el control de los actuadores.

c. Calibración.

Hay que tener en cuenta que, al ser un producto construido a mano, las distancias y posiciones pueden no ser exactas. Realizando los procesos de calibración se determinan los datos de calibración para que el resultado no varíe en caso de movimiento involuntario de cualquier componente.

1. Calibración de la cámara

El método de calibración utilizado es el método de Zhang (Aracena Pizarro, Campos, & Tozzi, 2005).

Dos de los parámetros más importantes es encontrar los vectores de distorsión radial y tangencial, también se debe obtener los valores de la longitud focal (f_x, f_y) que son el ancho y altura del píxel, se puede decir que son los milímetros equivale un píxel en la imagen; y los centros ópticos (c_x, c_y) que es exactamente el centro de la imagen, estos conforman la matriz de la cámara

Ecuación.3: Matriz de la cámara

$$\text{matriz de la camara} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

No se necesita conocer a fondo el modelo matemático para calibrar con OpenCV.

Para corregir estas distorsiones se debe proporcionar algunas imágenes de muestra de un patrón bien definido como el tablero de ajedrez, en este caso se utilizó un tablero de 6 filas y 11 columnas, con el tamaño de 13mm por lado de cada cuadrado, con una distancia de la base hasta el patrón de 38.9mm. Es importante destacar que el patrón debe ser asimétrico, es decir el número de filas y el número de columnas no deben ser iguales. El patrón se muestra en la figura 39.

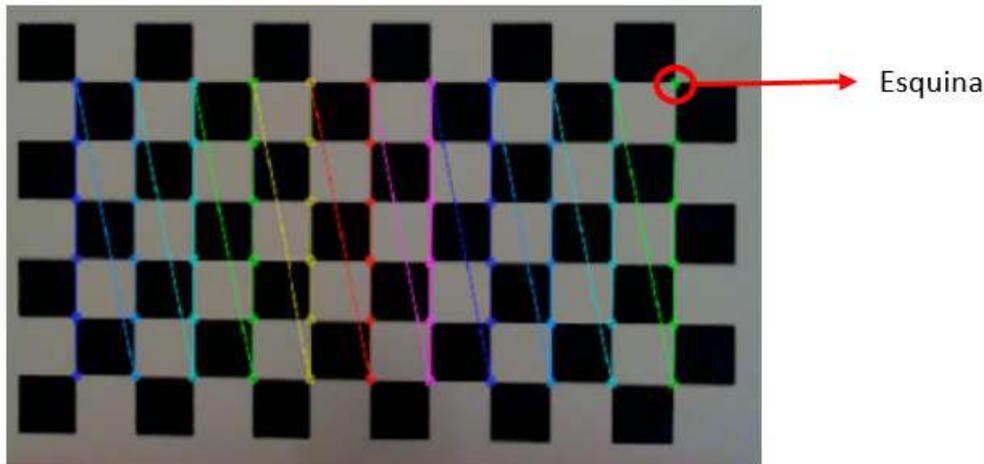


Figura 39: Patrón de calibración del escáner

A simple vista se puede contar 12 cuadrados horizontales y 7 verticales, pero el número de filas y columnas corresponde al número de vértices o esquinas que forman los cuadrados interiores, como se aprecia en la figura 39, existen 11 vértices horizontales y 6 verticales.

Se necesitan tomar mínimo ocho imágenes para que la calibración sea óptima, estas deben ser colocadas en diferentes posiciones.

Se declara un string donde se guardan las imágenes temporalmente, estas imágenes serán capturadas cada que se presione un enter, posteriormente en el anexo H se encuentra en manual de usuario y se encuentra detallado el procedimiento para calibración.

Con las herramientas de OpenCV, se determina y guarda la matriz de la cámara, coeficientes de distorsión, vectores de rotación y traslación, este proceso se realiza en el algoritmo Generación de la matriz de la cámara.

Esta aplicación posee dos tipos de calibración, una simple y una avanzada, la calibración avanzada se la realiza manualmente y esta detallada en el manual.

En ambos casos, el procedimiento de calibración es el mismo, con la diferencia que en el simple, se realiza automáticamente.

En esta, las imágenes son capturadas en diferentes ángulos gracias al movimiento de 30 pasos del motor.

En la web se pueden encontrar tutoriales de como calibrar una webcam con el método de Zhang.

2. Calibración de los laser.

En el apartado 3.4.2 se ha expuesto que la aplicación de este proyecto, será basada en Horus, por lo tanto muchos de los procedimientos son propios de la aplicación Horus.

En (bq, 2016). Informa que este procedimiento se lo realiza para ajustar la verticalidad de los láseres utilizando el patrón. No es imprescindible que los láseres estén totalmente verticales con respecto a la cámara, puesto que la inclinación se corrige con la calibración, pero es recomendable que estén lo más perpendiculares posible.

En este proceso de calibración se determina la inclinación y distancia de la intersección entre los láseres y el plano central de la cámara. Para esto, se utilizan los algoritmos: Capturar imagen, Detectar imagen, Segmentación del láser; con esta información se compara que tan alejado se encuentra el plano de los vértices de los cuadrados, y con Generación de la nube de puntos se determina los planos de los laser.

El resultado consiste en una matriz que define la inclinación de los láseres en píxeles y la profundidad del patrón. También muestra gráficamente la inclinación de los láseres respecto a la cámara. En la figura 40 se muestra los parámetros de los planos del láser izquierdo y derecho.

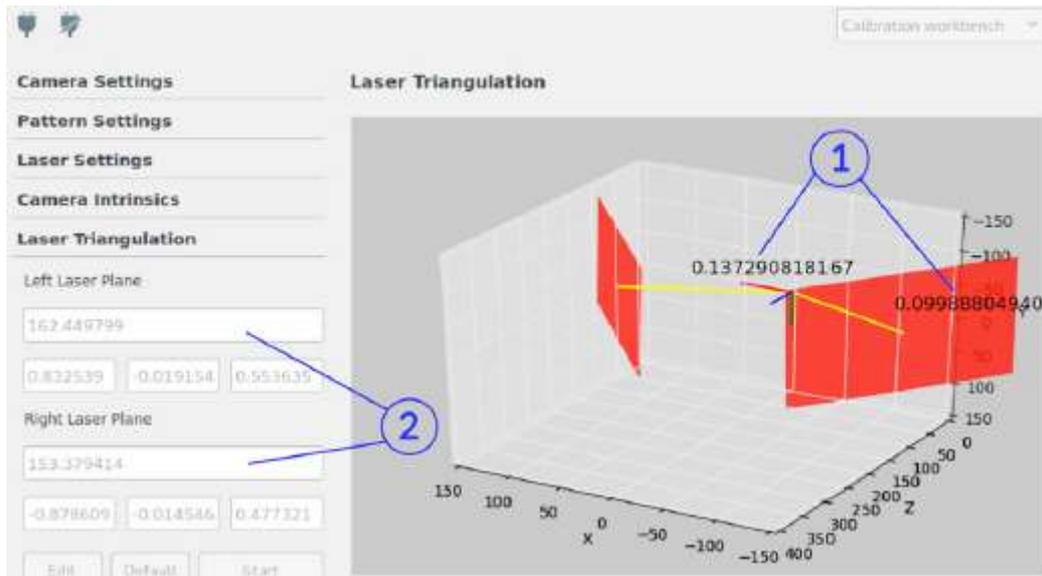


Figura 40: Triangulación laser

- Dispersión de los puntos del plano en milímetros: es la dispersión de la distancia al plano de los puntos que se obtienen para calcular el plano. Si es 0 significa que todos los puntos pertenecen al plano. Los valores en torno a 0.1 son adecuados.
- Mínima distancia del plano al origen medido en milímetros según el sistema de coordenadas de la cámara: la diferencia entre estos valores no debe ser mayor de 30 unidades.

3. Calibración del disco rotatorio

En este procedimiento se obtiene la matriz de transformación homogénea del disco rotatorio respecto a la cámara, es decir, la posición y rotación del disco.

Esta es muy útil en el caso que el disco no se encuentre equilibrado correctamente, para compensar esta desviación se obtiene la matriz de transformación homogénea, se observa en la figura 41.

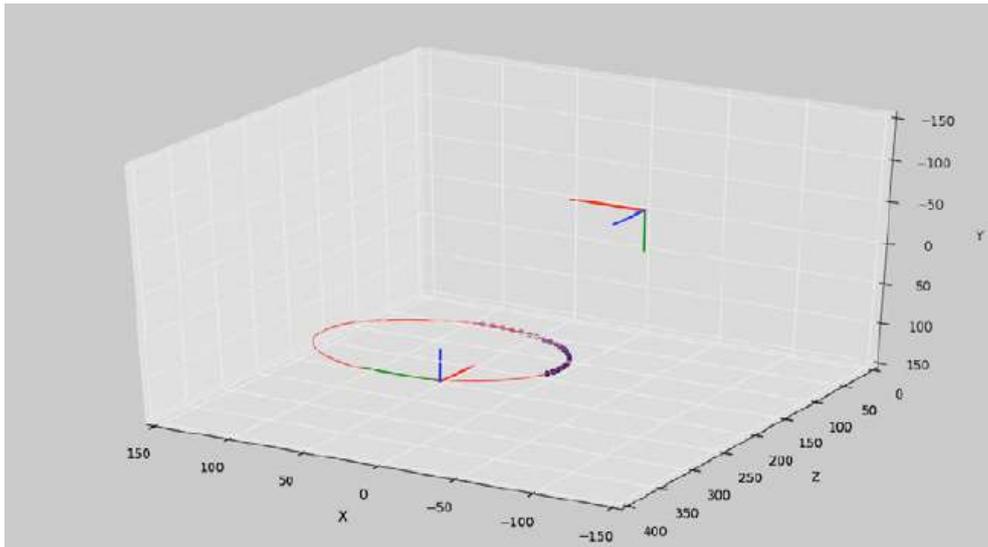


Figura 41: Calibración del disco

d. Escaneo.

Este proceso solo es la recopilación en forma ordenada de los algoritmos expuestos, como son: Capturar imagen, Detectar imagen, Segmentación del láser, generación de la nube de puntos

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL ESCÁNER

4.1.1 Pruebas de funcionamiento general.

Una vez construido el escáner, se da inicio a las pruebas de funcionamiento, en primer lugar se realizaron ensayos de funcionamiento general, para comprobar la correcta interacción del sistema.

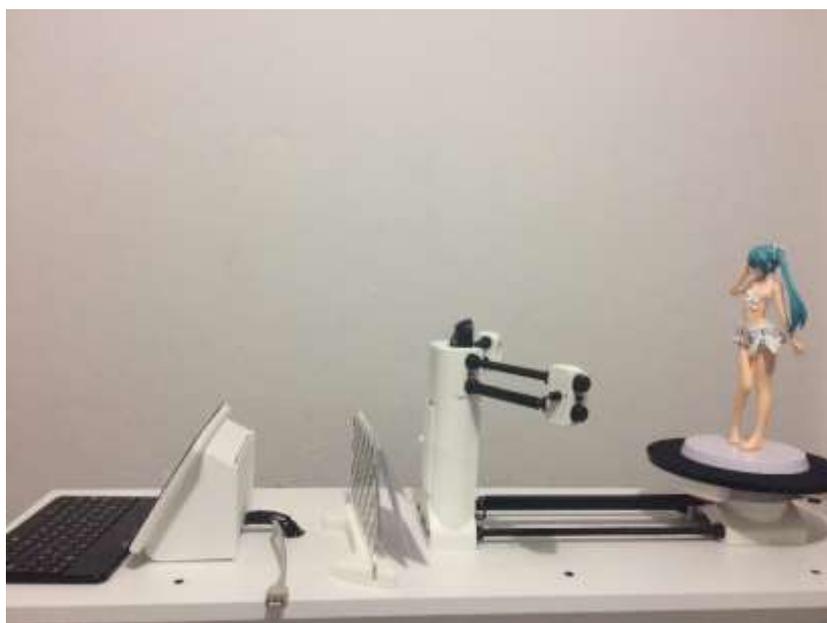


Figura 42: Montaje final del escáner

Como se muestra en la figura 42, el montaje final del escáner, se ha generado una estructura robusta la cual soporta las dimensiones de piezas y el peso propuesto en las especificaciones técnicas en el diseño, como ensayos iniciales se han realizado los descritos en la siguiente tabla 13:

Tabla 13:

Ensayos de funcionamiento general

Ensayo	Descripción	Procedimiento	Conclusión
Peso soportado por la mesa	Se colocan cargas de diferentes pesos en la mesa giratoria para comprobar si esta	Se colocaron elementos diferentes partiendo desde los	de pesos, Prueba

giratoria	resiste la especificación máxima descrita en las especificaciones de la máquina.	1000gr hasta los 5000gr; demostrando que supera las especificaciones técnicas con respecto al peso	superada
Movimiento de la mesa giratoria	Se envían comandos de movimiento desde el controlador principal hacia el controlador secundario, para comprobar la movilidad de la mesa giratoria.	Mediante una terminal de comunicación serial, se han enviado diversos comandos para el movimiento de la mesa giratoria y se comprobó su movilidad, tanto en sentido horario como antihorario, utilizando los micropasos se ha controlado con precisión la posición y se demostró la respuesta del controlador secundario frente a los comandos enviados por la Raspberry Pi	Prueba superada
Funcionamiento de los laser	Se envían comandos desde el controlador principal hacia el secundario para comprobar el funcionamiento de los laser.	Se enviaron mediante terminal serial los comandos correspondientes al encendido y apagado de los laser y se comprobó su funcionamiento.	Prueba superada
Funcionamiento de la cámara	Se comprueba la conexión de la cámara en la aplicación desarrollada utilizando la ventana de captura de imagen.	Se comprobó la comunicación de la cámara ya que se tomaron varias fotos de prueba y videos, todo esto dentro de los parámetros de fluidez esperados, sin presentar retrasos, congelamientos o	Prueba superada

		interrupciones.	
Reconocimiento de los elementos electrónicos dentro de la aplicación desarrollada	Se comprueba la conexión de todos los elementos electrónicos conectados al controlador principal comprobando su reconocimiento en la aplicación desarrollada, ya que si bien el sistema operativo reconoce estos elementos, existe la posibilidad de que no interactúen con el software de escaneo	Como en cualquier sistema operativo de propósito general orientado al uso doméstico, Raspbian detecta todos los periféricos conectados y los lista, al ingresar a la aplicación desarrollada y ejecutar la secuencia de conexión, no surgió ningún problema tanto en el proceso como en la comprobación de las comunicaciones.	Prueba superada

4.1.2 Pruebas de escaneo.

Después de comprobar el funcionamiento general de la máquina se procede a las pruebas de escaneo, en este caso es importante comprobar que se ejecute el proceso de una manera adecuada y se genere una nube de puntos, para esto se realiza el procedimiento descrito en el manual de usuario adjunto en el anexo H, los resultados de la primera prueba de escaneo para comprobación del proceso arrojó los siguientes resultados:

- El proceso de calibración se ejecutó adecuadamente.
- Se completó el proceso usando ambos laser y seleccionando una calidad alta de escaneo.
- No existió descoordinación en el proceso de escaneo, todo se realizó de una manera secuencial.
- El proceso tardó 39 minutos con 52 segundos.
- El archivo generado tiene una extensión .ply, la cual es un formato estándar y puede importarse desde la mayoría de software CAD para su posprocesamiento, por ejemplo en Inventor o Solidworks.

- El resultado final no es refinado, se puede mejorar personalizando las configuraciones, para esta primera prueba se usó una configuración rápida.



Figura 43: Primera prueba de escaneo

Como se puede apreciar en la figura 43 correspondiente a la primera prueba de escaneo, al usarse una configuración rápida, aún existen algunas fallas, pero el resultado se aproxima mucho al modelo real y cumple las expectativas planteadas en el diseño del escáner, este resultado nos sirve para demostrar el funcionamiento del equipo, con lo que damos por sentado que la aplicación desarrollada se ejecuta correctamente, así como que la interacción entre los elementos electrónicos y mecánicos es impecable.

El escáner desarrollado es capaz de reconocer forma y color, tal y como se muestra en la figura 44, y es un punto a favor si se compara con otros escáner disponibles en el mercado, los cuales solo reconocen forma.

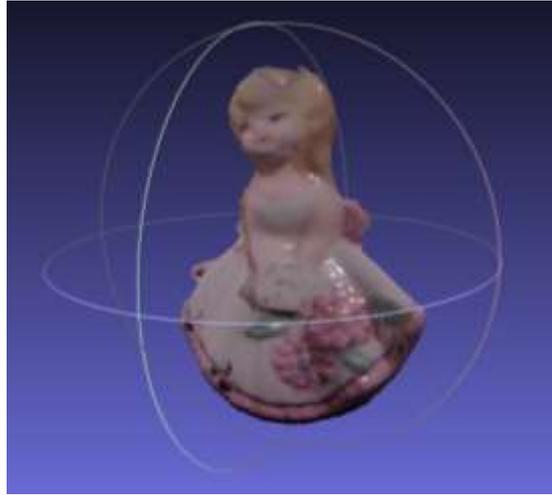


Figura 44: Figura escaneada a color

Tal como se muestra en la figura 45 correspondiente a la figura original escaneada blanca y la figura 46 que corresponde a la figura original escaneada a color, salvo por ligeros detalles, las figuras escaneadas son una fiel copia del original, posteriormente se analizará el nivel de detalle del equipo, pero en términos generales los resultados son más que satisfactorios.



Figura 45: Pieza escaneada de color blanco



Figura 46: Pieza escaneada a color

4.2 ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD REAL DEL ESCÁNER

4.2.1 Análisis de la capacidad de escaneo.

Después de comprobar que el escáner funciona de una manera correcta, es necesario determinar la capacidad real del escáner, en especial las dimensiones máximas que pueden tener las piezas a ser escaneadas y las restricciones para obtener resultados aceptables para su posprocesamiento, en primer lugar, las limitaciones físicas son evidentes, las piezas no pueden exceder la base del escáner, la cual tiene un diámetro de 200mm, y no es posible exceder el campo de visión de la cámara ni la línea que proyectan os laser lineales, a partir de la base de escaneo, los laser proyectan una línea sobre una pieza hasta máximo 250mm de altura, el campo de visión de la capara capta esa información e incluso un poco más, dicho esto, la limitación física de la pieza es que debe tener un diámetro máximo de 200mm y una altura de 250mm, como se determinó en el apartado 4.1, se realizaron pruebas de resistencia de la mesa para probar el peso que esta soporta y determinando que se pueden colocar piezas de hasta 5kg.

Este escáner, según las pruebas descritas en el párrafo anterior, es ideal para escanear piezas relativamente ligeras y de un tamaño compacto, siendo ideal para plásticos, porcelanas, figuras decorativas, etc.

Con respecto a los tipos de formas que pueden ser escaneados, hemos realizado las siguientes pruebas:

Tabla 14:

Resultados con figuras de diferente dificultad

Datos de la figura	Foto de la figura	Nube de puntos
Llaverito Altura:35mm Dificultad:7/10 Superficie reflejante: 6/10 Variedad de color:5/10		

Porcelana
Altura:93mm
Dificultad:6/10
Superficie
reflejante: 8/10
Variedad de
color:7/10



Snowman
Altura:135mm
Dificultad:4/10
Superficie
reflejante: 6/10
Variedad de
color:2/10



Buda
Altura:180mm
Dificultad:7/10
Superficie
reflejante: 3/10
Variedad de
color:3/10



Muñeca
Altura:250mm
Dificultad:10/10
Superficie
reflejante: 6/10
Variedad de
color:8/10



Según la tabla 14 que muestra el resultado de diferentes figuras de diversos colores y formas, es posible identificar las razones del porque ciertas nubes de puntos no contienen la información necesaria para recrear la figura de una manera fiel, y esto se debe al principio de triangulación en sí, hay que recordar que la cámara es la encargada de tomar la información necesaria para generar los modelos digitales a partir de una figura real, los laser juegan un papel importante en el proceso ya que marcan los pixeles que debe tomar la cámara de una manera secuencial para crear el archivo final, en el caso de las figuras que no son completamente cilíndricas y muestran una geometría muy compleja, existen regiones que nunca serán alcanzadas por el láser, y esto se ve de manera más clara en la figura llamada “muñeca” de la tabla 14, hay varias partes del cuerpo que no se ven en la nube de puntos, esto se debe a que partes como el cabello y los brazos tapan gran parte de la cara y torso, generando falta de información, lo mismo pasa con las partes internas de los brazos y las piernas, si bien existe la posibilidad de que logre llegar la luz del láser a esas partes, la cámara no podrá ver esta proyección si existe otra parte de la figura que obstaculice la línea de vista de la cámara; en pocas palabras, las figuras con demasiados detalles, como la muñeca, no serán escaneadas de una manera completa, lo mismo sucede con piezas que no son tan complejas, pero a pesar de eso tienen partes que sobresalen demasiado, obstaculizando el escaneo de superficies, es el caso de la figura llamada “buda”, a figura no es en exceso compleja, pero los brazos sobresalen y tapan parte del cuerpo de la

figura, es por eso que existen partes del archivo de nube de puntos que no contienen información y generan vacíos en el modelo escaneado, por otra parte, figuras sin partes que sobresalgan y puedan tapar detalles del modelo, se escanean de una manera óptima, como es el caso de la figura llamada “snowman”, este modelo no presenta pérdida de información.

4.2.2 Análisis del posprocesamiento.

El escáner desarrollado entrega archivos de puntos en extensión .ply, este formato es ampliamente soportado por varios programas CAD, pero requiere un trabajo extra para procesar esa información para poder formar un sólido editable, para esta tarea se usó el software Meshlab, esta aplicación es de distribución libre, cuenta con las herramientas necesarias para procesar nubes de puntos, se adjuntará una guía de posprocesamiento en el anexo I, a continuación se muestra un ejemplo de sólido generado utilizando esta herramienta a partir de una nube de puntos del presente proyecto.



Figura 47: Archivo STL de la figura snowman, vista 1



Figura 48: Archivo STL de la figura snowman, vista 2



Figura 49: Archivo STL de la figura snowman, vista 3

Como se puede apreciar en la figura 47, figura 48 y figura 49; en cuanto a la forma, el modelo mantiene sus características en relación al modelo real mostrado en la figura 50, figura 51 y figura 52.



Figura 50: Snowman, vista 1



Figura 51: Snowman, vista 2



Figura 52: Snowman, vista 3

4.2.3 Comprobación de medidas entre el modelo real y el modelo escaneado.

Tabla 15:

Cuadro de medidas y fallas

Detalle	Medida real(mm)	Medida del solido escaneado(mm)	Falla(mm)
Altura	132	131.217	0.883
Diámetro del sombrero	37.5	38.24	0.75
Diámetro de la cabeza	65	63.5	1.5
Diámetro del botón	11	10.36	0.64
Diámetro del cuello	51	49.74	1.26
Ancho de la oreja	26.5	25.6	0.9
Punta de la bufanda	24	23.38	0.62

Tal como se muestran en las mediciones en la tabla 15, mediante software del modelo escaneado con la figura real, existe una falla que va de 1.5 mm a 0.64 mm, tomando la medida de falla más alta: 1.5 mm, la falla radica de un valor real de 65 mm con un valor escaneado de 63.5 mm, el cambio representa un error de 2.5%.

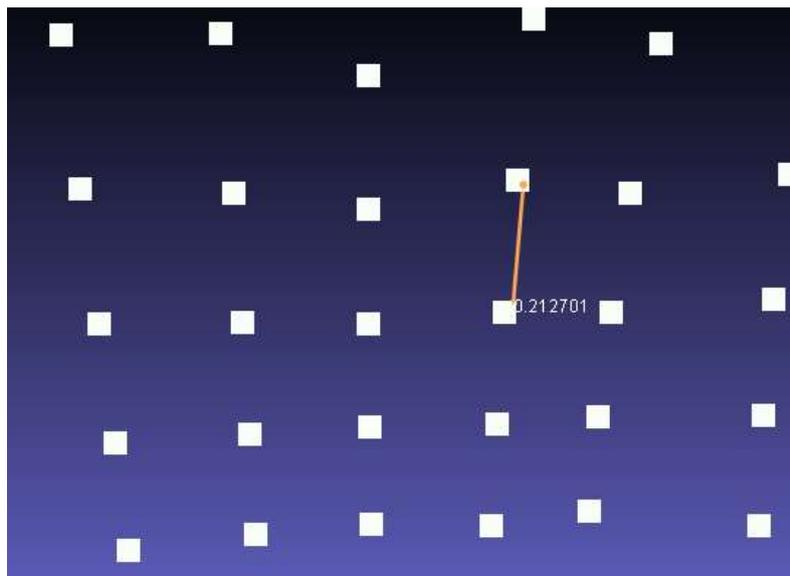


Figura 53: medición de la distancia entre puntos de la nube generada

En la figura 53 se muestra una macro visión de la nube de puntos de la figura snowman, para obtener este modelo se utilizó una configuración de resolución alta y usando ambos laser, se han medido las distancias entre los puntos del archivo, y las mediciones han entregado valores entre 0.183mm a 0.371.

4.3 SUSCEPTIBILIDAD A FACTORES EXTERNOS Y FALLAS

4.3.1 Efectos de la variación del entorno en el escáner.

Las variaciones del entorno son un parámetro muy importante, al ser un escáner que no cuenta con un ambiente controlado, lo que ocurre alrededor del equipo repercutirá de una u otra manera en el producto final, la nube de puntos.

Ya que la cámara el dispositivo que captara toda la información para generar el producto final del escáner, es obvio que la luz es el factor más importante si nos referimos a las variaciones del entorno, y las pruebas realizadas corroboran este hecho; se debe determinar que tanto afectan las variaciones de luz en nuestro equipo, para esto se han realizado los ensayos listados en la tabla 16:

Tabla 16:

Escaneo con luz natural vs luz artificial

Escaneo con luz natural	Escaneo con luz artificial	Figura
		



Como se pueden ver en las pruebas de la tabla 16, se logra una mayor interpretación del color en las figuras escaneadas con luz natural, el entorno que se usó para escanear con luz natural fue cuarto con ventanas en todas las direcciones, pero con cortinas delgadas que opacan la incidencia directa de luz solar sobre el escáner; para el entorno de luz artificial se usó el mismo cuarto pero en la noche, con focos de luz blanca, la cual es más común en lámparas fluorescentes y focos ahorradores de energía, la idea fue emular entornos que sean lo más comunes posibles, estos se encuentran detallados en la tabla 17, y en el caso del entorno con luz natural, es muy similar al laboratorio de CAD/CAM de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, lugar donde operará el equipo a partir de su finalización, de igual manera el laboratorio cuenta con fuentes de luz blanca artificial, por lo que se esperan los mismos resultados.

Tabla 17:

Iluminación de entornos de prueba

Ambiente usado para las pruebas de escaneo	Medición de luminosidad (Lux)
Cuarto en la noche con las luces apagadas	6
Cuarto en la noche con las luces encendidas	52
Cuarto en el día con cortinas gruesas cerradas	20
Cuarto en el día con cortinas delgadas cerradas	112

Cuarto en el día con cortinas abiertas

1200

Con respecto a las variaciones del producto final según la hora del día o según la intensidad del son, los cambios no son muy drásticos, por otra parte, al existir cambios en la intensidad de luz artificial, los cambios son más notorios, pero solo en la interpretación del color, la forma no se ve afectada.



Figura 54: Variación de luz natural en el escaneo



Figura 55: Variación de luz artificial en el escaneo

La figura 54 que representa la variación de luz natural en el escaneo, es la que se genera cuando existe un día soleado y de repente se nubla, como podemos ver, variación se nota más en la interpretación del color, por otro lado la forma se mantiene igual, se ha probado el peor de los casos de variación de

luz natural, ya que a más de esperar que el clima se nuble, se cubrió las ventanas con una segunda cortina, que atenuó un poco más la luz.

En el caso de la variación artificial como se muestra en la figura 55, el efecto es más drástico, pero de igual manera, la variación se aprecia en la interpretación del color, la forma se mantiene, de igual manera esta prueba contempla el peor de los casos, mientras la pieza se estaba escaneando, se apagó la luz y se terminó el proceso a oscuras, es por eso que una parte de la figura está de color negro, pero aun estado a oscuras, que es el peor caso posible con respecto a la luz, la interpretación de la forma no se ve afectada.

En términos prácticos, la interpretación de color pasa a un segundo plano si el objetivo es realizar un posprocesamiento de la nube de puntos, ya sea para impresión 3D, mecanizado o modificación de la pieza en un software CAD, ya que al generar un sólido, se descartan los colores para formar un sólido uniforme, tomando en cuenta eso, se puede afirmar que el escáner construido es capaz de interpretar las formas bajo condiciones de luz variables, tanto por ser capaz de escanear a oscuras y porque las sombras no se muestran en la nube de puntos final, sin importar que la fuente de luz esté de un solo lado, no se mostraran sombras, pero esto se reflejara en la interpretación de color final.

Dados los resultados de las pruebas realizadas, se determinó que no es necesario encapsular el escáner para tener un ambiente de luz controlada por las siguientes razones:

- Se logra una mejor interpretación de color cuando se escanea usando luz natural
- Las variaciones de luz ocasionan que la interpretación de color sea errónea, pero la interpretación de la forma se mantiene, y para fines prácticos de posprocesamiento, la interpretación de color no es importante ya que es información que se descarta al momento de crear un sólido.
- Sin importar la luminosidad, el escáner no toma las sombras como parte del sólido, haciendo que no se necesite una iluminación constante y uniforme en el sólido.

- Un encapsulado implicaría una estructura más compleja y de mayor tamaño, lo que reduciría su facilidad de montaje y desmontaje, incrementaría su peso y haría del escáner un equipo más difícil de transportar, además de incrementar su costo de una manera innecesaria.
- Al ser un escáner abierto, le añade un extra para fines didácticos, ya que en todo momento se puede ver lo que sucede a la pieza durante el proceso, además es más fácil colocar y posicionar la pieza a ser escaneada en el centro de la mesa de manera correcta para iniciar con el proceso.

Por las razones se justifica el hecho de que el escáner construido sea abierto, en cuanto a los riesgos de operación, los laser utilizados son de clase 1 como se especifica en el apartado 2.4.2; lo que implica que no presentan riesgo alguno, incluso si por accidente se proyectan los laser directamente a los ojos del operador, de igual manera el motor no produce movimientos bruscos, ni es lo suficientemente potente para producir accidentes graves; siempre que se respeten las normas de operación especificadas en el manual de usuario, es muy difícil que se produzca un accidente con el equipo.

En cuanto a otro tipo de variaciones del entorno, como ruido, movimientos bruscos y variaciones en el flujo eléctrico de alimentación del sistema, el equipo está diseñado para operar en una superficie fija, con un flujo eléctrico constante, obviamente cuenta con las protecciones respectivas incluidas en los equipos electrónicos utilizados, como fusibles y disipadores de calor. En cuanto a movimientos bruscos durante el escaneo, el equipo no está diseñado para esas situaciones, ya que puede ocasionar accidentes, desde danos en la pieza que se está escaneando hasta heridas al operador por golpes contundentes; respecto a otras variaciones, no se han identificado respuestas frente a otros cambios en el ambiente como por ejemplo ruido acústico.

4.3.2 Fallas comunes de escaneo.

Como en cualquier equipo, existen varias fallas al momento de realizar el proceso, estas se producen por diferentes causas, estas se refieren a errores

en el producto final que es la nube de puntos; no tiene relación con fallas de hardware o software que puedan producirse en el equipo. Los errores se especifican en la tabla 18 adjunta.

Tabla 18:

Lista de fallas comunes del proceso de escaneo

Descripción del error	Imagen del modelo con falla
<p style="text-align: center;">Calibración</p> <p>Los puntos mostrados en la figura que no corresponden al modelo, se generan cuando se cambia el ambiente en que se calibro y se utilizan los mismos parámetros, por ejemplo: se calibro en el día con luz natural y se utilizan esos parámetros para escanear en la noche, por eso es recomendable realizar siempre la calibración antes de iniciar cualquier trabajo de escaneo.</p>	
<p style="text-align: center;">Excesivo aumento de luz</p> <p>El error mostrado en la figura se genera por un incremento excesivo de la luz ambiente, esto ocurre con la luz natural ya que con artificial no se han presentado problemas de este tipo, en el caso específico de la figura mostrada, se calibro en un ambiente con luz natural moderada, luego al momento de escanear se puso la mesa del escáner junto a una ventana en un día soleado y se abrió la cortina para que incida directamente la luz del sol sobre el modelo a ser escaneado.</p>	

Cuerpos extraños en la zona de escaneo

La falla mostrada se produce al colocar cuerpos extraños dentro del área de trabajo del escáner, por ejemplo personas que se cruzan muy cerca la mesa giratoria; también se presenta cuando algo se coloca en el espacio entre la cámara y la pieza a ser escaneada, ya que el escáner está programado para tomar tocos los puntos en los que se proyecte la luz roja del láser lineal; otra causa es que exista un fondo detrás de la mesa giratoria y de frente a la cámara que este lo suficientemente cerca para proyectar la luz del láser dentro del campo de visión de la cámara



Variación de los parámetros de forma manual

El software de escaneo nos deja variar valores como la exposición de manera manual, durante la ejecución del asistente de calibración, esos valores se ajustan de manera automática pero si el operador desea tener mejores resultados, puede modificar dichos valores, pero una mala configuración de los valores de exposición, brillo o saturación del color, pueden generar la falla mostrada.



Variación de luz

La variación moderada de luz ocasiona fallas en la interpretación de color, mas no en la interpretación de forma, para fines prácticos de posprocesamiento, la interpretación del color no tiene relevancia al momento de la generación de un sólido.



Como se describe en la tabla 18, la mayoría de fallas se produce por valores erróneos en parámetros que se autoajustan al momento de calibración del equipo, en cuanto a los fallos ocasionados por variación excesiva de luz no quiere decir que nuestro equipo este limitado a un cierto valor de luz ya sea natural o artificial, significa que si existe un cambio extremo desde el momento de calibración hasta el momento de uso del escáner, existirá una falla, si desde el momento de calibrar el equipo hasta el momento de su uso existe una gran fuente de luz, no existirá fallas ya que el sistema se ajustara al entorno.

4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE UN ESCÁNER PROFESIONAL Y EL ESCÁNER DESARROLLADO

Para determinar la calidad del escáner se realizan las pruebas en el escáner 3D desarrollado y en un escáner 3D profesional, los dos utilizan laser.

4.4.1 PICZA 3D Laser Scanner LPX 60.

El escáner 3D profesional es el PICZA 3D LASER SCANNER LPX 60, sus especificaciones técnicas se presentan en el anexo F. Este pertenece al laboratorio de CAD/CAM/CAE de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Sangolquí, se puede apreciar en la figura 56.

Los escáneres 3D Ronald LPX combinan el modo rotativo y el plano para digitalizar piezas en 3 dimensiones. Se entrega con un completo y potente

software que lo convierte en el de mayor prestación y menor precio en el mercado (TECNIA.SA, s.f.).

Resumen.

- Digitalizado 3D automático con sólo pulsar un botón.
- Volumen máximo LPX-60: 304.8 mm de altura y 203.2 mm de diámetro.
- Resolución de 0.2 mm.
- Incluye Software de ingeniería inversa LPX EZ Studio.
- Formatos exportados: STL, PIX, nube de puntos y 3DM.
- Diseño atractivo y compacto para entornos de oficina (TECNIA.SA, s.f.).



Figura 56: PICZA 3D Laser Scanner LPX 60.

Aplicación de escaneo.

La aplicación utilizada para el escáner PICZA 3D LASER SCANNER LPX 60 es PLXEZStudio V3.02, presente en la figura 57, esta es software propietario, y solo puede ser instalado en Windows Vista, Windows XP y Windows 2000, no hace falta explicar el procedimiento puesto que este capítulo se enfoca a comparar los resultados de los dos escáneres.

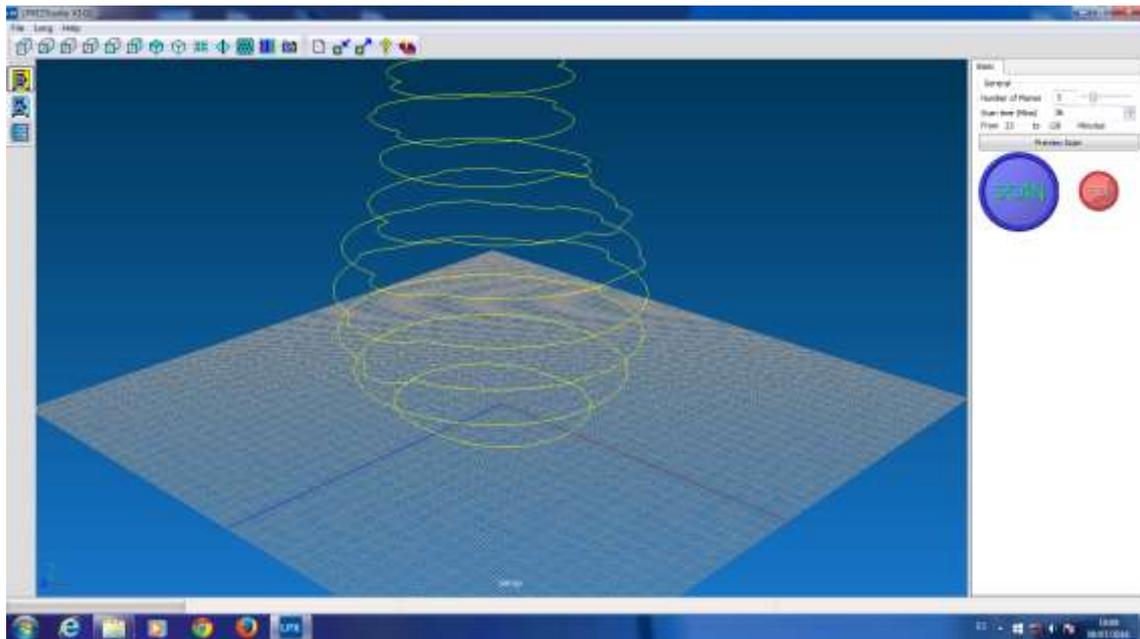


Figura 57: PLXEZStudio V3.02

4.4.2 Comparación de propiedades entre el PICZA 3D LASER SCANNER LPX 60 y el escáner desarrollado.

Para empezar, el escáner 3D desarrollado realiza el proceso hasta llegar a la nube de puntos, por lo tanto para visualizar un archivo .ply se importa al programa MeshLab. Esta es una clara desventaja con respecto al escáner PICZA LPX 60, puesto que el archivo generado por el software PLXEZStudio V3.02, puede ser STL, GSF, 3DM, XYZ, PIX.

Como primer punto se realiza un análisis de los parámetros de la tabla 19, estas representan las grandes diferencias entre el escáner profesional y este escáner de investigación.

Tabla 19:

Parámetros generales de los escáneres

Parámetros	Escáner PICZA LPX60	Escáner desarrollado
Costo	\$17000	\$1000
Recursos	Mayor cantidad de recursos para el procesamiento	Menor cantidad de recursos para el procesamiento
Autonomía	50%	95%

Seguridad	100%	95%
Calidad del escaneo	9.5/10	8/10
Tiempo de escaneo	Aprox 36 min	Aprox 45 min
Resolución	0.2mm	0.5mm
Capturar color	No	Si
Genera archivo stl	Si	No
Repercusión de incidencia de luz	0%	30%
Facilidad de uso	9/10	7/10

Los dos escáneres funcionan con el principio de triangulación, en cuanto al costo de la máquina, existe un precio abismal, aproximadamente \$16000 de diferencia. Gracias a este recurso la calidad de la digitalización del objeto es mucho mejor que a la del escáner desarrollado, por tanto también utiliza mayor cantidad de recursos para el procesamiento además de mejores equipos para conseguir una excelente resolución. Sin embargo, también cabe mencionar que se ha logrado conseguir muy buenos resultados en el escáner desarrollado, utilizando menor cantidad de recursos económicos y de procesamiento. La diferencia en el tiempo no es muy alta y la calidad es aceptable.

Al hablar de autonomía, se refiere a la necesidad de elementos periféricos, como por ejemplo, el escáner PICZA LPX 60 necesita un computador y su respectivo monitor, teclado y mouse. Mientras tanto el escáner desarrollado no necesita de estos elementos, puesto que como parte de la maquina son la raspberry, pantalla touch y teclado.

Con respecto a la seguridad, a pesar que el escáner PICZA LPX 60 utilice un láser clase 3R (apartado 1.6), este solo puede ser activado siempre y cuando la puerta se cierre, por otro lado, el escáner desarrollado está totalmente descubierto, no utiliza ningún tipo de actuador peligroso, sin embargo un movimiento intencional puede causar una mala calidad de la digitalización.

4.4.3 Análisis de calidad de digitalización del objeto en los escáneres analizados.

Las pruebas se realizarán utilizando varios tipos de objetos; geometrías fáciles, complejas e intermedias, objetos blancos, con color, reflejantes y no reflejantes.

Se ejecuta un análisis de la calidad, utilizando la vista frontal, vista posterior, lateral izquierda y derecha, todo esto de la nube de puntos, después se la realiza con el post-procesado como objeto sólido.

Prueba 1: Complejidad baja

Geometría cilíndrica simple, carente de color.



Ítem	Escáner PICZA LPX 60	Escáner desarrollado
Vista frontal		

**Vista lateral
izquierda**



**Vista lateral
derecha**



Vista posterior



Vista isométrica



Post procesado como objeto solido propio de la aplicación utilizada.



No genera archivo

Calidad de la digitalización del objeto

9,5/10

9/10

Ventajas

La resolución de los puntos es uniforme, interpola los puntos para llenar espacios vacíos.

Toma el color de la cerámica, da a conocer que su color blanco.

Desventajas

Al rellenar espacios vacíos crea una geometría que no es propia del objeto, como por ejemplo el sombrero del muñeco.

Gracias a que captura el color, esto se ve influenciado por las variaciones de luz, se puede observar que la mayor parte de la nube de puntos son franjas que varían entre blanco claro y oscuro.

Los espacios vacíos no son

completados, por lo tanto la vista superior es hueca.

Observaciones

Los puntos tomados por el escáner profesional son más precisos que el escáner desarrollado.

Los archivos del escáner profesional son fácilmente importables a otros programas CAD, mientras que los archivos ply del escáner desarrollado deben seguir un procedimiento, en el cual se presentan inconvenientes.

Prueba 2: Complejidad media

Geometría no cilíndrica, con detalles y carente de color.

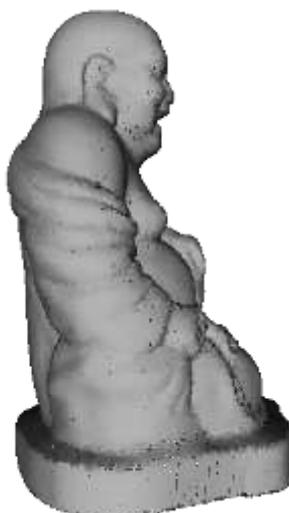


Ítem	Escáner PICZA LPX 60	Escáner desarrollado
Vista frontal		

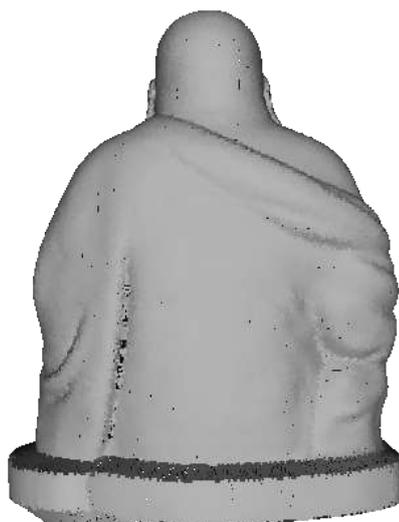
**Vista lateral
izquierda**



**Vista lateral
derecha**



Vista posterior



Vista isométrica



Post procesado como objeto solido propio de la aplicación utilizada.



No genera archivo

Calidad de la digitalización del objeto

9.5/10

8/10

Ventajas

El escáner profesional no tiene problemas con las geométricas no cilíndricas, por lo tanto el nivel de detalle con este tipo de objetos es excelente.

Desventajas

Por las características técnicas, tiene problemas con los objetos no cilíndricos, por esta razón su detalle no es muy bueno en comparación al escáner profesional, sin

embargo posee un nivel aceptable de detalle.

Observaciones

El escáner profesional tiene la capacidad de escanear variedades de geometrías, hasta este punto con un nivel de dificultad media.

Prueba 3: Complejidad alta

Ítem	Escáner PICZA LPX 60	Escáner desarrollado
Vista frontal		
Vista lateral izquierda		

Vista lateral derecha



Vista posterior



Vista isométrica



Post procesado como objeto solido propio de la aplicación utilizada.



No genera archivo

Calidad de la digitalización del objeto

7.5/10

5.5/10

Ventajas

Posee la capacidad de escanear geometrías complejas, al menos hasta el punto de similitud óptica en la figura.

Captura el color de cada punto de la nube.

Desventajas

No puede capturar el color
Tiene dificultad con las geometrías asimétricas, no logra conseguir el detalle de las pruebas 1 y 2.

No tiene un nivel de detalle tolerable, la geometría es demasiado compleja para el escáner.

Observaciones

Los dos escáneres no tienen la capacidad de replicar objetos de geometría compleja tales como el de esta prueba, carecen la capacidad de tomar datos de caras ocultas.

Prueba 4: Objeto reflejante y con color



Ítem	Escáner PICZA LPX 60	Escáner desarrollado
Vista frontal		
Vista lateral izquierda		

**Vista lateral
derecha**



Vista posterior



Vista isométrica



Post procesado como objeto solido propio de la aplicación utilizada.



No genera archivo

Calidad de la digitalización del objeto

9.5/10

8/10

Ventajas

En este caso, no tener la capacidad de capturar color no le perjudica determinar la distancia, puesto que afecta el hecho de ser o no ser un objeto reflejante.

Captura el color, incluso de las partes que reflejan siempre y cuando exista una iluminación adecuada.

Desventajas

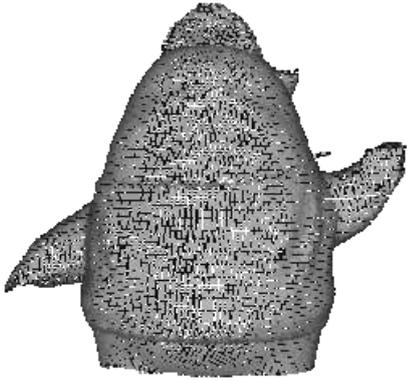
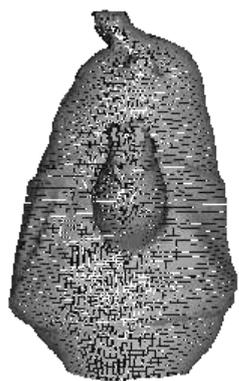
No captura color

Por ser una figura asimétrica tienen unas pocas dificultades, aun así el nivel de detalle es aceptable.

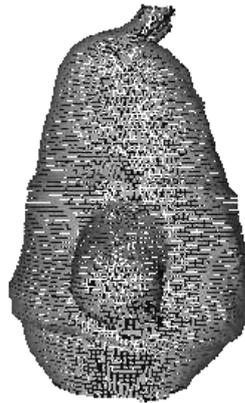
Observaciones

el escáner profesional posee la capacidad de escanear objetos reflejantes, sin tener en cuenta las condiciones de simetría ni iluminación, mientras que el escáner desarrollado logra este objetivo con una iluminación adecuada.

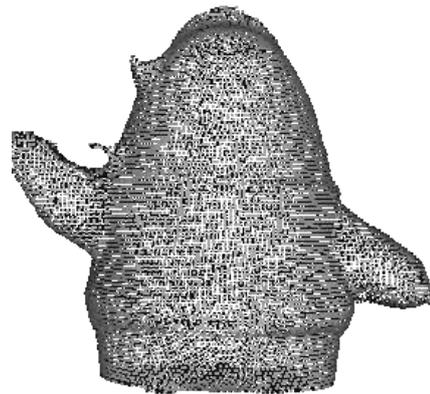
Prueba 5: Objeto muy pequeño y con color

Ítem	Escáner PICZA LPX 60	Escáner desarrollado
Vista frontal		
Vista lateral izquierda		

Vista lateral derecha



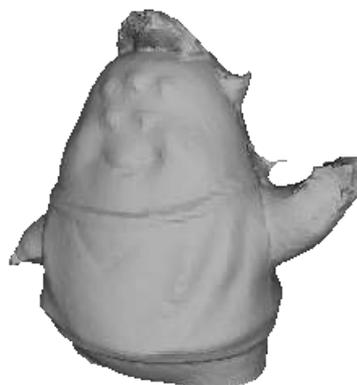
Vista posterior



Vista isométrica



Post procesado como objeto solido propio de la aplicación utilizada.



No genera archivo

Calidad de la digitalización del objeto	8/10	7/10
Ventajas	Capacidad de escanear objetos muy pequeños, con un detalle aceptable	Capacidad de capturar color, y el nivel de detalle es suficiente para distinguir la figura.
Desventajas	No captura color La resolución no es suficiente para escanear figuras pequeñas	No es recomendable para objetos pequeños. Figura escaneada incompleta.
Observaciones	Los dos escáneres tienen dificultades con los objetos pequeños.	

4.5 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis planteada para el presente proyecto es:

Se diseñará y construirá un escáner 3D rotativo mediante el análisis de parámetros del principio de triangulación.

Se ha justificado la hipótesis ya que se ha diseñado y construido un escáner laser rotativo utilizando el principio de triangulación por láser, dicho equipo funciona de una manera autónoma, es capaz de interpretar formas y colores; cuenta con una resolución de 0.5mm y será utilizado para practicas didácticas en el laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga; generando de esta manera un proyecto de investigación y formando las bases para futuras investigaciones.

4.6 ANÁLISIS DE COSTOS VS BENEFICIO

La máquina ha sido implementada satisfactoriamente cumpliendo con los objetivos planteados. Es necesario demostrar que la inversión económica es justificada con respecto a los resultados obtenidos.

Para la implementación del proyecto se empleó materiales eléctricos, electrónicos, dispositivos de control, materiales mecánicos, material para impresión 3D que se detallan en la tabla 20.

De acuerdo a esta tabla se realizó una inversión total de \$ 962,50 USD, de lo cual gran parte de la inversión resulta ser los costos de importación.

Tabla 20:

Costos de implementación

Descripción	Cantidad	Precio
Módulo RASPBERRY PI 2 Modelo B+ 1 GB RAM	1	57,00
Equipo electrónico (cámara web HD Logitech C270, dos módulos láser de línea clase 1, placa controladora ZUM BT-328)	1	190,00
Pantalla táctil	1	85,00
tarjeta microSD 16GB Clase 4	1	8,00
Fuente 5V	1	8,00
Cables de fuente	1	3,5,
Extensión USB	1	6,00
Motor NEMA 17	1	78,00
Varillas roscadas	1	30,00
Tornillos y pernos	-	2,00
Base de madera	1	70,00
Impresión 3D	-	120,00
Costos de importación y transporte	-	210,00
Impresiones y equipo de oficina	-	25,00
Varios	-	70,00
Total		962,50

La inversión justifica los resultados obtenidos, a diferencia de equipos similares que son muy costosos como PICZA 3D Laser Scanner LPX 60 que cuenta \$ 17000,00; este escáner diseñado casi alcanza la calidad de un escáner profesional con una inversión de aproximadamente \$1000.

La relación costo es de 17:1, tomando en cuenta que la precisión del escáner profesional es de 0.2mm y la del escáner desarrollado es de 0.5mm, la relación de precisión es de 2.5 veces a 1. Por lo tanto se concluye que los resultados son aceptables con respecto a la inversión realizada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un escáner 3D laser rotativo, utilizando el principio de triangulación por láser, capaz de interpretar formas y colores, con una resolución de 0.5mm, que genera archivos de nubes de puntos con extensión .ply.
- Se demostró que al utilizar una cámara de resolución 1280x720 pixeles se obtiene una resolución de 0.5mm en el proceso de escaneo.
- Se comprobó que el escáner desarrollado puede operar en ambientes con luminosidad de 6 a 1200 luxes.
- La mejor interpretación de color se obtiene en ambientes con iluminación uniforme, con valores de entre 100 a 120 luxes.
- La mejor interpretación de forma se obtiene con objetos de geometría cilíndrica sin caras ocultas, en caso de objetos de geometría compleja con caras ocultas la información obtenida por la cámara dificulta su digitalización.
- El tiempo de escaneo varia de 8 a 41 minutos, este valor depende de la resolución seleccionada al inicio del proceso, la complejidad y el tamaño del objeto no influyen en el tiempo de escaneo.
- Se determinó que la mejor opción para el escáner es que sea abierto, utilizando la iluminación del ambiente, en lugar de un entorno de luz controlada, ya que no aportaba grandes cambios en la calidad final de las nubes de puntos y agregaba algunas desventajas como reducción de portabilidad, aumento de tamaño y costo.

- Se logró crear un equipo autónomo, que no requiere un computador u otro dispositivo similar para poder funcionar, incrementando su versatilidad y facilidad de uso, a su vez elimina posibles problemas de comunicación o compatibilidad que presentan equipos que requieren un computador para poder funcionar.
- Todo proceso de escaneo se ejecuta en el mismo programa, no necesita ser exportado a programas auxiliares, esto ayuda que el proceso sea rápido y coordinado, evitando que se pierdan los datos.
- Se implementó un método rápido y sencillo de recuperación del software en caso de fallos, esto supone una gran ventaja, ya que todo el sistema operativo y la aplicación de escaneo se carga en una memoria micro SD que es fácilmente reemplazable, esto nos da la posibilidad de que en caso de fallo de software, el escáner puede volver a ser operativo en un corto tiempo de una manera segura.
- Se demostró la capacidad del escáner para captar información e interpretar el color de las figuras escaneadas
- Se identificó la repercusión que tienen los cambios de iluminación en el proceso de escaneado, demostrando que la interpretación de forma no se ve afectada con dichos cambios, pero la interpretación de color sí.
- Se determinó que la interpretación de los colores no es un factor relevante para tareas de posprocesamiento, y en virtud de que las variaciones de iluminación afectan en su mayoría a este factor, las variaciones de iluminación que puedan ocurrir en situaciones normales, no afectan en la generación del modelo final.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para incrementar la resolución del escáner, se recomienda usar una cámara con mayor resolución y laser con una proyección de línea más fina.
- Para reducir el tiempo de escaneo se recomienda utilizar un procesador más potente.
- Para mejorar la interpretación de color se recomienda el uso de luz natural constante y uniforme.
- Se recomienda la implementación de un algoritmo de autocalibración de la iluminación del entorno utilizando ldr, para mejorar la respuesta del sistema frente a cambios de luz.
- Colocar el escáner sobre una superficie horizontal fija y antideslizante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aracena Pizarro, D., Campos, P., & Tozzi, C. L. (25 de abril de 2005). *scielo.cl*. Recuperado el 01 de agosto de 2016, de <http://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v13n1/art07.pdf>
- Arroyo, J. (2015). *bq.com*. Recuperado el 26 de julio de 2016, de <http://diwo.bq.com/horus-released/>
- Arroyo, J. (23 de enero de 2015). *bq.com*. Recuperado el 26 de junio de 2016, de <http://diwo.bq.com/en/zum-scan-released-2/>
- bq. (2016). *Manual HORUS ESPAÑOL*. Recuperado el 02 de agosto de 2016
- bq, E. (20 de Marzo de 2015). *bq Ciclop*. Recuperado el 20 de marzo de 2016, de Escaner 3D: <http://www.bq.com/es/ciclop>
- Buildparts*. (2014). Recuperado el 20 de mayo de 2016, de <http://www.buildparts.com/materials/abs>
- Castro, L. (09 de agosto de 2016). *About*. Obtenido de <http://aprenderinternet.about.com/od/ConceptosBasico/g/Escalabilidad.htm>
- Chancusi Toapanta, S. d., & Navarrete Parra, P. H. (Abril de 2014). Ventajas de la impresion 3D. *Diseño y construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbricamente para el prototipado de piezas plásticas de bajo costo, mediante software libre*. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador: ESPE.
- Clemente, E. L. (05 de diciembre de 2015). *Prezi.com*. Obtenido de <https://prezi.com/rvotpvu8s3vk/ventajas-y-desventajas-del-cnc/>
- Cock, J. D. (2012). El método de la triangulación aplicado en un escaner laser, para objetos tridimensionales. *Revista Universidad EAFIT*, 25-31. Recuperado el 20 de abril de 2016
- Crespo Julio, C. M., & Fernández Zúñiga, E. J. (2014). *Diseño e implementación de un escáner 3D para prototipado y modelado*

geométrico de objetos. Barranquilla. Recuperado el 22 de marzo de 2016, de <http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/11619/1368/TMCT%200011C.pdf?sequence=2>

DeCamaras. (21 de 07 de 2016). Obtenido de Glosario de Fotografía Digital: http://www.decamaras.com/CMS/component/option,com_glossary/Itemid,255/func,term/term,blooming

Doutel, F. (10 de febrero de 2015). *Xatahome*. Recuperado el 17 de junio de 2016, de <http://www.xatakahome.com/trucos-y-bricolaje-smart/probamos-la-nueva-raspberry-pi-2-a-fondo>

EOS. (16 de abril de 2007). *Asiannet*. Recuperado el 06 de agosto de 2016, de http://webbuilder5.asiannet.com/ftp/2684/TD_P100_en.pdf

EOS. (2008). *Shapeways*. Recuperado el 06 de agosto de 2016, de https://www.shapeways.com/rrstatic/material_docs/mds-strongflex.pdf

formizable. (11 de octubre de 2015). Recuperado el 28 de marzo de 2016, de <http://formizable.com/todo-sobre-tecnologias-escaner-3d/>

Gil, P., Manchón, E., Torres, F., Pomares, J., & Ortiz, F. G. (2002). Reconstrucción tridimensional de objetos con técnicas de visión y luz estructurada. *Proceedings de las XXIII Jornadas de Automática*, ISBN, 84-699. Recuperado el 16 de junio de 2016

ite.educacion. (21 de 05 de 2016). Recuperado el 21 de julio de 2016, de <http://www.ite.educacion.es/formacion/materiales/107/cd/imagen/imagen0102.html>

Lerma, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S., & Seguí, A. E. (2013). Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de arte rupestre*, 85-90. Recuperado el 25 de mayo de 2016

Liarte, D. (21 de 07 de 2016). *Xatakafoto.com*. Recuperado el 20 de marzo de 2016, de <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>

Mañana Borrazás, P., Rodríguez Paz, A., & Blanco Rotea, R. (2008). Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). *Arqueología de la Arquitectura*, 15-32. Recuperado el 10 de abril de 2016

Microsoft.com. (s.f.). Obtenido de <https://developer.microsoft.com/es-es/windows/iot/Explore/loTCore.htm>

Milroy, M. J., Weir, D. J., Bradley, C., & Vickers, G. W. (1996). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. En *Reverse engineering employing a 3D laser scanner: a case study* (págs. 111-121). Recuperado el 04 de abril de 2016

opencv.org. (02 de 06 de 2016). Recuperado el 05 de 08 de 2016, de http://docs.opencv.org/trunk/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html#gsc.tab=0

opencv.org. (2 de 05 de 2016). Recuperado el 05 de 08 de 2016, de http://docs.opencv.org/3.1.0/d4/d13/tutorial_py_filtering.html#gsc.tab=0

RaspberryPI.org. (2015). Recuperado el 17 de junio de 2016, de <https://www.raspberrypi.org/blog/the-eagerly-awaited-raspberry-pi-display/>

Rubio Gil, D., Martínez Rubio, J., Baena Preysler, J., Fernández Martín, J. J., & Finat Codes, J. (2010). Nuevos métodos para viejas tecnologías: análisis y documentación de los materiales arqueológicos mediante la aplicación de sistemas Láser-scanner 3D. *Virtual Archaeology Review*, 169-173. Recuperado el 02 de junio de 2016

Stratasys. (Marzo de 2007). Dimension Elite User Guide. Recuperado el 12 de junio de 2016

TECNIA.SA. (s.f.). *Ronald.com.ar.* Recuperado el 26 de julio de 2016, de http://www.roland.com.ar/escaner_lpx.html

Tejado Sebastián , J. M. (2005). Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas: las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del Patrimonio Arqueológico. *Iberia: Revista de la Antigüedad*, 135-160. Recuperado el 10 de abril de 2016

udc.es. (11 de febrero de 2016). Recuperado el 01 de abril de 2016, de <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/Hardware/s-canner3D/Es-caner3D.html>

Wikipedia. (28 de septiembre de 2015). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Imagen_de_disco

Wikipedia. (20 de diciembre de 2015). Recuperado el 20 de marzo de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D

Wikipedia. (06 de diciembre de 2015). Recuperado el 25 de marzo de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D

Wikipedia. (18 de diciembre de 2015). Recuperado el 04 de abril de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_web

Wikipedia. (21 de 07 de 2016). Recuperado el 10 de julio de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_digital

Wikipedia. (30 de 05 de 2016). Recuperado el 21 de julio de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_digital#Calidad_de_la_imagen

Wikipedia. (28 de 05 de 2016). Recuperado el 30 de mayo de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser#Tipos_de_l%C3%A1seres

Wikipedia. (01 de agosto de 2016). Recuperado el 05 de agosto de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CERTIFICACIÓN

Se certifica que el siguiente trabajo fue desarrollado por los Señores: **SANDRA MARISOL CHASILUISA YANCHATUÑA** y **GALO MARCELO TAPIA ESTRELLA**, bajo nuestra supervisión.

Latacunga, agosto de 2016

Aprobado por:

