



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ESCÁNER 3D DE BAJO COSTO**

AUTOR: DEL CASTILLO VIVANCO, DAVID ISAÍAS

DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2017



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESCÁNER 3D DE BAJO COSTO*” realizado por el señor **DEL CASTILLO VIVANCO DAVID ISAÍAS**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **DEL CASTILLO VIVANCO DAVID ISAÍAS** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de abril del 2017

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'D. Loza Matovelle', is written over a horizontal dashed line.

MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *DEL CASTILLO VIVANCO DAVID ISAÍAS*, con cédula de identidad N° 1722707807, declaro que este trabajo de titulación "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESCÁNER 3D DE BAJO COSTO*" 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 declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 03 de abril del 2017

Atentamente,

DEL CASTILLO VIVANCO DAVID ISAÍAS
C.C. 1722707807



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORIZACIÓN

Yo, **DEL CASTILLO VIVANCO DAVID ISAÍAS**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESCÁNER 3D DE BAJO COSTO”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 03 de abril del 2017

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'David del Castillo', written over a horizontal dashed line.

DEL CASTILLO VIVANCO DAVID ISAÍAS

Dedicado al desarrollo ético y progreso de la humanidad en el campo técnico de la ingeniería inversa.

David

Agradecimiento

Agradezco efusivamente a mis padres que con su ejemplo, apoyo y su convicción en mi forjaron los valores necesarios de superación para la culminación del presente proyecto.

A mi querida hermana por inspirar el deseo de levantarme día a día y poner en marcha el desarrollo de la tesis, a mi enamorada por el cariño incondicional brindado en los tiempos de tribulación, a los amigos que con su grano de arena ayudaron en el transcurso de mi vida académica.

También deseo agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” por brindarme la posibilidad de terminar mis estudios y facilitar los medios pertinentes para construcción del prototipo de escáner 3D de bajo costo. Un especial reconocimiento a mi tutor MSc. David Loza, por sus sabios consejos y conocimientos que supieron guiar por buen camino el proyecto de titulación.

David

Índice general

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Capítulo 1	
Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema y justificación	1
1.2. Antecedentes	2
1.2.1. Historia del escáner 3D	2
1.2.2 Escáner 3D en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.1. Objetivos Específicos.....	6
1.4 Alcance	7
1.5. Estructura del documento.....	7
Capítulo 2	
Estado del arte.....	9
2.1 Tipos de Escáner 3D	9
2.2 Visión Artificial para Escáner 3D.....	18
2.2.1 Elementos constitutivos de un sistema de visión artificial.....	19
2.2.2. Fundamentos	21
2.2.3. Efectos del muestreo	22

2.2.4. Efecto de la cuantificación.....	22
2.2.5. Relaciones básicas entre píxeles	23
2.2.6. Procesamiento de la Señal.....	25
2.2.7. Influencia del ruido producido por el reflejo láser.....	31
2.3. Medición superficial por principio de triangulación.....	32
2.4. Reconstrucción superficial de nube de puntos	34
2.4.1. Vectores normales para conjunto de puntos.....	34
2.4.2. Proyección de puntos por mínimos cuadrados.....	34
2.4.3. Mallado superficial	35
2.5. Aplicaciones objetivo.....	38
2.6. Resumen.....	40
Capítulo 3	
Diseño	41
3.1 Desarrollo del concepto	41
3.1.1 Necesidades del Usuario	41
3.1.2 Especificaciones técnicas.....	42
3.2 Bloques funcionales	44
3.3 Módulo 1. Mesa de rotación	45
3.3.1 Subsistema 1. Rotación	45
3.3.2 Subsistema 2. Estructura mesa rotatoria	50
3.4 Módulo 2. Cabina.....	57
3.5. Módulo 3. Escáner	62
3.5.1. Subsistema 1. Adquisición de datos.....	65
3.5.2. Subsistema 2. Procesamiento de la información.....	72
3.6. Módulo 4. Potencia y control.....	73
3.7. Módulo 5. Interfaz	80
3.8. Concepto final	81

3.9. Resumen.....	84
Capítulo 4	
Construcción y pruebas.....	86
4.1. Plato giratorio.....	86
4.1.1. Corte.....	86
4.2. Acople.....	87
4.2.1. Maquinado.....	87
4.3. Eje.....	88
4.3.1. Maquinado.....	88
4.4. Cabina.....	88
4.4.1. Corte Láser.....	88
4.4.2. Ensamblaje.....	89
4.5. Mesa.....	90
4.5.1 Partes manufacturadas.....	90
4.5.2. Ensamblaje.....	91
4.6 Placa de control.....	92
4.6.1 Diseño PCB.....	92
4.6.2. Elaboración de la placa.....	93
4.6.3. Interfaz LDC 16×2.....	93
4.7. Módulo escáner.....	94
4.7.1. Láser lineal y calibración con la webcam.....	94
4.7.2. Láser Lineal y calibración con la webcam.....	95
4.8. Interfaz Humano-Máquina.....	95
4.9. Pruebas y resultados.....	96
4.9.1. Primera evaluación dimensional.....	97
4.9.2. Segunda evaluación dimensional.....	98
4.9.3. Tercera evaluación dimensional.....	100

4.9.4. Reconstrucción superficial.....	97
4.9.5. Comparación de resultados.....	98
4.9.6. Prueba solido complejo.....	99
4.9.7. Prueba de objeto cóncavo-convexo.....	101
4.9.8. Prueba de figuras geométricas.....	102
4.9.9. Prueba comparativa.....	104
4.10. Análisis económico.....	108
4.11. Resumen.....	109
Capítulo 5	
Conclusiones y Recomendaciones.....	110
5.1. Conclusiones.....	110
5.2. Recomendaciones.....	113
Bibliografía.....	116
ANEXOS.....	120

Índice de figuras

Fig. 1. Escaneo 3D de una de las obras de Miguel Ángel.....	3
Fig. 2. Digitalización 3D de <i>Monticello</i>	3
Fig. 3. Logo <i>Artec 3D</i> y su producto EVA.....	4
Fig. 4. Escáner 3D a partir de un sistema de visión estereoscópico.....	5
Fig. 5. Sistema para digitalización de objetos en 3D.....	5
Fig. 6. Tipos de escáner 3D.....	9
Fig. 7. Escáner 3D por contacto.....	10
Fig. 8. Funcionamiento time of flight.....	11
Fig. 9. Equipo Leica C10 externa e internamente.....	11
Fig. 10. Sistema de triangulación láser.....	12
Fig. 11. Escáner Minolta Vivid 910.....	13
Fig. 12. Diferencia de Fase.....	13
Fig. 13. Angulo de fase.....	14
Fig. 14. Tecnología Holografía Conoscópica.....	14
Fig. 15. Triangulación generada por Luz estructurada.....	15
Fig. 16. Ejemplo de Luz estructurada unidimensional.....	16
Fig. 17. Principio del método de fotogrametría.....	16
Fig. 18. Método de Silueta para escáner objeto.....	18
Fig. 19. Diagrama de bloques de un SVA.....	20
Fig. 20. Ejemplos de resolución de imagen.....	22
Fig. 21. Ejemplos de niveles de intensidad.....	23
Fig. 22. Vecindad de 4 y Vecindad de 8.....	23
Fig. 23. Conectividad de los pixeles.....	24
Fig. 24. Operación Umbral Binario.....	26
Fig. 25. Operación Umbral intervalo Binario.....	27
Fig. 26. Operación Umbral intervalo escala de grises.....	27
Fig. 27. Resultado de operaciones aritmético-lógicas.....	28
Fig. 28. Suavizado de una imagen.....	29
Fig. 29. Otros ejemplos de suavizado con sus respectivos filtros.....	30
Fig. 30. Ejemplo de segmentación basado en color.....	30
Fig. 31. Ejemplo de contorno Simple.....	31
Fig. 32. Errores presente durante el proceso de escaneado.....	31
Fig. 33. Principio de triangulación.....	32

Fig. 34. Ejemplo de algoritmo extracción de contorno	33
Fig. 35. Ejemplo de vectores normales a sus caras	34
Fig. 36. MLS	35
Fig. 37. Procesamiento de la nube de puntos	35
Fig. 38. Técnica de triangulación por cubos de marcha	36
Fig. 39. Generación de las regiones de Voronoi	37
Fig. 40. Representación superficial por B-Spline de orden diferente	37
Fig. 41. Reconstrucción 3D para ingeniería inversa	38
Fig. 42. Propósito didáctico-educacional del escáner 3D	39
Fig. 43. Matriz QFD Prototipo escáner 3D de bajo costo	43
Fig. 44. Momento de inercia del plato rotatorio	48
Fig. 45. Estructura mesa rotatoria	50
Fig. 46. Diagrama de fuerza cortante y momento flector del plato giratorio	51
Fig. 47. Análisis estático plato	52
Fig. 48. Gráfica resistencia-densidad de los materiales	53
Fig. 49. Diagrama de fuerza cortante y momento flector de la mesa	56
Fig. 50. Análisis estático de la mesa:	57
Fig. 51. Cabina prototipo escáner 3D	58
Fig. 52. Prueba RGB de visión artificial	58
Fig. 53. Distribución del prototipo escáner 3D	59
Fig. 54. Diagrama de fuerza cortante y momento flector de la mesa	60
Fig. 55. Análisis estático de la cabina – prueba 1	61
Fig. 56. Análisis estático de la cabina – prueba 2	61
Fig. 57. Acceso de mantenimiento del prototipo escáner 3D	62
Fig. 58. Modelo visión artificial	63
Fig. 59. Refracción del puntero láser	64
Fig. 60. Diagrama de flujo del proceso de escaneado	64
Fig. 61. Diagrama de flujo adquisición de datos	66
Fig. 62. Contorno láser	67
Fig. 63. Matriz de rotación en el eje “Y”	68
Fig. 64. Contorno del cilindro	69
Fig. 65. Diagrama de traslación de pixeles	69
Fig. 66. Modelo de triangulación del prototipo	70
Fig. 67. Imagen de prueba para valor Kp	71

Fig. 68. Diagrama de flujo procesamiento de la información.....	72
Fig. 69. Diagrama de flujo programación del arduino UNO.	76
Fig. 70. Driver para motor a pasos A4988.....	76
Fig. 71. Diagrama de conexión A4988.....	77
Fig. 72. Diagrama de conexión con Arduino UNO.....	78
Fig. 73. Diagrama esquemático del sistema electrónico.....	78
Fig. 74. Diagrama esquemático de la placa.....	79
Fig. 75. Vista 3D simulada de la placa.....	79
Fig. 76. Interfaz de usuario-primer concepto.....	80
Fig. 77. Interfaz humano máquina de la cabina.....	81
Fig. 78. Concepto final del prototipo escáner 3D de bajo costo.....	82
Fig. 79. Componentes internos del prototipo escáner 3D de bajo costo.....	82
Fig. 80. Diagrama de interacción de componentes.....	83
Fig. 81. Plato giratorio.....	86
Fig. 82. Maquinado del acople.....	87
Fig. 83. Eje.....	88
Fig. 84. Corte láser del acrílico.....	89
Fig. 85. Proceso de pegado de acrílico.....	89
Fig. 86. Cabina: Ensamble parcial.....	89
Fig. 87. Cabina: Ensamble final.....	90
Fig. 88. Mesa.....	90
Fig. 89. Ensamble de la mesa.....	91
Fig. 90. Ensamble subconjunto plato giratorio.....	91
Fig. 91. Ensamble final del módulo Mesa de rotación.....	92
Fig. 92. Placa de control.....	92
Fig. 93. Placa de control terminada.....	93
Fig. 94. LCD 16x2.....	93
Fig. 95. Distribución elementos electrónicos.....	94
Fig. 96. Conversión láser puntero a línea.....	94
Fig. 97. Láser lineal-funcionamiento.....	95
Fig. 98. Calibración de la webcam.....	95
Fig. 99. HMI final del prototipo escáner 3D de bajo costo.....	96
Fig. 100. Primer objeto de prueba (cilindro).....	97
Fig. 101. Segundo objeto de prueba (envase de shampoo).....	99

Fig. 102. Valor del Kp según la posición del punto de contorno.....	101
Fig. 103. Juguete de pato.....	99
Fig. 104. Prueba dimensional del objeto cóncavo-convexo.....	101
Fig. 105. Prueba de reconstrucción superficial objeto cóncavo-convexo.....	102
Fig. 106. Prueba de figuras geométricas.....	103
Fig. 107. Nube de puntos cubo cóncavo-convexo (PICZA LPX-60).....	106

Índice de tablas

Tabla 1 Requerimientos del usuario.....	41
Tabla 2 Especificaciones técnicas.....	42
Tabla 3 Resultados ponderados QFD.....	44
Tabla 4 Módulos funcionales.....	44
Tabla 5 Matriz de selección ponderada material del plato.....	54
Tabla 6 Alternativas de rodamiento.....	54
Tabla 7 Matriz de selección ponderada del rodamiento.....	55
Tabla 8 Matriz de selección ponderada material de la cabina.....	59
Tabla 9 Alternativas de cámara.....	62
Tabla 10 Alternativas de controlador del prototipo.....	74
Tabla 11 Matriz de selección ponderada del controlador.....	75
Tabla 12 Características Arduino UNO R3.....	75
Tabla 13 Características A4988.....	77
Tabla 14 Características LCD HD44780.....	77
Tabla 15 Descripción de componentes y módulos.....	83
Tabla 16 Primera prueba.....	98
Tabla 17 Segunda prueba-cilindro.....	99
Tabla 18 Segunda prueba-envase de shampoo.....	100
Tabla 19 Tercera prueba-cilindro.....	95
Tabla 20 Tercera prueba-envase de shampoo.....	96
Tabla 21 Reconstrucción superficial-cilindro.....	97
Tabla 22 Reconstrucción superficial-envase de shampoo.....	98
Tabla 23 Ventajas de la calidad de escaneo.....	99
Tabla 24 Prueba solido complejo.....	100
Tabla 25 Error dimensional porcentual del solido complejo.....	101
Tabla 26 Prueba dimensional objeto cóncavo-convexo.....	101
Tabla 27 Resultados de la prueba de figuras geométricas.....	103
Tabla 28 Prueba dimensional PICZA LPX-60 (envase).....	105
Tabla 29 Prueba dimensional PICZA LPX-60 (cubo cóncavo-convexo).....	106
Tabla 30 Cuadro comparativo de reconstrucción superficial.....	107
Tabla 31 Cuadro comparativos entre digitalizadores 3D.....	107
Tabla 32 Costos asumidos durante el proyecto.....	108

Resumen

El proyecto despliega el “Diseño y construcción de un prototipo Escáner 3D de bajo costo” cuyo principal propósito es la elaboración de un digitalizador 3D para fines didácticos-educativos que se desarrolle en su totalidad por software libre con la mínima inversión posible y sumerja al público investigador en la ingeniería inversa. Para empezar se analiza los métodos de escaneo y se aplica el más adecuado que vaya acorde con la finalidad del prototipo, siendo la triangulación láser la técnica utilizada. Luego se realiza un proceso de diseño para generar el primer concepto del prototipo. Posteriormente en la etapa de construcción y las pruebas, se describe el trabajo de manufactura y la evaluación del alcance del proyecto obteniendo un error dimensional inferior al 5%. Por ultimo con ayuda del software especializado *Meshlab* se realiza la reconstrucción superficial del objeto escaneado.

PALABRAS CLAVE:

- **ESCÁNER 3D**
- **INGENIERÍA INVERSA**
- **PROTOTIPADO**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **PRINCIPIO DE TRIANGULACIÓN**
- **NUBE DE PUNTOS**
- **SOFTWARE LIBRE**
- **RECONSTRUCCIÓN SUPERFICIAL**
- **CAD/CAM**

Abstract

The project develop the "Design and construction of a low-cost 3D scanner prototype", whose main objective is the elaboration of a 3D digitizer for didactic-educational purposes that is developed entirely by free software with the least possible investment and immerses the research public in reverse engineering. First, it's analyzed the scanning methods and apply the most suitable one according to the purpose of the prototype, the technique used was laser triangulation. Then a design process is performed to generate the first concept of the prototype. Subsequently in the construction and testing stage, the manufacturing work and the evaluation of the scope of the project are described, obtaining a dimensional error of less than 5%. Finally, with the help of *Meshlab* software, the superficial reconstruction of the scanned object is carried out.

KEYWORDS:

- **3D SCANNER**
- **REVERSE ENGINEERING**
- **PROTOTYPE**
- **ARTIFICIAL VISION**
- **TRIANGULATION PRINCIPLE**
- **POINT CLOUD**
- **FREE SOFTWARE**
- **SURFACE RECONSTRUCTION**
- **CAD / CAM**

Capítulo 1

Introducción

El capítulo justifica el porque es importante desarrollar un proyecto enfocado en la digitalización de objetos del entorno en el que vivimos. Se empieza por identificar el problema, lo que conlleva a realizar un trabajo investigativo de las alternativas que dan solución al proyecto. Una vez analizados los antecedentes se definen los objetivos que se desea conseguir junto con el alcance del prototipo.

1.1. Planteamiento del problema y justificación

La idea de implementar un Escáner 3D nace de la necesidad de analizar objetos para reunir información de su forma y color. La información obtenida y procesada se enfocará en construir modelos digitales tridimensionales y aplicarlos en áreas como:

- Metrología: Dimensionamiento rápido de piezas complejas.
- Arqueología: Conservación de artefactos históricos.
- Arquitectura: Para tener un banco digital de edificaciones.
- Ingeniería: Control de calidad, ingeniería inversa, prototipado rápido, Industria Aeroespacial.
- Entretenimiento: Industria de películas y videojuegos.
- Medicina: Reconstrucción de miembros o partes perdidas del cuerpo humano.

En general se ocupa para digitalizar objetos que podrían presentar gran dificultad de diseño por métodos convencionales. Todas las aplicaciones descritas se realizaban con instrumentos manuales, de tal manera que resultaba complejo, costoso y tomaba más tiempo llevarlas a cabo.

El Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” al momento cuenta con la tecnología de impresión 3D, con el proyecto que se busca explorar aún más sus capacidades mediante la implementación de un escáner 3D; el cual podrá realizar un modelo CAD (Dibujo Asistido por

Computadora) de un objeto que la impresora podrá reproducir utilizando un software de diseño CAM (Manufactura Asistida por Computadora).

Para la universidad y directamente para las carreras del DECEM, es una ventaja, ya que el prototipo impulsará la programación de prácticas de laboratorio referentes a campos tecnológicos como modelado, prototipado, metrología e ingeniería inversa con un carácter didáctico y educacional.

Por otro lado con el desarrollo de un prototipo escáner 3D de bajo costo, se promueve el crecimiento de ciencia y tecnología, adaptándose al actual “Plan Nacional del Buen Vivir” (Senplades, 2016). El cual se centra objetivamente en el cambio de la matriz productiva, potenciando y motivando a la incursión de nuevos proyectos tecnológicos para que el Ecuador deje de ser un país consumidor de tecnología extranjera y pueda sustentar sus necesidades bajo su propia tecnología.

1.2. Antecedentes

El hombre siempre ha buscado la manera de facilitar los diversos tipos de trabajos que ha desempeñado a lo largo del tiempo; motivado por la complejidad de algunas tareas la optimización de tiempo y recursos se volvió uno de sus objetivos principales.

Con la llegada de máquinas como la impresora y el escáner las ideas de las personas eran rápidamente plasmadas o reproducidas, marcando así un cambio revolucionario en la comunicación escrita.

En los últimos años con la llegada de la cuarta revolución industrial, la humanidad ha incursionado en el mundo del modelado 3D, donde día a día se trata de dar solución a las problemáticas presentes en el campo de la digitalización tridimensional de objetos.

1.2.1. Historia del escáner 3D

Los sistemas escáner de láser surgieron en 1999 con la necesidad de escanear las obras del escultor Miguel Ángel (Fig. 1.), la *Universidad de Stanford* conjuntamente con la empresa *Cyberware* trabajaron en la digitalización de las estatuas en la Capilla

de Medici; con un resultado de muestreo de 0.25 mm dejando 32 Gbytes de información que se procesó al cabo de 5 meses (Marc Levoy, 2000).

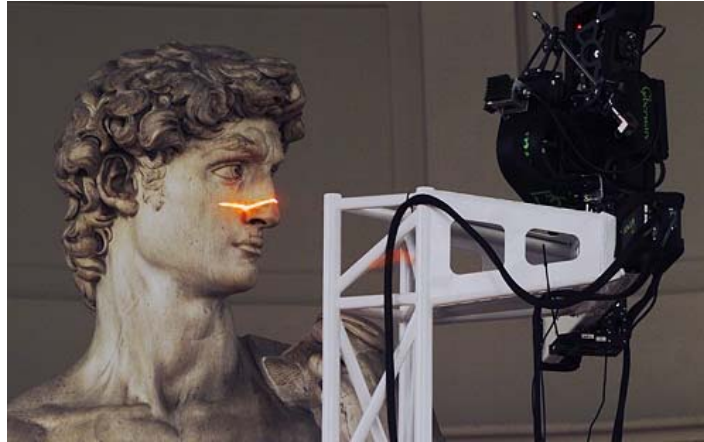


Fig. 1. Escaneo 3D de una de las obras de Miguel Ángel.
Fuente: (Marc Levoy, 2000)

El proyecto *Scanning Monticello* desarrollado en el 2002 por el Dr. David Luebke y su equipo de investigación de la *Universidad de Virginia* reconstruyó digitalmente con una extraordinaria exactitud el domicilio de Thomas Jefferson utilizando tecnología de escaneo láser (Luebke, 2002). Como se ve en la Fig. 2 la información adquirida fue combinada con imágenes digitales a color del lugar para darle un detalle realístico.

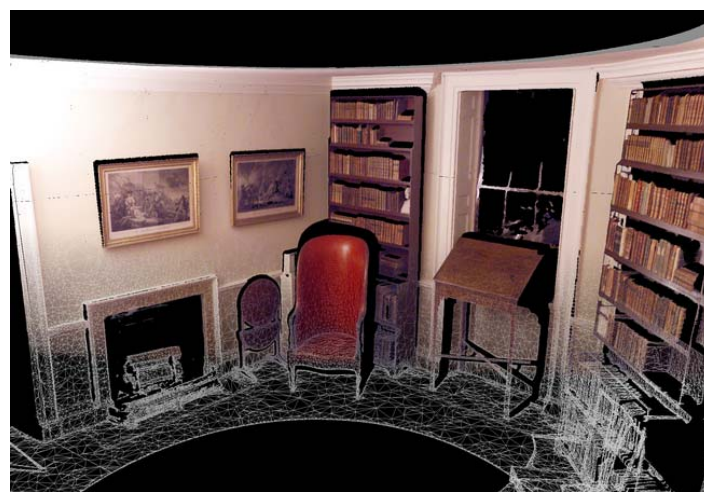


Fig. 2. Digitalización 3D de *Monticello*.
Fuente: (Luebke, 2002)

En el 2012 una de las empresas más destacadas en el campo de modelado es “*Artec 3D*” (3D, 2016). La empresa ha emprendido en la investigación en del campo de la ingeniería inversa y digitalización 3D, creando dispositivos de escaneo de alta resolución como el EVA (Fig. 3).



Fig. 3. Logo *Artec 3D* y su producto EVA.
Fuente: (3D, 2016)

Artec 3D es propietario de su propio software de digitalización (*Artec Studio 10*), siendo famoso por sus trabajos en áreas de control de calidad de tuberías en Inglaterra, digitalización de la fisionomía del presidente Barak Obama, reconstrucción de dinosaurios de alta precisión, entre otros trabajos relacionados con el diseño 3D.

1.2.2 Escáner 3D en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

En la universidad previamente se han desarrollados dos proyectos relacionados con el proyecto. Uno basado en una mesa rotatoria que recolecta datos por visión estereoscópica con una webcam. El segundo utiliza de igual forma una mesa rotatoria pero usa el método de triangulación por láser para dar solución al problema. A continuación se puntualiza los proyectos realizados previamente en la Universidad:

- Diseño y construcción de un Escáner Digital 3D a partir de un sistema de visión estereoscópico para el Laboratorio CNC de la ESPE-L (HIDALGO, 2015).

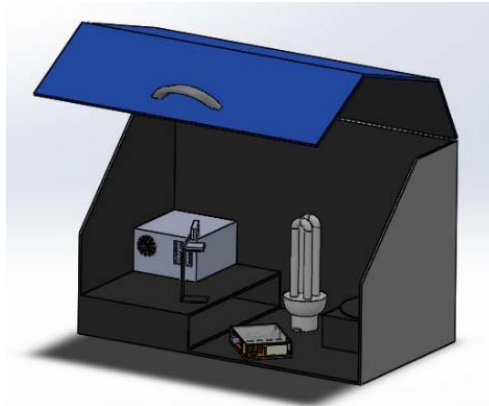


Fig. 4. Escáner 3D a partir de un sistema de visión estereoscópico.
Fuente: (HIDALGO, 2015)

El mencionado escáner 3D se observa en la Fig. 4. y consiste en una cabina artificialmente iluminada, el cual contiene en su interior una mesa rotatoria la cual gira al objeto para ser escaneado por medio de una webcam haciendo uso de un método estereoscópico para la generación de la nube de puntos. Fue desarrollado en Matlab y LabVIEW.

- Diseño e implementación de un sistema para digitalización de objetos en 3D mediante el uso de Matlab (Andrés Sosa, 2013).

El sistema de escaneo es diferente al anterior, el método utilizado fue el de triangulación con un puntero láser y una webcam. Utiliza una mesa rotatoria para escanear los 360° del objeto y un dispositivo de barrido que mueve el láser y la webcam conjuntamente. En la siguiente Fig. 5. se puede observar el resultado de su implementación.



Fig. 5. Sistema para digitalización de objetos en 3D.
Fuente: (Andrés Sosa, 2013)

La información recopilada de los dos anteriores proyectos desarrollados en la universidad se utilizará para el diseño del prototipo del presente proyecto, y también para tener las pautas donde se puede mejorar las características funcionales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo de Escáner 3D de bajo costo.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis bibliográfico referente al tema acerca de lo que es un Escáner 3D en medios académicos de información para poder tener los indicios necesarios para dar solución a la implementación de un prototipo con software propio.
- Generar diferentes alternativas de solución utilizando un proceso en desarrollo de productos Mecatrónicos; sustentar el problema planteado teniendo en cuenta las herramientas, elementos mecánicos, dispositivos electrónicos y software disponible para su posterior filtrado y selección de las más adecuadas para el diseño de un sistema de digitalización 3D.
- Construir un prototipo de escáner 3D de bajo costo que se adapte a la descripción del proyecto, aplicando los conocimientos en procesos de manufactura para implementar un producto estético, ergonómico y amigable para el usuario.
- Desarrollar una aplicación propia, utilizando software libre que integre el sistema adquisición de datos con el ordenador y procese la información de manera que entregue un modelo digital de un objeto.
- Evaluar el prototipo con diferentes objetos, comparar los resultados obtenidos, deducir conclusiones y realizar una propuesta de mejoras futuras.

1.4 Alcance

Revisados los escáneres existentes en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, se propone tomar las mejores características de ambos y combinarlas en la definición de un concepto innovador; las características rescatadas y añadidas se detallan a continuación:

Se diseñará e implementará una mesa de rotación más robusta que pueda soportar una carga mayor (hasta 6 *Kg*), por lo que se podrá escanear objetos de un tamaño considerablemente más grande.

Se tomará la idea de construir una cabina oscura con el fin de facilitar el proceso de visión artificial y minimizar el ruido proveniente del exterior.

Acoplar un dispositivo emisor láser lineal dará mejores resultados comparando con un puntero láser. El tiempo de escaneado se reducirá drásticamente y la precisión de adquisición de contorno no dependerá de otro factor como la exactitud de desplazamiento del puntero.

El desarrollo de la aplicación se hará completamente con software libre, cumpliendo así los propósitos del proyecto.

Se diseñará una interfaz humano maquina amigable con el usuario, la cual facilite el uso y control del prototipo de escáner 3D de bajo costo.

Se espera obtener errores dimensionales menores al 5% dentro de la nube de puntos adquirida del proceso de escaneo.

1.5. Estructura del documento

El diseño y construcción de un prototipo de escáner 3D de bajo costo se describirá en el despliegue de cinco capítulos.

El capítulo 2 (Estado del arte) revisa todo el marco conceptual que conceptualiza de forma general al prototipo, empezando por examinar las distintas alternativas que existe para dar solución a la problemática del proyecto. Luego se expone el

funcionamiento de un sistema de visión artificial para la generación de la nube de puntos del objeto escaneado. Por último se expone los métodos reconstructivos de la información escaneada para recrear un modelo tridimensional.

El capítulo 3 (Diseño del concepto) identifica las necesidades del prototipo y define las características técnicas que deberá tener. Las alternativas de diseño serán analizadas y filtradas bajo criterios ponderados para llegar a las mejores concesiones de diseño que se acoplen con los objetivos del proyecto.

El capítulo 4 (Construcción y pruebas) detalla el proceso de fabricación del prototipo de escáner 3D de bajo costo y finalmente expone las diferentes pruebas a las que estuvo sujeto el producto terminado.

El capítulo 5 (Conclusiones y Recomendaciones) sintetiza, compara y analiza los resultados obtenidos contrastados con los esperados. Además se genera una lista de recomendaciones para posibles investigaciones futuras.

Capítulo 2

Estado del arte

En el presente capítulo se revisará todo el marco conceptual que embarca a la conceptualización del escáner 3D de bajo costo, empezando por exponer la variedad de métodos que existen para dar solución a la problemática presente, posteriormente se examina el funcionamiento de un sistema de adquisición visual de datos que conjuntamente con un tratamiento de las imágenes por visión artificial se busca obtener la nube de puntos del objeto escaneado. Por último se expone los métodos reconstructivos de la información escaneada para recrear un modelo tridimensional.

2.1 Tipos de Escáner 3D

Un escáner 3D (Montero, 2016) es un dispositivo que analiza un objeto para obtener datos de su forma y poder usarlos para construir modelos digitales en tres dimensiones que posteriormente serán representados visualmente al usuario mediante un software de diseño CAD, el campo aplicativo es amplio y se describe en la Fig. 6.

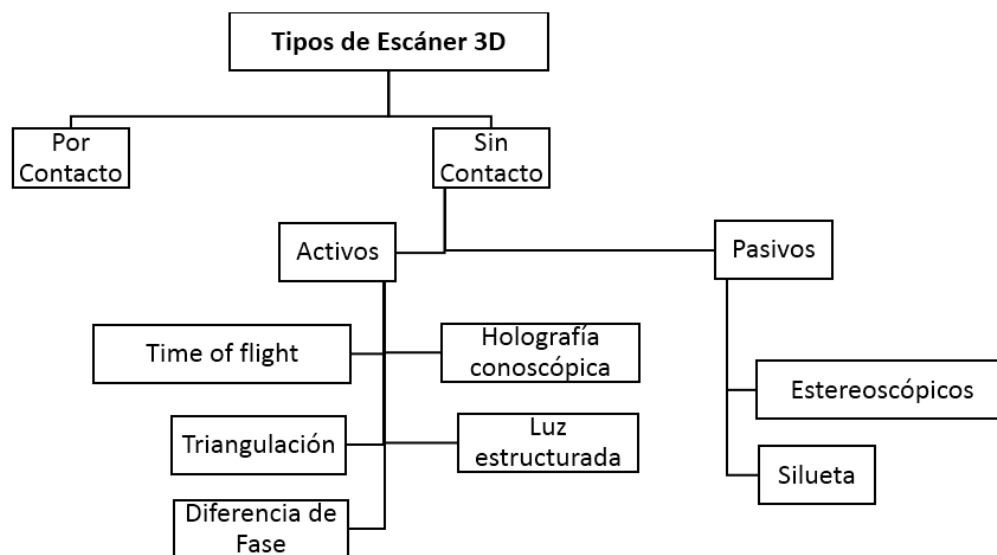


Fig. 6. Tipos de escáner 3D.

Hay dos tipos de escáneres 3D:

1) Por contacto: El objeto se analiza mediante el apoyo de un elemento palpador sobre la superficie del objeto. Se puede encontrar las Maquinas de medición por coordenadas CMM (Fig. 7 izquierda) y Brazos de medición (Fig. 7 derecha) como ejemplos de escáneres por contacto.



Fig. 7. Escáner 3D por contacto: Máquina de medición por coordenadas CMM (izquierda) y Brazo de medición (derecha).

Fuente: (MicroScribe, 2016)

Se usan en su mayoría en el control de calidad dimensional en procesos de manufactura, pueden conseguir precisiones $<0,01\text{mm}$ o $<0.002''$. Su principal desventaja es que requiere de contacto físico con el objeto, porque el proceso puede dañarlo, siendo un factor crítico al momento de escanear objetos delicados o valiosos. Otra desventaja es que su proceso de escaneo resulta lento frente a otros métodos, un proceso de escaneo por contacto puede operar hasta en unos pocos cientos de Hertz mientras que un sistema láser de escaneo trabaja en un rango de 10 a 1000 KHz (Montero, 2016).

2) Sin Contacto: Son escáneres que no requieren contacto con el objeto. Los hay de varios tipos, que se agrupan en dos grupos, activos y pasivos:

- Activos: Son aquellos que emiten algún tipo de señal (electromagnéticas, ondas de radio, rayos X o ultrasonidos) y su retorno al sistema es analizado para la construcción geométrica de un objeto. Existe los siguientes tipos:

Time of flight (Tiempo de vuelo): Como su nombre lo indica, el método utiliza el tiempo cronometrado de ida (emisor) y vuelta (receptor) de un pulso de luz a un objeto. Como la velocidad de la luz C es conocida y T es el tiempo de viaje completo, entonces la distancia es igual a $D = (C \times T) / 2$, la Fig. 8 lo ilustra a continuación. Su precisión depende de la exactitud con la que se pueda captar el tiempo (3,3 picosegundos corresponde aproximadamente a 1mm de viaje).

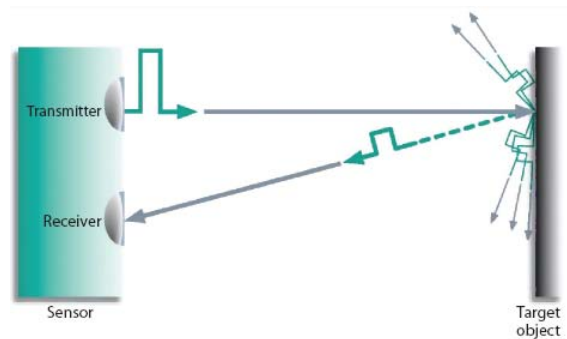


Fig. 8. Funcionamiento time of flight.
Fuente: (Fuchs, 2017)

Para realizar a cabo una medida completa se opta por dar movilidad al distanciómetro, o reflejando el haz mediante un sistema óptico. El método se usa comúnmente porque los pequeños elementos que lo componen pueden ser girados mucho más rápido (de 10.000 a 100.000 puntos cada segundo) y con una precisión mayor. Un ejemplo es el Leica C10 (Fig. 9) mostrado a continuación.

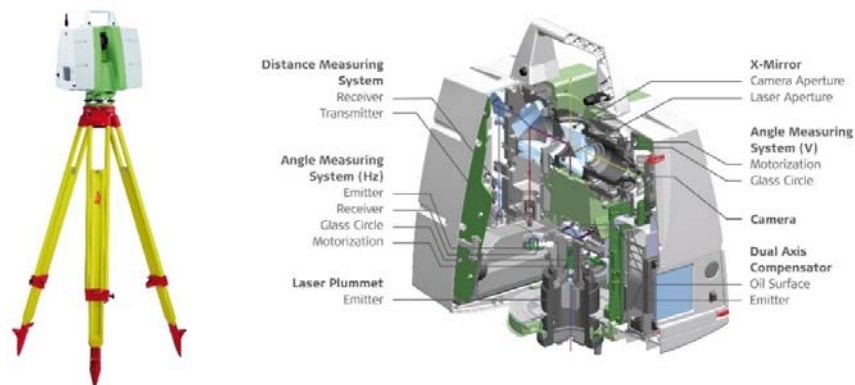


Fig. 9. Equipo Leica C10 externa e internamente.
Fuente: (Leica, 2017)

Triangulación: Se usa la luz láser para analizar un objeto. El haz de luz láser incide en el objeto y se usa un sensor CCD/PSD (cámara) para buscar la ubicación del punto del láser en la imagen, el punto aparecerá en distintos lugares dependiendo de la distancia con la que el láser golpee la superficie del objeto. La técnica se llama triangulación (Fig. 10) porque el punto de láser, la cámara y el emisor del láser forman un triángulo (Teutsch, 2007).

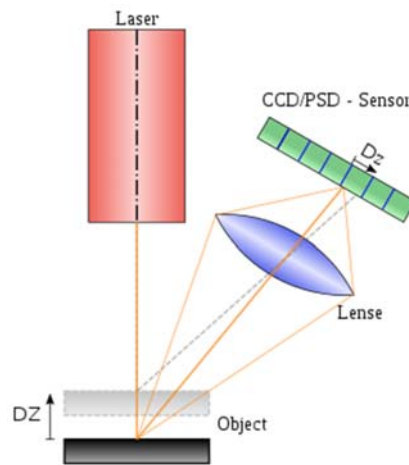


Fig. 10. Sistema de triangulación láser.
Fuente: (Wiora, 2006)

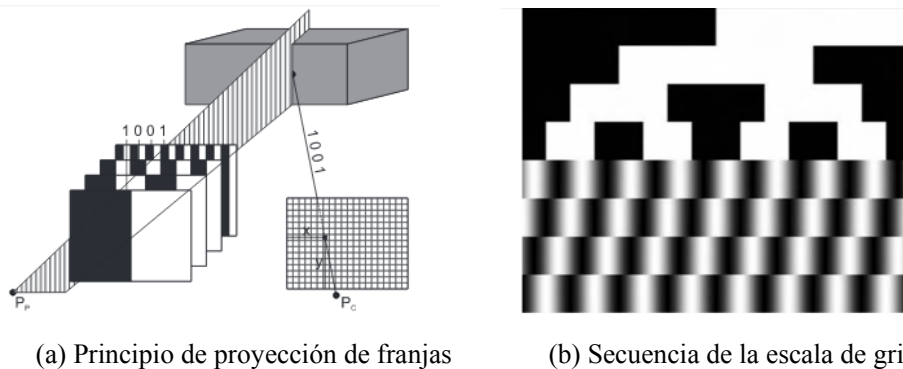
La longitud de un lado del triángulo definido por la cámara y el emisor del láser es conocida. El ángulo del vértice del emisor de láser se sabe también. El ángulo del vértice de la cámara (paralaje) puede ser determinado mirando la ubicación del punto del láser en la cámara. Los tres valores permiten determinar el resto de las dimensiones del triángulo y la posición de cada punto en el espacio.

En la mayoría de los casos en lugar de un punto de medida se proyecta una línea que barre la superficie del objeto para acelerar el proceso de adquisición. El escáner que se muestra a continuación en la Fig. 11 es un ejemplo del método.



Fig. 11. Escáner Minolta Vivid 910.
Fuente: (Minolta, s.f.)

Diferencia de fase: El cambio de fase (Teutsch, 2007) es una modificación del código de luz seccionada. La configuración del principio consiste en un proyector de video y una cámara digital como se indica en la siguiente Fig. 12.



(a) Principio de proyección de franjas

(b) Secuencia de la escala de gris

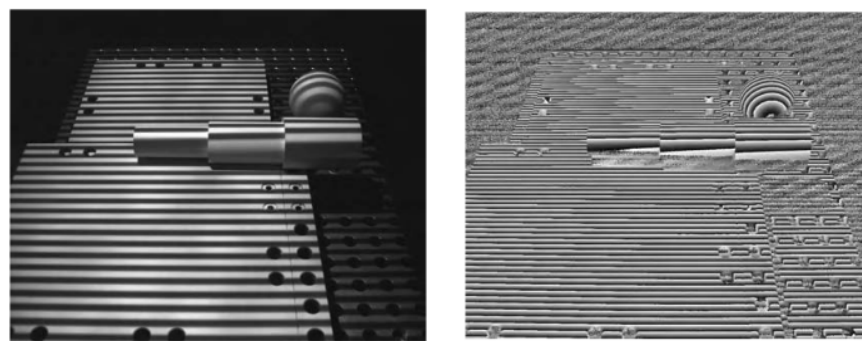
Fig. 12. Diferencia de Fase: PP y PC indican los centros del proyector y la cámara (a). La combinación de un patrón sinusoidal de fase desplazada y un código de color gris se muestran en (b).

Fuente: (Teutsch, 2007)

El contorno solo puede ser medido por los bordes negros/blancos que se generan por la proyección de una secuencia de rayas sinusoidales. El contraste de iluminación codificado puede ofrecer en cuanto a su variación de fase una alta resolución de escaneo. Dentro de cada paso el patrón sinusoidal está desplazado en ángulos conocidos (cambio de fase), por el cambio de fase en la función seno, los valores de gris cambian y en función de la topología de la superficie del objeto el patrón proyectado es deformado. La deformación nos

indica una medida para el cambio en la topología y está determinada por el cociente de las señales sinusoidal y la desplazada de la misma, que viene siendo la tangente.

Por ultimo del arco tangente se obtiene el ángulo de fase (Fig. 13), que describe el desplazamiento de fase en las porciones de la franja periodo sinusoidal. El principio permite la subdivisión de la señal en intensidad, amplitud y fase, representando la reconstrucción del objeto en cuestión.



(a) Proyección de las franjas

(b) Ángulos de fase

Fig. 13. Angulo de fase: Ilustración del patrón de franjas (a) y representación del desplazamiento de fase en alta resolución (b).

Fuente: (Teutsch, 2007)

Holografía conoscópica: Es una técnica interferométrica (Fig. 14) usa un haz reflejado en una superficie que atraviesa un cristal birrefringente (un cristal que posee dos índices de refracción, uno ordinario fijo y otro extraordinario) por lo que se obtiene dos rayos paralelos que al pasar por un lente cilíndrico genera una interferencia que es capturada por una cámara obteniendo un patrón de franjas, el proceso se indica en la siguiente imagen.

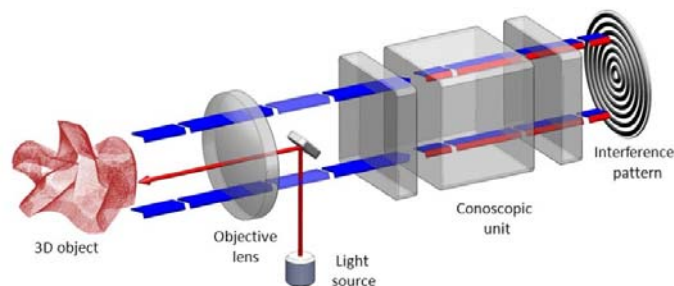


Fig. 14. Tecnología Holografía Conoscópica.

Fuente: (Optimet, s.f.)

La frecuencia de la interferencia determina la distancia al objeto. La ventaja es que permite utilizar luz no coherente, esto quiere decir que la fuente de iluminación no tiene porqué ser un láser, la única condición es que sea monocromática.

Luz estructurada: Se proyecta un patrón de luz unidimensional o de dos dimensiones sobre un objeto para analizar la deformación generada por la luz emitida sobre la geometría del objeto. El proyector puede ser un LCD o un láser y la cámara que situada cercanamente receptorá la forma de la línea que mediante un proceso semejante a la triangulación determinara los puntos en el espacio, en la siguiente Fig. 15 se ilustra de mejor manera el método (Song Zhan, 2006).

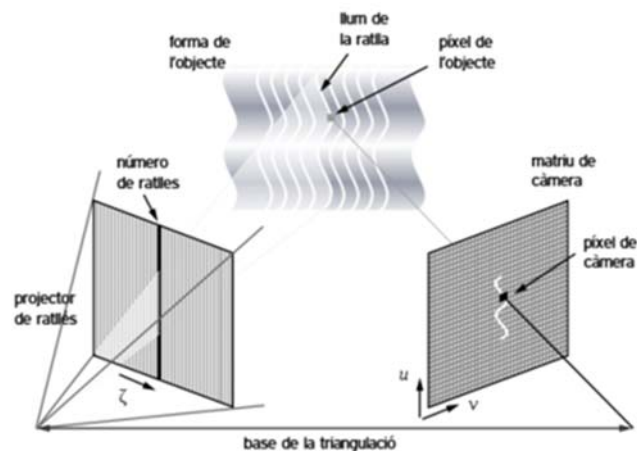


Fig. 15. Triangulación generada por Luz estructurada.
Fuente: (Emaralb, 2011)

El modelado unidimensional (Fig. 16) es el más usado ya que el bidimensional está sujeto a posibles errores dados por la ambigüedad de los patrones generados, en fin el método resulta ventajoso ya que se escanea múltiples puntos a la vez.

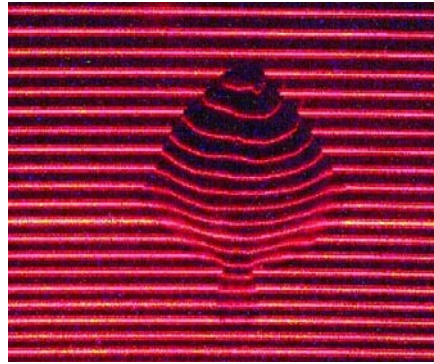


Fig. 16. Ejemplo de Luz estructurada unidimensional.
Fuente: (Pescanova, 1999)

- Pasivos: No emiten ninguna clase de radiación, en su lugar recepta la radiación reflejada por el ambiente y otros pueden utilizar radiación infrarroja. Los métodos pasivos por lo general resultan más baratos ya que no requieren hardware dedicado.

Estereoscópicos: El método se basa en la visión humana (Fig. 17), la fotogrametría significa el uso de cámaras. También son conocidos como *Stereo-/Multi-View-Vision*. La triangulación se calcula entre las cámaras y el punto de la superficie observada. Una vez más, hay métodos activos y pasivos. Los enfoques activos proyectan un patrón de luz adicional sobre la superficie para resolver posibles ambigüedades. Para la reconstrucción de la ubicación y la forma espacial de las fotografías deben ser conocidas las leyes de proyección geométrica de una fotografía. Las cámaras utilizadas producen imágenes que representan una proyección central con suficiente exactitud (Teutsch, 2007).

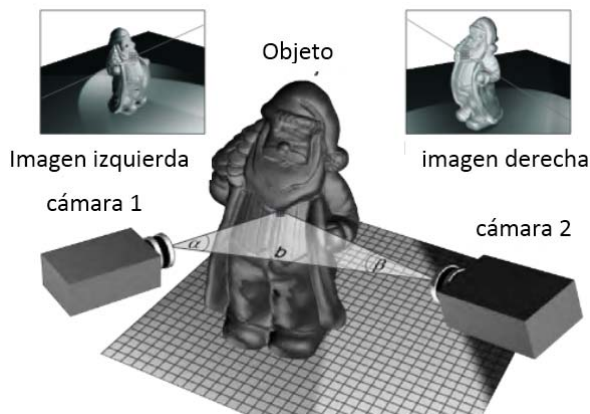


Fig. 17. Principio del método de fotogrametría.
Fuente: (Teutsch, 2007)

Por el contrario, los métodos pasivos no utilizan información adicional. El objeto a medir solamente es observado por las cámaras. Por triangulación, un punto de la superficie considerada debe ser identificado en ambas imágenes. Por lo general, se utilizan métodos estadísticos para detectar la posición de los píxeles. Los enfoques de bloque por coincidencia se aplican para detectar y comparar regiones de una imagen. La comparación se basa a menudo en la correlación cruzada. Cuando (15 x 15 píxeles) se han encontrado en dos bloques correspondientes, hay una probabilidad estadística de que las posiciones del píxel en el medio de los bloques se corresponden. En el siguiente paso, se calcula la intersección de los centros de los bloques y su proyección a los planos de imagen en las posiciones de píxel correspondiente, dando como resultado una triangulación como se observó en la Fig.17.

Con un enfoque jerárquico se conduce a una mayor velocidad de procesamiento y una robustez contra las falsas correlaciones. Para esto la imagen se evaluó en diferentes resoluciones, mientras que el algoritmo comienza a baja resolución y las correspondientes zonas de la imagen se identifican en áreas grandes. En los pasos siguientes, el proceso se repite con resoluciones cada vez más altas en las áreas detectadas previamente.

Siluetas: El método plantea un escáner 3D que utiliza una sucesión de imágenes tomadas alrededor de un objeto contra un fondo de alto contraste. Las imágenes se filtran y analizan para obtener de ellas los puntos espaciales donde exista un cambio en el valor de un píxel (de 0 negro a 1 blanco o viceversa) en una escala de grises de dos niveles, los puntos de cada imagen son almacenados para finalmente reconstruir la superficie de un objeto tridimensional. Con esta clase de técnicas las concavidades de un objeto (como el interior de un tazón) no son detectadas.

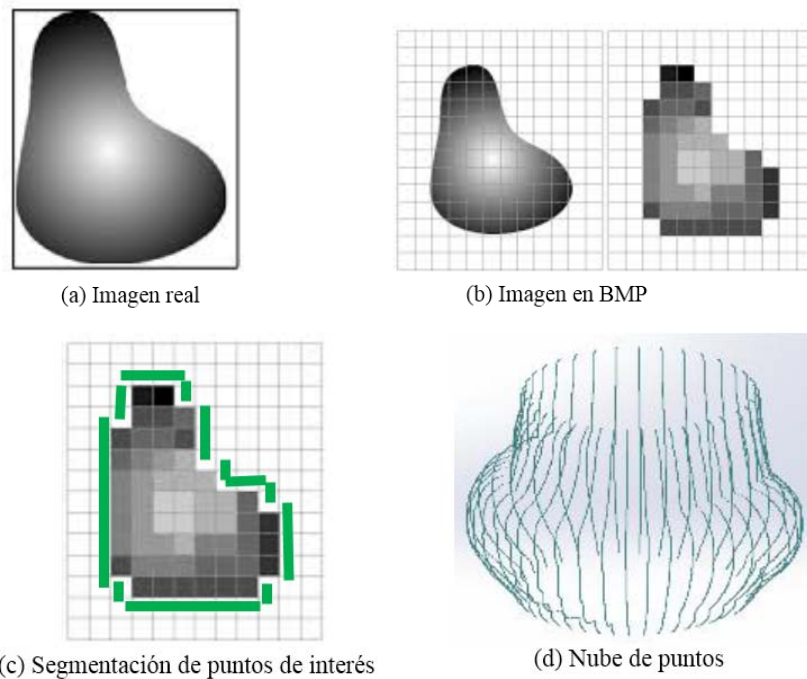


Fig. 18. Método de Silueta para escáner objeto.

Para comprender el proceso supongamos que una de las imágenes de todo el contorno de un objeto escaneado por este método da como resultado (a), la imagen sería digitalizada en un primer paso en un mapa de bits (b). Posteriormente se segmentarían los píxeles que tengan un cambio de tonalidad, como se indica en la imagen (c) para finalmente almacenar dichos puntos que formarían parte de la nube de puntos del objeto en cuestión (d).

2.2 Visión Artificial para Escáner 3D

La visión artificial es una disciplina que engloba todos los procesos y elementos que proporcionan la capacidad de ver a una máquina y se podría decir que: *la visión artificial o comprensión de imágenes describe la deducción automática de la estructura y propiedades de un mundo tridimensional, posiblemente dinámico, bien a partir de una o varias imágenes bidimensionales de ese mundo* (Nalwa, 1993).

La visión artificial se aplica ya en procesos industriales en los que la simple detección de presencia no resulta una fuente de información suficiente (EDMANS, 2006). Las estructuras y propiedades del mundo tridimensional que se quieren deducir

incluyen no sólo sus propiedades geométricas, sino también sus propiedades materiales. Ejemplos de propiedades geométricas son la forma, tamaño y localización de los objetos y de propiedades de los materiales son su color, iluminación, textura y composición.

La visión, tanto para un hombre como para un ordenador, consta principalmente de dos fases: captar una imagen e interpretarla con lo que busca extraer información de las imágenes y resolver aspectos más particulares según las necesidades que se deseen satisfacer.

Ya que para un ordenador en ocasiones se le vuelve sumamente complejo el análisis de una imagen dependiendo principalmente de su tamaño y tiempo de respuesta, existe una rama de la visión artificial que está dirigida precisamente a simplificar las imágenes, eliminar el ruido introducido por los sensores y facilitar, en definitiva, la tarea de interpretación.

Actualmente la visión computacional está en fase de crecimiento. Dada por la enorme complejidad, se van solucionando, por etapas, problemas cada vez más complicados. Actualmente, las líneas de estudio e investigación se dividen en múltiples campos, desde la visión tridimensional y visión con moción, a la segmentación y agrupamiento de múltiples objetos diferentes en entornos no controlados, etc.

2.2.1 Elementos constitutivos de un sistema de visión artificial

Los elementos de hardware mínimos necesarios para un Sistema de Visión Artificial (SVA) son los siguientes:

Sensor óptico. El sensor óptico normalmente usado es el CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) que según la necesidad del usuario determinará si la cámara aplicada deberá ser a color o monocromo. Otra característica común es la producción de 30 frames o imágenes completas por segundos aunque se puede encontrar en el mercado dispositivos de alta velocidad que manejan hasta 60 frames por segundo.

Lente óptico. Es un complemento de la cámara en un SVA que es adecuado en aplicaciones donde las condiciones ambientales y la distancia de medición son factores

que se debe solucionar. Por el contrario cuando es importante las características geométricas de los objetos es importante evitar la implementación de lentes que deformen la imagen (amplían o reducen el campo visual).

Tarjeta de adquisición de imagen. Su trabajo es la digitalización de la señal análoga o digital entregada por el sensor óptico y codificarlo para su posterior visualización y tratamiento.

Computador. Una vez digitalizada la imagen, debe ser almacenada en la memoria de un computador, es aquí donde la imagen puede ser manipulada mediante técnicas de visión artificial.

Monitor de vídeo. Permite visualizar las capturas o videos, como también los resultados del tratamiento de la información mencionada.

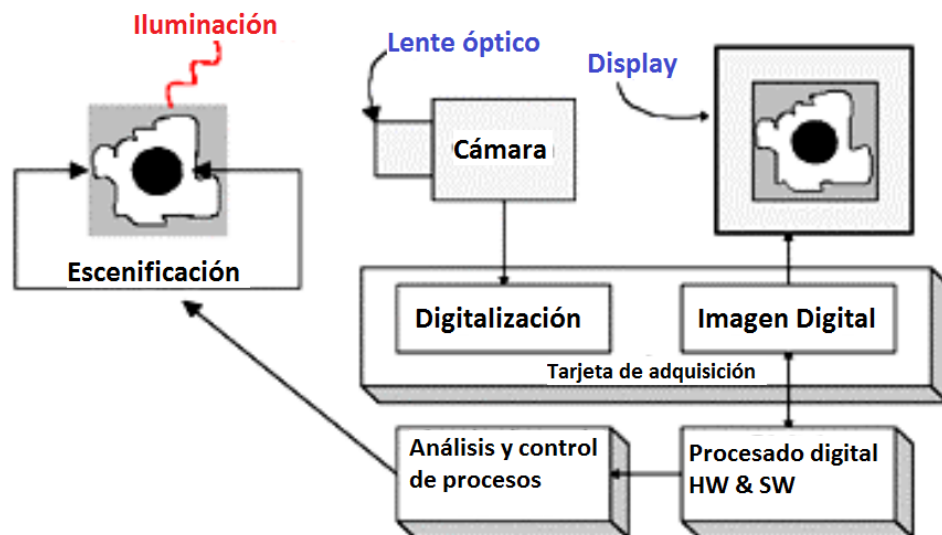


Fig. 19. Diagrama de bloques de un SVA.
Fuente: (EDMANS, 2006)

En la ilustración (Fig. 19) se pueden ver el objeto observado, la iluminación, la cámara y el proceso de digitalización que permite por un lado la visualización de la imagen digital y por otro lado el proceso de control en las operaciones que se desee ejecutar de acuerdo a la información extraída de la adquisición de

imagenes (EDMANS, 2006). Las acciones de control pueden ser: clasificar, desestimar, actuar sobre el objeto, dimensionar, entre otros.

2.2.2. Fundamentos

- Formación y representación de la imagen

Una imagen es una representación visual de un objeto iluminado por una fuente radiante. La naturaleza básica de una imagen, representada por $f(x,y)$, está caracterizada por dos componentes:

- Iluminación: La cantidad de luz incidente que procede de la fuente de la escena contemplada $i(x,y)$.
- Reflectancia: La cantidad de luz reflejada por los objetos de la escena $r(x,y)$.

El producto de dichas funciones dan como resultado $f(x,y)$.

En el proceso de formación de la imagen intervienen los siguientes elementos:

- El objeto
- La fuente radiante
- Sistema óptico
- Sensor
- Digitalizador

La imagen digital puede ser representada por una matriz f de dimensiones $M \times N$ de la forma:

$$f = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,M) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N,1) & f(N,2) & \cdots & f(N,M) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Donde cada elemento, pixel, da la intensidad de la imagen en ese punto.

- Efectos del Muestreo y la Cuantificación

Las dos principales causas que producen pérdida de información cuando se captura una imagen son la naturaleza discreta de los píxeles de la imagen y el rango limitado de valores de intensidad luminosa que es capaz de ofrecer el sistema de digitalización.

2.2.3. Efectos del muestreo

El efecto se dirige a reducir la resolución espacial de la imagen, en la siguiente ilustración (Fig. 20) se puede apreciar de mejor manera el efecto.



Fig. 20. Ejemplos de resolución de imagen.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

Puede observarse la pérdida de información introducida con el aumento del paso de muestreo, así como el ruido que se va introduciendo en forma de patrones rectangulares sobre la imagen.

2.2.4. Efecto de la cuantificación

El efecto de cuantificación (Fig. 21) viene dado por la imposibilidad de tener un rango infinito de valores de medida para la intensidad de brillo de los píxeles. La tecnología actual permite en algunos casos llegar hasta 10 bits de información, aunque lo general es 8 bits, o equivalentemente 256 niveles de gris para codificar este valor lumínico.

No existen criterios que permitan decidir el número óptimo de píxeles y de bits con los que muestrear una determinada imagen. La conclusión de obtener una imagen con la mayor resolución y calidad posible es la única forma viable para que sea óptima.



Fig. 21. Ejemplos de niveles de intensidad
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

2.2.5. Relaciones básicas entre píxeles

- Vecinos de un píxel

Un píxel p de coordenadas (x, y) tiene cuatro vecinos horizontales y verticales cuyas coordenadas son $(x + 1, y)$, $(x - 1, y)$, $(x, y + 1)$, $(x, y - 1)$.

El conjunto de píxeles, que recibe el nombre de 4-vecinos de p (Fig. 22 izquierda), se denota $N4(p)$. Cada píxel tiene una distancia unitaria de (x, y) , y algunos de los vecinos de p caen fuera de la imagen digital si (x, y) está en el borde de la imagen.

Los píxeles diagonales vecinos de p tienen coordenadas: $(x + 1, y + 1)$, $(x - 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$, $(x + 1, y - 1)$ y se notan $ND(p)$. Estos puntos, junto con los cuatro vecinos, se llaman 8 - vecinos de p y se notan $N8(p)$ (Fig. 22 derecha). Al igual que antes, algunos puntos de $ND(p)$ y $N8(p)$ caen fuera de la imagen si (x, y) está en el borde de la misma.

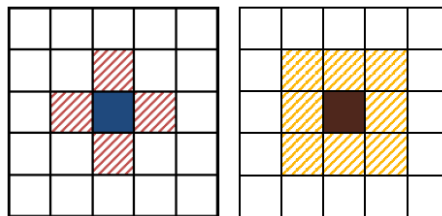


Fig. 22. Vecindad de 4 (izquierda) y Vecindad de 8 (derecha)
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Conectividad

La conectividad entre píxeles es un concepto importante usado para establecer las fronteras de objetos y las regiones componentes de una imagen. Para establecer si dos píxeles están conectados debe determinarse si son adyacentes en algún sentido (por ejemplo si son 4-vecinos y si sus niveles de gris cumplen algún criterio de similitud, por ejemplo ser iguales). Así o en una imagen binaria con valores 0 y 1 dos píxeles pueden ser 4-vecinos y no estar conectados salvo que tengan el mismo valor.

Sea V el conjunto de valores de niveles de gris que se usa para definir la conectividad; por ejemplo en las imágenes binarias, $V = \{1\}$ o un rango como $V = \{33, 34, \dots, 50\}$ en las imágenes de niveles de gris.

Se consideran dos tipos de conectividad:

4-conectividad: Dos píxeles p y q con valores en V se dicen 4-conectados si q pertenece a $N4(p)$.

8-conectividad: Dos píxeles p y q con valores en V se dicen 8-conectados si q pertenece a $N8(p)$.

Un ejemplo gráfico de conectividad se aprecia en la Fig. 23 en la cual se conectan los píxeles que guarden igual valor en el rango de la escala de grises.

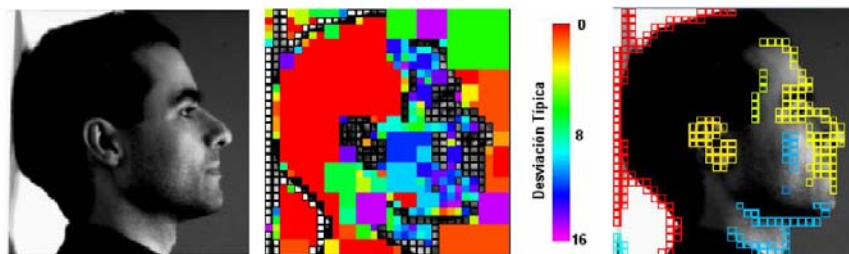


Fig. 23. Conectividad de los píxeles.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Medidas de distancia

Para los píxeles p , q y z con coordenadas (x, y) , (s, t) y (u, v) respectivamente, D es una función de distancia o métrica si cumple:

$$D(p, q) \geq 0 \text{ (} D(p, q) = 0 \text{ si y sólo si } p = q \text{)}$$

$$D(p, q) = D(q, p)$$

$$D(p, z) \leq D(p, q) + D(q, z)$$

La distancia euclídea entre p y q se define como:

$$D_e(p, q) = \sqrt{(x - s)^2 + (y - t)^2} \quad (2.2)$$

Para la medida de distancia, los píxeles a distancia menor o igual que un valor r de uno, dado (x, y) , definen un disco de radio r centrado en él.

2.2.6. Procesamiento de la Señal

Toda imagen que se adquiere por medios ópticos, electroópticos o electrónicos sufre en cierta medida los efectos de la degradación que se manifiestan en forma de ruido, pérdida de definición y de fidelidad de la imagen. La degradación viene provocada por el ruido de los sensores de captura, imprecisiones en el enfoque de la cámara, movimiento de la misma o perturbaciones aleatorias, entre las que tiene relevancia el efecto de la propagación de la radiación en el medio de transmisión. Los mecanismos que tratan de contrarrestar estos efectos se incluyen dentro de la etapa de pre-procesado, recibiendo el nombre de operaciones de restauración (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

Generalmente el pre-procesado pretende reparar en la imagen los desperfectos producidos o no eliminados por el hardware:

- Deformación
- Ruido introducido
- Poco o mucho contraste o brillo
- Falta de ecualización apropiada, etc.

Por supuesto, como los algoritmos necesitan gran cantidad de tiempo de procesado, es lógico que lo mejor es utilizar un conveniente hardware que los evite.

La parte de pre-procesado en un sistema de visión artificial es formada por dos tipos de operaciones, es decir, todo el tratamiento de corrección y de mejora de la imagen que facilite el procesado de las siguientes etapas.

Para una mejor comprensión, en todo el tema de preprocesado y posteriores se utilizará como ejemplo una imagen de dos dimensiones $M \times N$ y de 256 niveles de grises por punto (siendo 0 negro y 255 blanco).

A continuación se presenta un conjunto de operaciones básicas más utilizadas en el ámbito de visión artificial.

- Operadores de umbral: Cambia el valor del píxel en función de si cumple o no una condición como se observa en la Fig. 24.

Umbral binario:

$$q = \begin{cases} 0 & \text{si } p \leq p1 \\ 255 & \text{si } p > p1 \end{cases} \quad (2.3)$$

Siendo q el nuevo valor del píxel y p e valor actual.

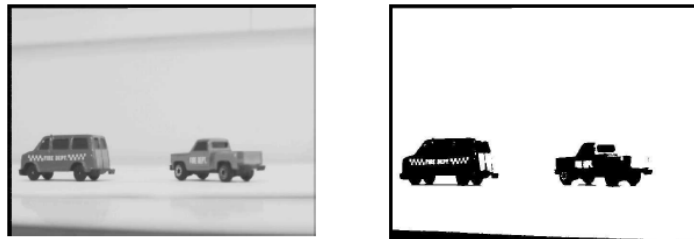


Fig. 24. Operación Umbral Binario.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Operador Umbral intervalo Binario: Cambia el valor del píxel de encontrarse dentro de un intervalo establecido (Fig. 25).

$$q = \begin{cases} 0 & \text{si } p \leq p1 \text{ o } p \geq p2 \\ 255 & \text{si } p1 < p < p2 \end{cases} \quad (2.4)$$

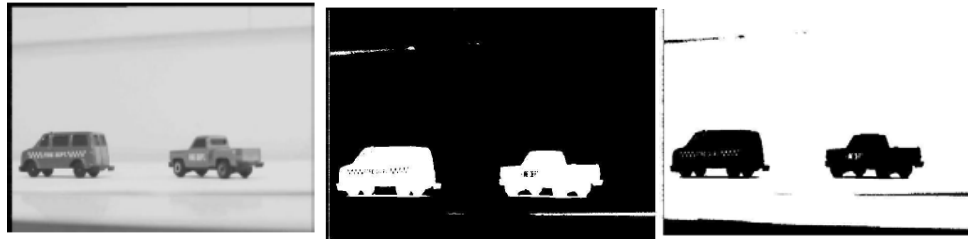


Fig. 25. Operación Umbral intervalo Binario.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Operador Umbral intervalo escala de grises: Cambia el valor del píxel de encontrarse dentro de un intervalo establecido de una escala de grises (Fig. 26).

$$q = \begin{cases} 0 & \text{si } p \leq p1 \text{ o } p \geq p2 \\ p & \text{si } p1 < p < p2 \end{cases} \quad (2.5)$$



Fig. 26. Operación Umbral intervalo escala de grises.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Operaciones aritmético-lógicas

Son las más usadas a cualquier nivel en un sistema de tratamiento de imágenes (Fig. 27), ya que son las que se utilizan para leer y dar valores a los píxeles de las imágenes. Las operaciones básicas son:

Conjunción. - Operación lógica AND entre los bits de dos imágenes. Se usa para borrar píxeles en una imagen.

Disyunción. - Operación lógica OR entre los bits de dos imágenes. Se usa para añadir píxeles a una imagen.

Negación. - Inversión de los bits que forman una imagen. Se usa para obtener el negativo de una imagen.

Suma. - Suma de los valores de los píxeles de dos imágenes.

Resta.- Resta de los valores de los píxeles de dos imágenes.

Multiplicación.- Multiplicación de los valores de los píxeles de una imagen por los de otra. Se usa para añadir textura a una imagen.

División.- División de los valores de los píxeles de una imagen entre los de otra.

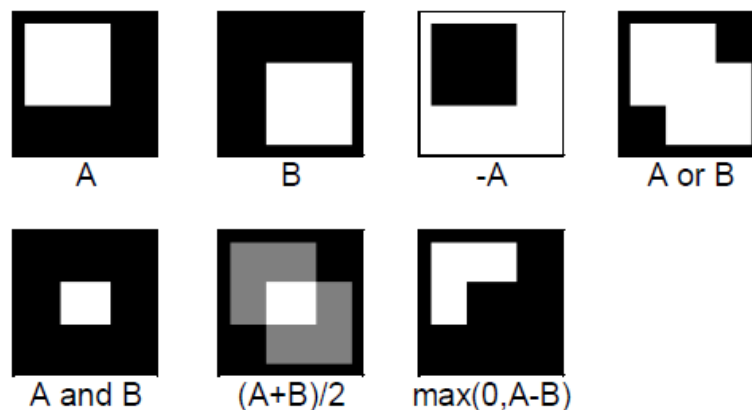


Fig. 27. Resultado de operaciones aritmético-lógicas
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Operaciones geométricas

Si se expresa los puntos en coordenadas homogéneas, todas las transformaciones se pueden tratar mediante multiplicación de matrices. Las operaciones geométricas más usuales son:

Traslación.- Movimiento de los píxeles de una imagen según un vector de movimiento. La siguiente transformación muestra el resultado de trasladar el punto (x, y) según el vector (dx, dy) , obteniendo el punto (x', y') .

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & dx \\ 0 & 1 & dy \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Escalado.- Cambio del tamaño de una imagen. La siguiente transformación muestra el resultado de escalar el punto (x, y) en un factor (sx, sy) , obteniendo el punto (x', y') .

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Sx & 0 & 0 \\ 0 & Sy & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Rotación.- Giro de los píxeles de una imagen en torno al origen de coordenadas. La siguiente transformación muestra el resultado de rotar el punto (x, y) un ángulo θ , obteniendo el punto (x', y') .

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

- Filtros de suavizado

El filtrado de suavizado espacial se basa en el promediado de los píxeles adyacentes al píxel que se evalúa, algunos ejemplos se puede observar en la Fig. 28 y Fig. 29. Quizás el filtro de suavizado más simple que se puede diseñar se corresponde con una matriz de 3x3 con todos los elementos a 1.

El resultado de la convolución de cada píxel se deberá dividir para 9 para asegurar el obtener valores dentro del rango de la paleta.

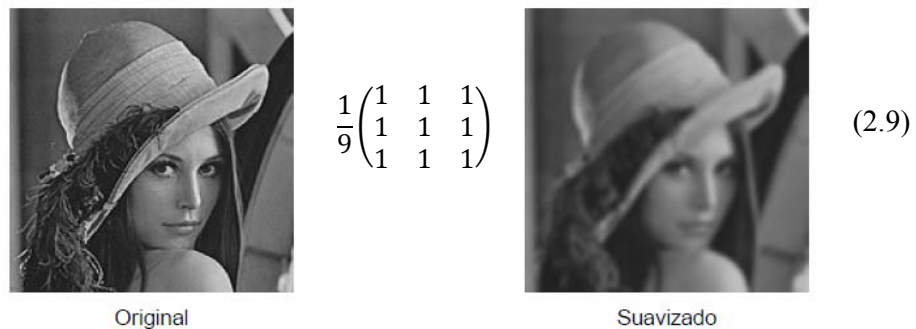


Fig. 28. Suavizado de una imagen.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

Otras matrices que se puede aplicar para suavizado de imágenes se describe en las Ec. 2.10 y Ec. 2.11.



Fig. 29. Otros ejemplos de suavizado con sus respectivos filtros.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Segmentación basada en color

Una imagen puede ser representada como la combinación de tres planos correspondientes a los colores de la escala RGB (Rojo, Verde y Azul) donde cada punto contiene la información de la intensidad de cada uno de los tres colores. Es importante entender que en general se trabaja en una escala de 1 byte, es decir de 0-255 en decimal, donde el color negro es la combinación nula de RGB y el color blanco la combinación completa de los 3 tonos. La segmentación de color demanda mayores requisitos computacionales que técnicas aplicadas en imágenes en niveles de gris (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003).

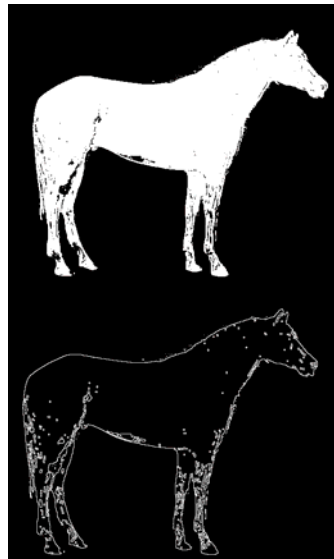
Normalmente se separa las capas de color para tratarlas por separado según pretenda la aplicación. En la Fig. 30 se observa claramente cómo funciona el método de segmentación expuesto, donde se determina el contorno generado por el cambio brusco de color.



Fig. 30. Ejemplo de segmentación basado en color.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

- Filtro de obtención de contornos

El cálculo de la derivada direccional de una función permite conocer cómo se producen los cambios en una dirección determinada. Tales cambios suelen corresponder a los contornos (Fig. 31) de los objetos presentes en las imágenes. Se tiene dos tipos de filtros de contornos simples (Ec. 2.12 y Ec. 2.13):



$$h_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$$h_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Fig. 31. Ejemplo de contorno Simple.
Fuente: (Serrano, Díaz, Calle, & Sánchez-Marín, 2003)

2.2.7. Influencia del ruido producido por el reflejo láser

Existen diversos tipos de ruido que pueden introducirse en la adquisición de datos durante el proceso de escaneado, algunos de ellos se observa en la Fig. 32 a continuación:

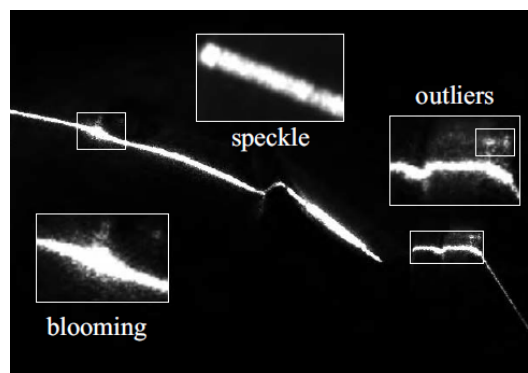


Fig. 32. Errores presente durante el proceso de escaneado.
Fuente: (Teutsch, 2007)

- Blooming: Sucede durante la interacción del láser con la superficie del objeto, si el haz de luz reflejado es muy intenso, los sensores CCD de la webcam no podrán soportar la energía generada y la distribuirán a los sensores vecinos.
- Speckle: Son salpicaduras del reflejo de haz del láser sobre superficies cercanas.
- Outliers: Puntos fuera del contorno, generados por el haz láser que ilumina superficies con características reflectivas.

2.3. Medición superficial por principio de triangulación

El método depende de que un triángulo se define por la longitud de un lado y los ángulos adyacentes, los lados restantes y el tercer ángulo derivan de estos valores conocidos. Sistemas de medición ópticos utilizan el principio para determinar las dimensiones espaciales y la geometría de un cuerpo.

Generalmente se utiliza una cámara como sensor y un emisor de haz de luz, los dos dispositivos junto con la proyección del haz de luz sobre la superficie forman un triángulo (Fig. 33). Dentro del triángulo se conoce la distancia entre sensor y emisor es la base b , los ángulos (α, β) se determinaran por el método de triangulación respecto al punto de medición.

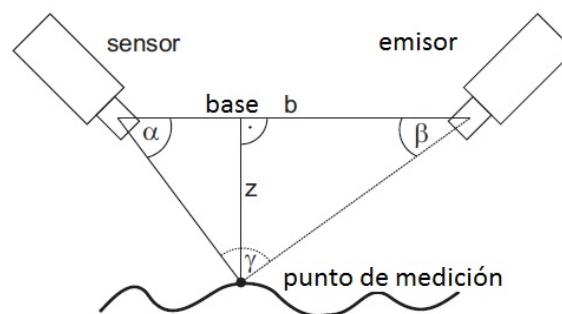


Fig. 33. Principio de triangulación.
Fuente: (Teutsch, 2007)

La altura del triángulo z (distancia de interés) se calcula finalmente con la formula Ec. 2.14, donde el ángulo $\gamma = \pi - \alpha - \beta$.

$$z = \frac{b \sin \alpha \sin \beta}{\sin \gamma} \quad (2.14)$$

Dentro del sistema de visión artificial el contorno generado por el emisor de luz sobre la superficie del objeto es capturado y brinda la información necesaria para un análisis de profundidad aplicando el principio de triangulación. Un algoritmo para la extracción del contorno describe en la Fig. 34.

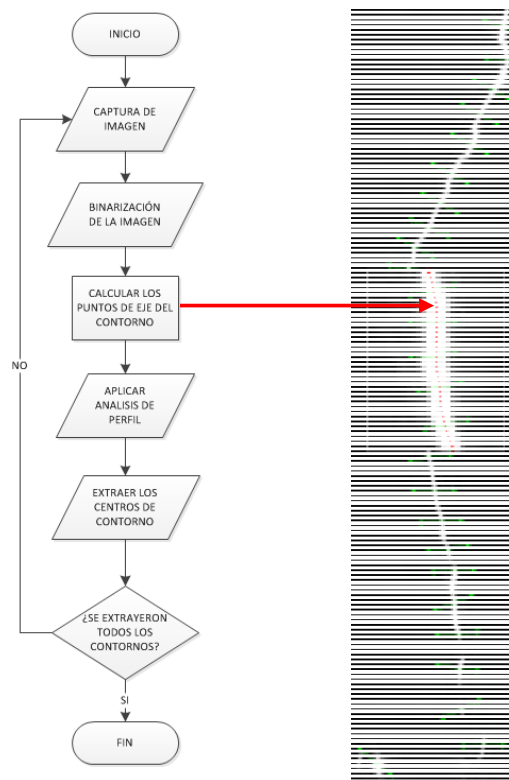


Fig. 34. Ejemplo de algoritmo extracción de contorno
Fuente: (Teutsch, 2007)

Cada captura que se realiza primeramente se convierte a una escala de grises para posteriormente por medio de una binarización obtener una imagen lo más limpia posible con los puntos que corresponden al contorno del objeto. El eje de contorno se obtiene calculando el punto medio del ancho de la línea segmentada para finalmente extraer las coordenadas en (x, y) de cada uno de sus puntos para un posterior análisis tridimensional.

2.4. Reconstrucción superficial de nube de puntos

Se expone los métodos necesarios para realizar la reconstrucción superficial de un determinado objeto a partir de la nube de puntos adquirida por un proceso de escaneado tridimensional.

2.4.1. Vectores normales para conjunto de puntos

Como se observa en la Fig.35 un paso fundamental para la reconstrucción superficial procedente de una nube de puntos es el cálculo de los vectores normales de las caras formadas por grupos de puntos adyacentes.

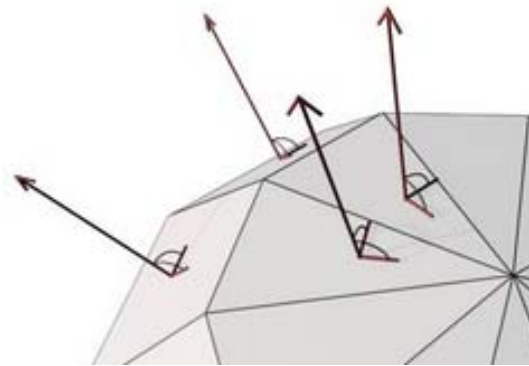


Fig. 35. Ejemplo de vectores normales a sus caras.
Fuente: (Autodesk, 2016)

Existen numerosas aplicaciones y algoritmos destinados para el cálculo de los vectores normales (Clouds, s.f.), las cuales no se detallan debido a que no van acorde con el tema de estudio.

2.4.2 Proyección de puntos por mínimos cuadrados

Antes de realizar la reconstrucción superficial de una nube de puntos con sus vértices normalizados, es necesario suavizar la dispersión de los puntos mediante la aplicación de un algoritmo de mínimos cuadrados (Guennebaud & Gross, 2007), el cual mejorará significativamente la calidad de reconstrucción superficial. Existe una herramienta dedicada para este fin conocida como MLS (Moving Least Squares) projection. Un ejemplo del procedimiento se puede observar en la siguiente Fig. 36.

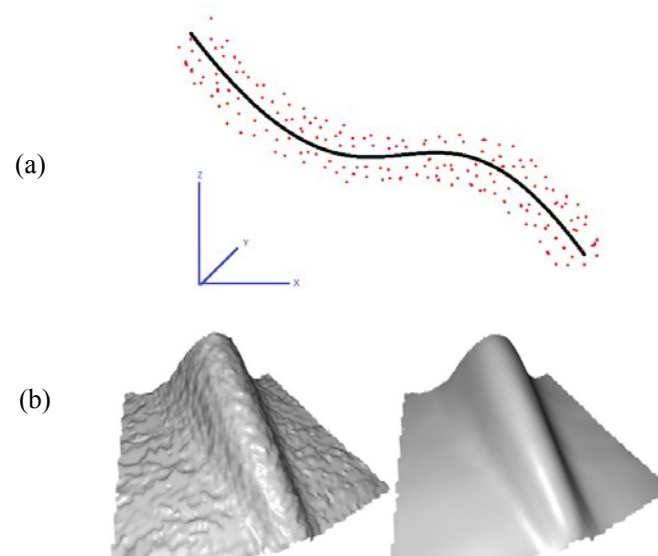


Fig. 36. MLS: (a) Suavizado por mínimos cuadrados y (b) comparación aplicativa de MLS.
Fuente: (Ridel, Guennebaud, Reuter, & Granier, 2015)

2.4.3 Mallado superficial

En campos como construcción y arquitectura la nube de puntos puede ser utilizada directamente para la toma de medidas. En otros como la ingeniería inversa, control de calidad, metrología y diseño de productos es necesario realizar una reconstrucción del objeto escaneado ya sea por un modelado de malla de polígonos o modelado de superficies.

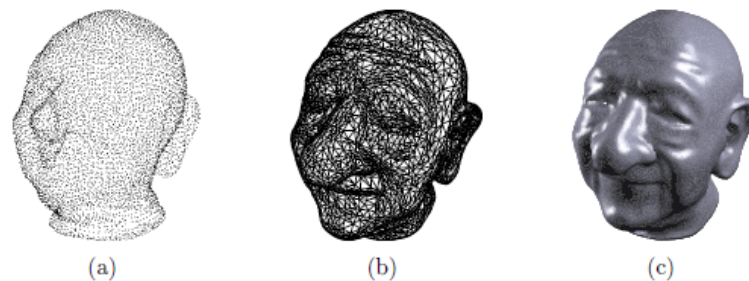


Fig. 37. Procesamiento de la nube de puntos: Puntos capturados de la superficie (a), representación poligonal (b) y modelo de superficie sombreada.

Fuente: (Teutsch, 2007)

Siempre empezará por un mallado de polígonos de los puntos adyacentes de la nube que generalmente por simplicidad se trata de un mallado triangular, que

representa en las tres dimensiones triángulos planos y convexos. Pero el proceso se torna pesado computacionalmente hablando por la cantidad de polígonos generados, una de las formas de alivianar el mallado consiste en encontrar relaciones de planaridad entre los polígonos para agruparlos. Al proceso se lo conoce como triangulación (Fig 37. b) y el proceso de generación se conoce como mallado.

Existe 3 conceptos generales de mallado:

2.4.3.1. Marching Cubes

El enfoque utiliza un conjunto de polígonos para aproximarse a la superficie en su totalidad basada en una subdivisión celular como visualiza en la Fig. 38. La técnica es particularmente adecuada para la triangulación de iso-superficies. Se procesa la nube de puntos mediante el método matemático de aproximación de superficies, que también requiere de la nube para representar una superficie lisa continua. Un algoritmo más complejo utilizado para puntos desorganizados consta de 3 fases de procesos y lleva por nombre *Hoppe*, pero necesita de una gran cantidad de tiempo de cálculo.

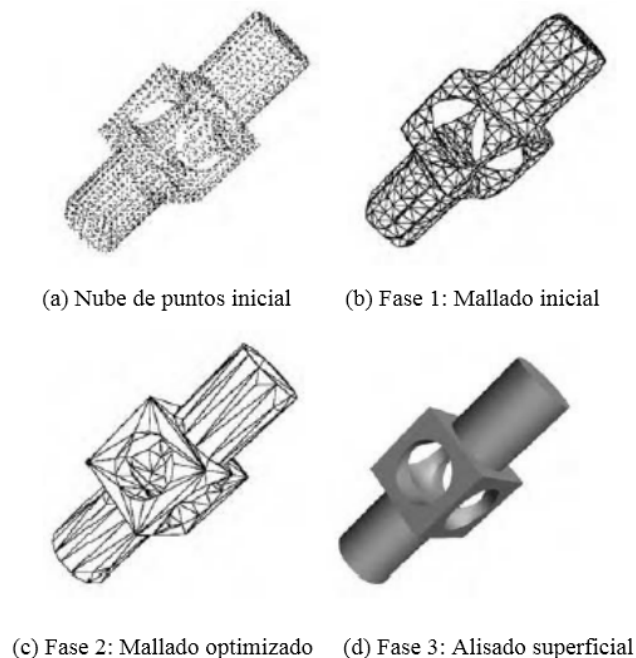


Fig. 38. Técnica de triangulación por cubos de marcha.
Fuente: (Teutsch, 2007)

2.4.3.2. Triangulación de Delaunay

El método se utiliza sobre todo, porque tiene garantías matemáticas. Calcula la envolvente convexa de un punto arbitrario de la nube, mientras que el ángulo mínimo de los polígonos se maximiza. Por otra parte, su diagrama doble de Voronoi (Fig. 39) representa los barrios. Algoritmos de mallado utilizan esta técnica para reconstruir trozos de superficies cóncavas. En muchos casos, las mallas de triángulos resultantes son refinadas, interpoladas o sustituidas por Bézier y por parches B-spline.

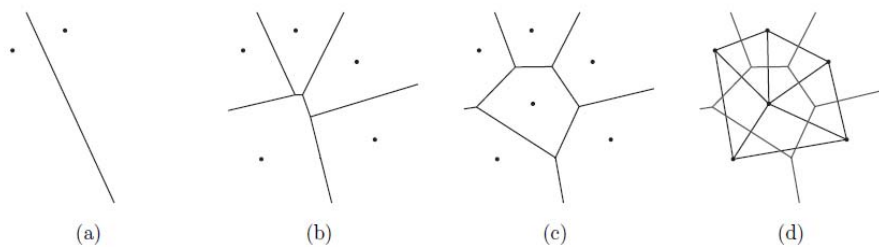


Fig. 39. Generación de las regiones de Voronoi (a-c) y su resultado en triangulación de Delaunay (d).

Fuente: (Teutsch, 2007)

2.4.3.3. Superficies Paramétricas

Las representaciones (Fig. 40) aproximan las funciones de superficie polinómica con un cierto grado matemático para garantizar la continuidad y suavidad. Mediante la aplicación de pesos, los bordes se pueden modelar también. El carácter descriptivo de análisis permite el cálculo de la malla poligonal (quad) con densidad variable. Teniendo en cuenta los grandes conjuntos de puntos de escáneres 3D, métodos que producen los parches de redes como el B-spline están dominando en la implementación de dispositivos 3D.

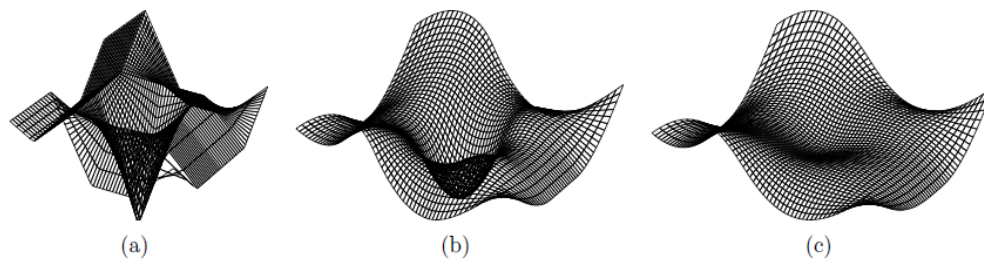


Fig. 40. Representación superficial por B-Spline de orden diferente: mallado lineal (a), cuadrático (b) y superficie cúbica (c).

Fuente: (Teutsch, 2007)

De hecho, la visualización y evaluación de la geometría son los objetivos principales y que son comunes para todos los enfoques. Se hace especial hincapié en una aproximación precisa (modelado de borde) y una representación estética de la geometría de las nubes de puntos subyacentes.

2.5. Aplicaciones objetivo

El campo aplicativo de un escáner 3D es amplio, revisaremos únicamente las áreas donde se focalizaría el actual proyecto. Las aplicaciones que podría abarcar el prototipo se describen a continuación:

- Ingeniería Inversa: El propósito de la ingeniería inversa es la de obtener información de algún elemento o un producto para copiarlo, analizarlo, escalarlo o mejorarlo.

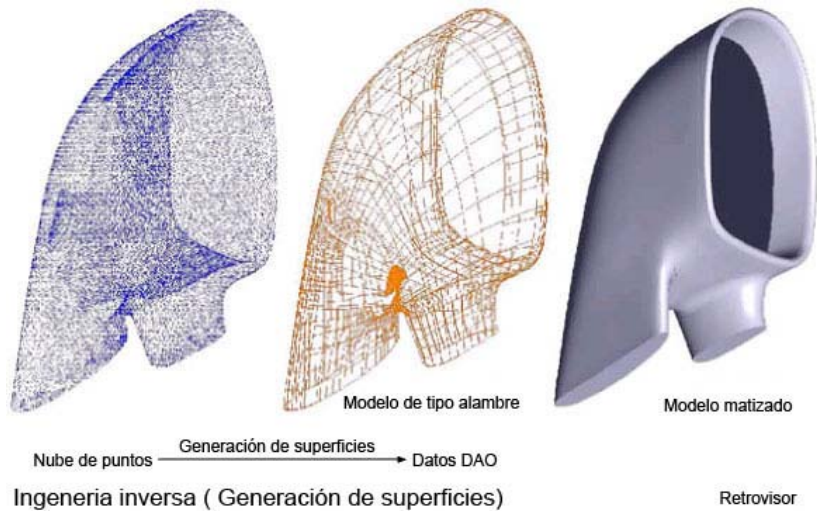


Fig. 41. Reconstrucción 3D para ingeniería inversa.
Fuente: (ALUDENS, 2016)

Como se puede ver en la Fig. 41 el Escáner 3D es un dispositivo muy útil en lo que respecta la ingeniería inversa, adquiriendo rápidamente la nube de puntos para luego reconstruirlo y así finalmente tener un modelo digital de la pieza escaneada.

- Didacta-Educativa: Hacer conocer el funcionamiento de un escáner 3D es el principal objetivo del producto a desarrollarse, desde cómo nace su necesidad hasta una demostración real de su funcionamiento. Las nuevas generaciones de jóvenes investigadores se verán motivados por sumergirse en el mundo de la digitalización 3D.



Fig. 42. Propósito didáctico-educacional del escáner 3D.

Fuente: (3DPRINT, 2014)

2.6. Resumen

- Un escáner 3D tiene variados métodos de ser implementados y estos se dividen de la siguiente manera:
- La visión artificial para escáner 3D es la comprensión de la estructura y propiedades del mundo tridimensional a partir de imágenes planas bidimensionales. En el proceso de formación de la imagen intervienen los siguientes elementos: El objeto, la fuente radiante, sistema óptico, sensor y digitalizador.
- Los elementos básicos que constituye un sistema de visión artificial para escáner 3D son los siguientes: Sensor óptico, lente óptico, tarjeta de adquisición, computador y monitor de video.
- La imagen puede ser procesada debido a que puede presentar defectos producidos o no eliminados por el hardware como deformación, ruido, contraste y brillo, ecualización inapropiada, etc. El proceso se lleva a cabo por dos operaciones, el tratamiento de corrección y la mejora de la imagen, algunas de las más usadas para la reconstrucción 3D son las siguientes: Operadores de umbral, operaciones aritmético-lógicas, operaciones geométricas, filtro de suavizado, segmentación por color y filtro de contorno.
- Para la obtención de la nube de puntos se utilizará técnicas de segmentación que consisten en la subdivisión de la imagen en regiones homogéneas con respecto a una o más características, que en relación del escaneo 3D se trata de la segmentación de curvas de contorno.
- Finalmente el proceso de todo escáner 3D termina con la reconstrucción y modelado de la nube de puntos obtenida, el proceso consiste en primer lugar en realizar un mallado de polígonos de todos los puntos adyacentes para posteriormente si es necesario modelar su superficie. Algunos de estos procesos son: Cubos de marcha, triangulación de Delaunay y superficies paramétricas

Capítulo 3

Diseño

El diseño de un sistema de escaneado 3D es una tarea compleja que requiere de diversas habilidades en distintas disciplinas de la ingeniería. Se guiará al capítulo en el diseño y desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2013). Se inicia por el desarrollo del concepto identificando las necesidades del prototipo que serán traducidas a especificaciones del mismo. Mediante criterios ponderados se filtrarán las alternativas de cada módulo hasta llegar al concepto que mejor se adapte a los objetivos del proyecto.

Finalmente el diseño de detalle se enfocará iterativamente e interactivamente con las pruebas futuras que se realicen.

3.1 Desarrollo del concepto


Hay que identificar en primer lugar las necesidades del usuario y lo que espera del producto. Una vez aclarado se detallará las especificaciones técnicas guardando su relación con las consideraciones del proyecto, para finalmente desarrollar una selección adecuada de un concepto.

3.1.1 Necesidades del Usuario

Las necesidades son características que el usuario espera del producto, las previstas para el prototipo se observa en la Tabla 1.

Tabla 1
Requerimientos del usuario

N°	REQUERIMIENTO
1	Costo mínimo
2	Tamaño acorde para objetos de dimensiones
3	Que sea preciso y escanee los 360 del objeto
4	Complejidad del diseño mínima
5	Buena calidad de reconstrucción
6	Fácil implementación
7	Facilidad de uso

Continua 

- 8 Fácil Mantenimiento
- 9 Que sea transportable
- 10 Apariencia

3.1.2 Especificaciones técnicas

Se requiere transformar las necesidades en especificaciones mediante lenguaje técnico, las cuales serán una sinergia entre los requisitos del usuario y los objetivos del producto. El desarrollo de las especificaciones debe hacerse de tal manera que estas sean factibles y permitan la modularidad del prototipo. A continuación la Tabla 2 detalla las especificaciones que definen al prototipo.

Tabla 2
Especificaciones técnicas

N°	REQUERIMIENTO	Magnitud	Unidad
1	Angulo de paso del motor	1,8 – 7,2	°
2	Capacidad de carga del motor	6	kg
3	Diámetro de la base	250	mm
4	Volumen de trabajo	16 × 16 × 18	cm
5	Calidad de la imagen	8	Mpx
6	Modelamiento matemático	–	–
7	Amigable con el usuario	–	–
8	Acabados	–	–

Se aplica un despliegue de la función de calidad (QFD) para gestionar las necesidades y las especificaciones del prototipo (Akao, 1993). La matriz relaciona cada necesidad del usuario con una o varias especificaciones y viceversa, de modo de ponderar y dar mayor relevancia a las necesidades importantes que a su vez revelan las especificaciones trascendentes. El proceso se realiza para asegurar la calidad del diseño final del prototipo escáner 3D de bajo costo.

Un punto clave en la aplicación del QFD es que reduce significativamente los tiempos y costos involucrados en el desarrollo del concepto. A continuación en la Fig. 43 se muestra la matriz QFD para el Escáner 3D. La cual expone de forma clara, sistemática y ordenada todo lo expuesto con anterioridad. Buscando así la satisfacción del usuario con el producto.

Matriz QFD Escáner 3D

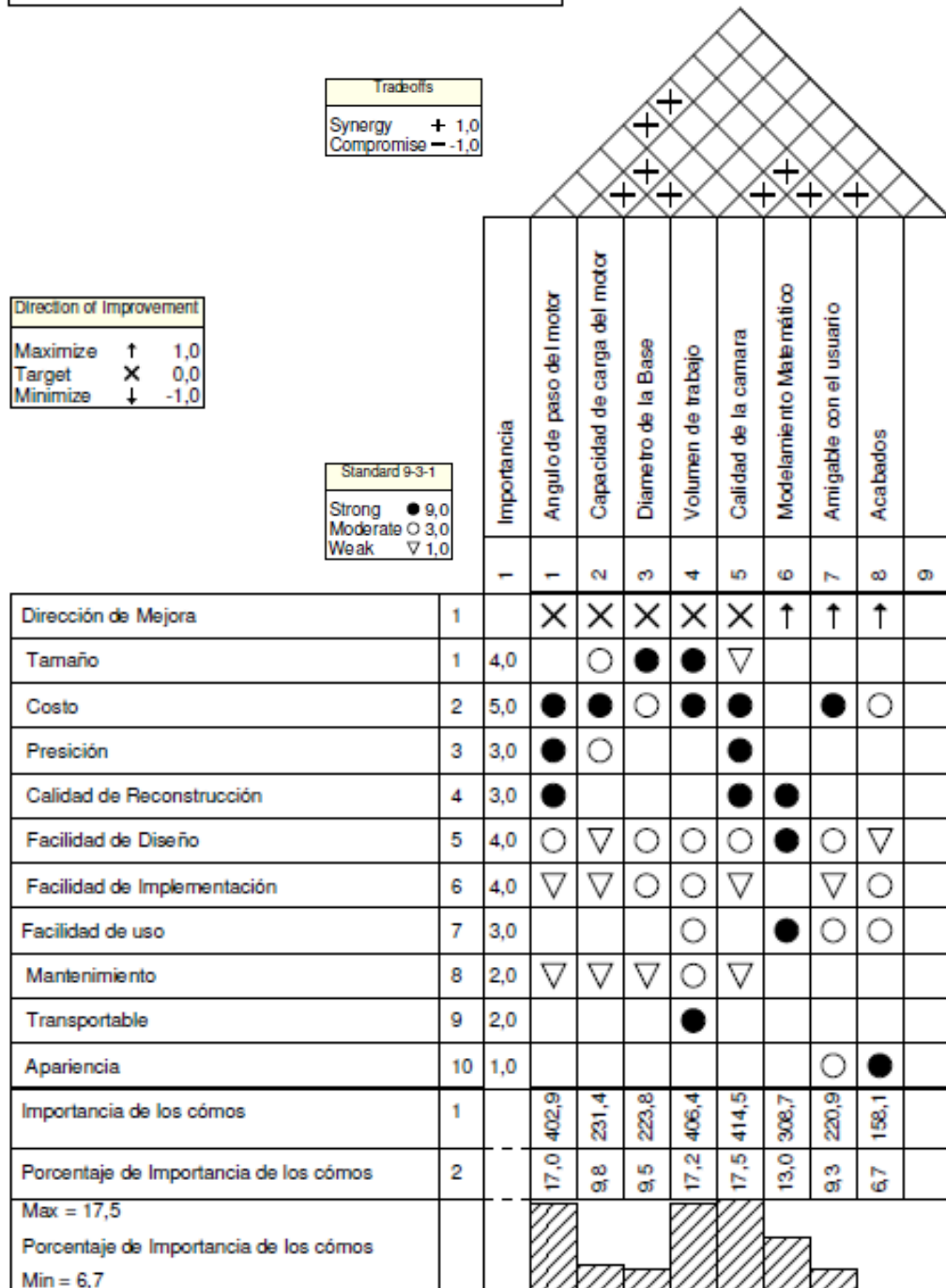


Fig. 43. Matriz QFD Prototipo escáner 3D de bajo costo.

Los resultados ponderados de la relevancia de cada especificación se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3
Resultados ponderados QFD

N°	REQUERIMIENTO	ponderación
1	Angulo de paso del motor	17,0
2	Capacidad de carga del motor	9,8
3	Diámetro de la base	9,5
4	Volumen de trabajo	17,2
5	Calidad de la imagen	17,5
6	Modelamiento matemático	13,0
7	Amigable con el usuario	9,3
8	Acabados	6,7

3.2 Bloques funcionales

Una vez definidas las especificaciones y analizadas en la matriz QFD debemos agrupar en módulos funcionales aquellas que mantengan una relación sistemática. Esto nos facilita el desarrollo del diseño al trabajar en subsistemas pequeños y focalizados.

La Tabla 4 muestra los módulos y subsistemas que comprende el prototipo de escáner 3D de bajo costo.

Tabla 4
Módulos funcionales

N°	MÓDULO	SUBSISTEMA	FUNCIÓN	N° REQUERIMIENTO
1	Mesa de rotación	Rotación	Generación movimiento rotacional	1,2
		Estructura mesa	Soporte del Objeto	3,4
2	Cabina	N/A	Acoplamiento de módulos	4,7,8
3	Escáner	Adquisición de datos	Visión Artificial-obtener forma del objeto	5
		Procesamiento de la información	Generación de la nube de puntos	6

Continua 

4	Potencia y control	N/A	Alimentación, control motor a pasos, Interfaz de la cabina y seguridad	1, 2, 7
5	Interfaz	N/A	Comunicación humano-maquina	7, 8

Al tratarse de un sistema mecatrónico, el diseño va contar con 3 partes fundamentales de la ingeniería, que son:

- Diseño mecánico
- Diseño electrónico
- Sistema de control

3.3 Módulo 1. Mesa de rotación

3.3.1 Subsistema 1. Rotación

El subsistema de rotación es el encargado de dar al plato y al objeto la posibilidad de girar sobre su propio eje. Es importante la precisión y que pueda realizar una rotación de 360°.

3.3.1.1. Alternativas de diseño

Para este subsistema se cuanta con 3 alterativas de diseño:

- Motor DC
- Motor a pasos
- Servomotor

Motor DC

Es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, dando movimiento rotacional debido a la influencia de un campo magnético entre rotor y estator.

Ventajas

- Alto par de torsión
- Alta velocidad

- Tamaño pequeño
- Baja complejidad de control

Desventajas

- Alto costo
- Requiere de encoder para control de posicionamiento en lazo cerrado

Motor a pasos

Es un dispositivo electromecánico que convierte una cadena o tren de pulso en pasos angulares discretos.

Ventajas

- Velocidad depende del tren de pulsos
- Tamaño pequeño
- Baja complejidad de control en lazo abierto
- Precisión de posicionamiento
- Repetitividad de posicionamiento

Desventajas

- Alto costo
- Bajo par de torsión
- Difícil de controlar a altas velocidades

Servomotor

Es similar al motor DC, pero adicionalmente tiene integrado una caja reductora y un circuito de control que le permiten girar en un rango de operación de manera precisa.

Ventajas

- Alto par de torsión
- Velocidad controlable
- Tamaño pequeño

- Baja complejidad de control en lazo abierto
- Precisión de posicionamiento

Desventajas

- Alto costo
- Límite de rango de posicionamiento a menos que se modifique

3.3.1.2. Evaluación de alternativas y selección

Luego de haber analizado las alternativas, la implementación de un motor a pasos parece ser la más apropiada, por los siguientes motivos:

- Presta la precisión necesaria con un control lazo abierto, esto quiere decir que no es necesario la implementación de algún elemento de instrumentación para el posicionamiento.
- El prototipo no requiere una alta velocidad de rotación o un alto par de torsión.
- Buena repetitividad, cada paso no depende del anterior, es decir el error de posicionamiento no se acumula.

3.3.1.3 Dimensionamiento del motor a pasos

Para la aplicación deseada, se requiere calcular el torque necesario que deberá aplicar el motor al conjunto móvil (pieza deseada para escanear, plato giratorio, acople eje y unión flexible). Para ello se empezó por estimar un objeto de prueba cilíndrico circular con medidas y peso sobredimensionados para asegurar el funcionamiento del motor. El objeto tiene un diámetro $\varnothing = 300 \text{ mm}$ y una altura $h = 150 \text{ mm}$. Con un peso estimado para madera de 6 Kg.

Para dar solución a la problemática planteada se recurrió al análisis dinámico de momentos de inercia en cuerpos rígidos (Bedford & Fowler, 1995). Teniendo el siguiente análisis.

$$\text{Momento de Inercia: } I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{4} \qquad \text{densidad de área: } \frac{m}{A} = \frac{m}{\pi r^2}$$

$$\text{Momento de Inercia de masa: } I_z = I_x \frac{m}{A} = \frac{\pi r^4}{4} \times \frac{m}{\pi r^2} \quad (3.1)$$

$$J_0 = I_x + I_y = I_z$$

$$I_z = 2 \times \frac{mr^2}{4} = \frac{mr^2}{2} \quad (3.2)$$

- El momento de inercia de masa del objeto sería:

$$I_{z \text{ objeto}} = \frac{6000(150)^2}{2}$$

$$I_{z \text{ objeto}} = 67500000 \text{ gr mm}^2 = 0,0675 \text{ Kg m}^2$$

Mediante el uso de software se verifico el Momento de inercia del objeto, cuyo resultado se es el mismo que el calculado.

- Momento de inercia del plato rotatorio

Por la geometría del plato (Fig. 44) nos ayudaremos de la herramienta CAE (Ingeniería Asistida por computadora) para obtener este dato, con una masa aproximada $m = 500 \text{ gr}$.

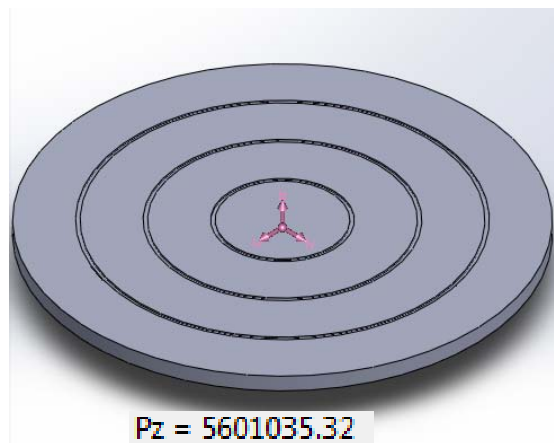


Fig. 44. Momento de inercia del plato rotatorio

$$I_{z \text{ plato}} = 5601035,32 \text{ gr mm}^2 = 0,0056 \text{ Kg m}^2$$

Los momentos de inercia de masa del eje y matrimonio son prácticamente despreciables.

El siguiente paso es obtener las aceleraciones angulares para los dos tipos de pasos del motor que tendrá la aplicación con un tiempo de paso de $t = 0,5 \text{ seg}$.

$$\text{Para: } \theta = 3,6^\circ = \frac{\pi}{100} \text{ rad}$$

$$\theta = \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (3.3)$$

$$\frac{\pi}{100} = \frac{1}{2} \alpha_1 (0,5)^2$$

$$\alpha_1 = 0,25 \text{ rad/s}^2$$

$$\text{Para: } \theta = 7,2^\circ = \frac{\pi}{50} \text{ rad}$$

$$\theta = \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\frac{\pi}{50} = \frac{1}{2} \alpha_2 (0,5)^2$$

$$\alpha_2 = 0,5 \text{ rad/s}^2$$

El par M estará definido por la suma de las inercias anteriormente calculadas y por la mayor aceleración angular requerida para el motor.

$$M = I\alpha \quad (3.4)$$

$$M = (0,0675 + 0,0056) \times 0,5$$

$$M = 0,037 \text{ Nm} \approx 0,05 \text{ Nm}$$

Teniendo un margen de seguridad de tres (recomendable para motores a pasos) se implementará un motor NEMA 23 de $0,15 \text{ Nm}$.

3.3.2 Subsistema 2. Estructura mesa rotatoria

El subsistema estructura mesa integra los componentes que harán posible el acoplamiento del motor, mesa, eje y plato giratorio a la cabina del prototipo. Se analizará y especificará sus características técnicas. En la Fig. 45 se muestra su distribución.

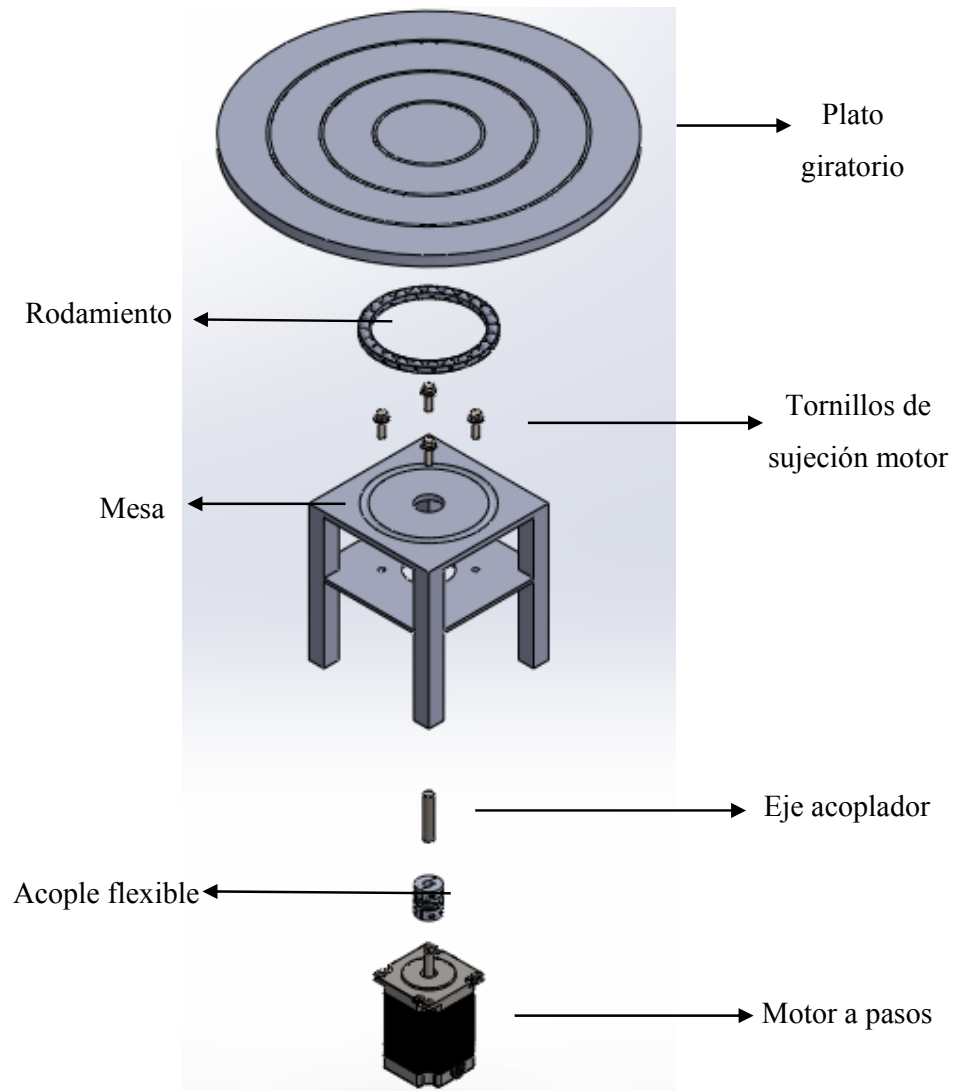


Fig. 45. Estructura mesa rotatoria.

3.3.2.1 Plato giratorio

El plato giratorio es el elemento que servirá de pedestal para el objeto mientras es rotado y escaneado. La especificación del objeto nos indica que el diámetro mínimo debe ser de 200 mm , por lo que se ha escogido un diámetro de seguridad de 250 mm .

Al igual que para el cálculo de torque del motor, tomaremos nuestro objeto experimental de 6 Kg de masa distribuido sobre la superficie del plato. El peso puesto a prueba es de 60 N .

Para facilitar el cálculo de los esfuerzos que sufriría el plato, se tomará una división de su volumen total equivalente a $250 \times 10 \times 20\text{ mm}$. La carga aplicada se fraccionará y su peso aproximado equivalente a la división del plato es 20 N ($0,067\text{ N/mm}$ carga distribuida). En la Fig. 46 se ilustra los efectos de la carga sobre el perfil. Los esfuerzos por tensiones de von Mises se detallan a continuación.

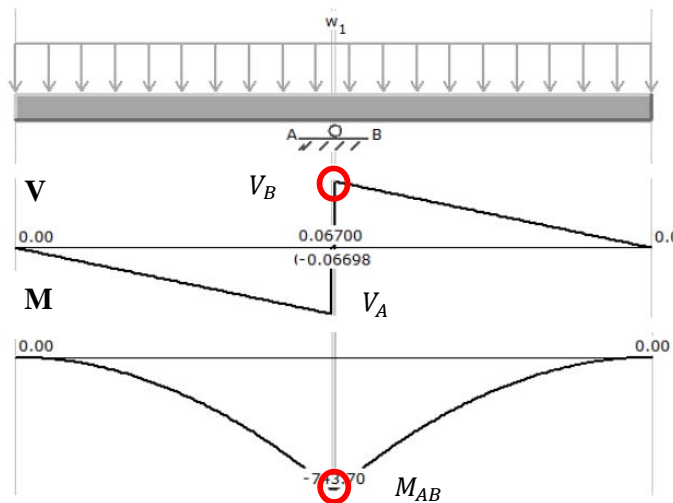


Fig. 46. Diagrama de fuerza cortante y momento flector del plato giratorio

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.6)$$

$$I = \frac{1}{12}(20)(10)^3 = 1666,67\text{ mm}^4$$

Máximo esfuerzo (centro del plato)

$$W_1 = 20\text{ N} = R_A$$

Fuerza Cortante:

$$V_A = -0,067 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \times 125\text{ mm}$$

$$V_A = -10\text{ N}$$

$$V_B = -10 + 20 = 10\text{ N}$$

Momento Flector: (3.5)

$$M_{AB} = \Delta V|_0^{125}$$

$$M_{AB} = \frac{10 \times 150}{2} = 625\text{ Nmm}$$

Tensión de von Mises

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3.52 + 0.017} = 1,88\text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M \times y}{I} = \frac{625 \times 5}{1666,67} = 1,88 \text{ MPa} \quad (3.7)$$

Esfuerzo cortante máximo (agujeros de carga)

$$Q = A'y' = (5 \times 20)(2,5) = 250 \text{ mm}^3 \quad (3.8)$$

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} = \frac{10(250)}{1666,67(20)} = 0,075 \text{ MPa} \quad (3.9)$$

La verificación de los resultados calculados se lo hace mediante el uso de software CAE para elementos finitos. El análisis de tensiones (Fig. 47) nos indica que los cálculos son correctos y el plato no se quebrará por la aplicación de esta carga. El esfuerzo máximo se localiza en el centro del plato con un valor aproximado de $1,88 \text{ MPa}$.

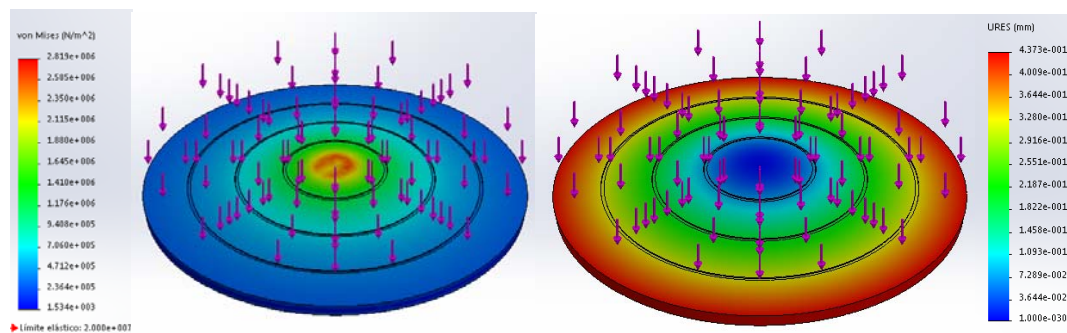


Fig. 47. Análisis estático plato: Tensiones de Von Mises (izquierda) desplazamientos del plato (derecha).

Para completar el estudio se evalúa los posibles desplazamientos que el plato giratorio podría presentar debido a la carga aplicada. La Fig. 47 ilustra las zonas de mayor desplazamiento de hasta $0,44 \text{ mm}$, siendo un valor aceptable.

Se requiere especificar el material del disco, para ello se analiza la selección por diagrama de *Ashby* (Fig. 48).

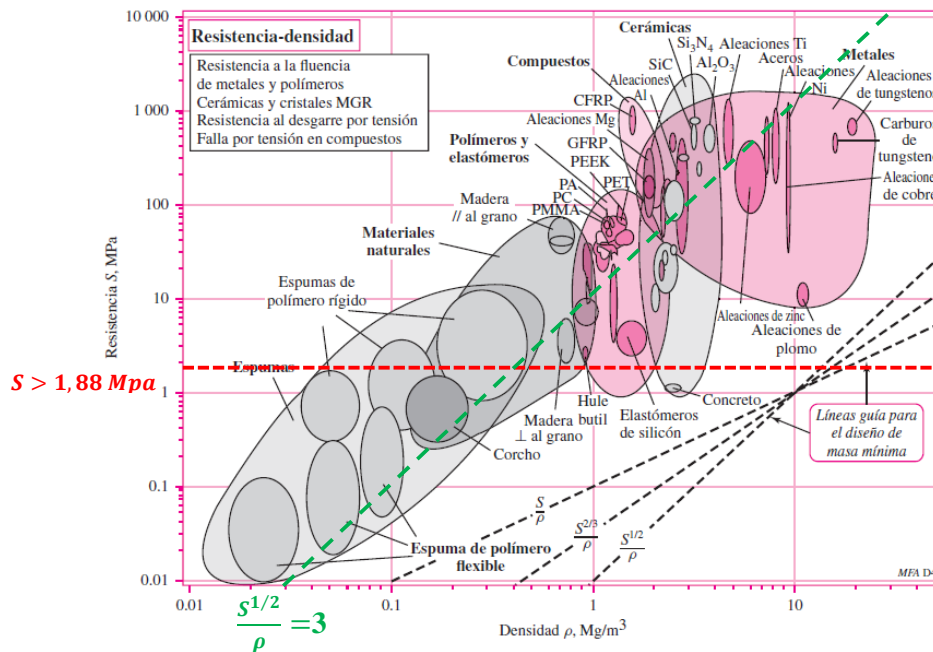


Fig. 48. Gráfica resistencia-densidad de los materiales.
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

El material deberá ser fácil de manufacturar a un costo razonable sin perjudicar la geometría del producto y satisfacer las propiedades deseadas. Analizando la Fig. 48 se requiere que $S > 1,88 \text{ Mpa}$ y que la resistencia específica $S^{1/2}/\rho$ tenga un índice constante que salvaguarde el costo del material, se ha escogido un valor alto de 3 debido a que el material no estará sujeto a altas exigencias de carga.

Dentro de la zona de diseño se extrajo tres posibles opciones de material, los cuales son: madera, plástico (nailon 6/10) y aluminio. Se consideró que son altamente disponibles en el mercado, su costo tanto de adquisición como de manufactura es relativamente bajo y se encuentran dentro del margen de resistencia a la flexión.

Por consiguiente se realiza una matriz de selección. La metodología (Ulrich & Eppinger, 2013) indica utilizar criterios ponderados de acuerdo a la relevancia de cada uno. En la Tabla 5 se evalúa cada una de las alternativas teniendo en cuenta su efecto en cada criterio y finalmente se obtendrá una puntuación sobre 5 de cada una de ellas.

Tabla 5
Matriz de selección ponderada material del plato



Criterio	Peso	A (Madera)		B (Plástico)		C (Aluminio)	
		Calif.	Eval. pond.	Calif.	Eval. pond.	Calif.	Eval. pond.
Costo	40%	5	2	4	1.6	3	1.2
Resistencia	20%	4	0.8	4	0.8	5	1
Facilidad de manufactura	30%	5	1.5	5	1.5	3	0.9
Durabilidad	10%	4	0.4	4	0.4	5	0.5
TOTAL	100%		4.7		4.3		3.6
¿Continuar?			SI		NO		NO

Se ha escogido a la madera como material para el plato giratorio, dado que sus criterios son los mejores ponderadamente.

3.3.2.2 Rodamiento

Este elemento es el encargado de dar soporte entre el plato giratorio y la mesa. También facilita el movimiento rotacional del plato con el menor factor de rozamiento posible. Tenemos dos posibles alternativas de diseño que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6
Alternativas de rodamiento

Alternativa	Imagen	Característica
A Placa de Cojinete de bolas Sviwel		Costo: \$4,85 Placa y bolas de acero Carga Max de 150 lb Dimensiones: $3\frac{3}{4}'' \times 3\frac{3}{4}'' \times \frac{5}{16}''$
B Chumacera de pared		Costo: \$6,60 Diámetro eje $\frac{1}{2}''$ Capacidad de carga dinámica 7,55 KN y Dimensiones: 86 x 86 x 12 mm

La selección de la alternativa se llevara a cabo mediante una matriz ponderada, la cual se detalla en la Tabla 7 a continuación.

Tabla 7
Matriz de selección ponderada del rodamiento

Criterio	Peso	A (Placa de cojinete)		B (Chumacera de pared)	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo	50%	5	2.5	4	2
Capacidad de carga	10%	3	0.3	5	0.5
Facilidad de montaje	30%	5	1.5	3	0.9
Durabilidad	10%	4	0.4	4	0.4
TOTAL	100%		4.7		3.8
¿Continuar?			SI		NO

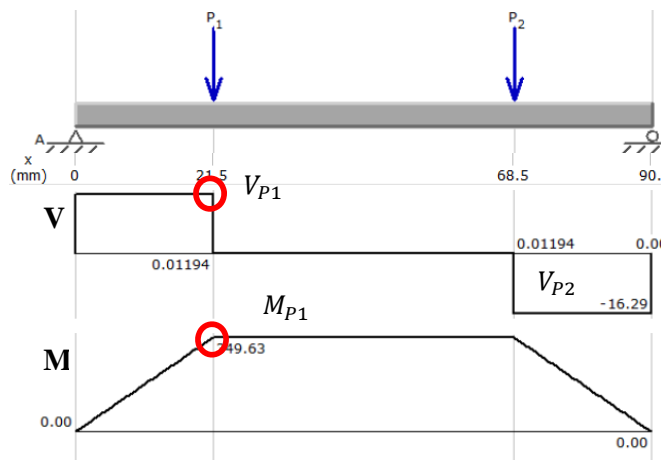
Se implementará la placa de cojinete, ya que este elemento aparte de ser económico es fácil de montar y no está sobredimensionada respecto a la carga que se va aplicar.

3.3.2.3 Mesa

La mesa es la estructura que brinda soporte al plato y al motor, estará sujeto fijamente a la cabina. El diseño de este componente dependerá del dimensionamiento de los elementos anteriormente seleccionados. Por lo que en la parte superior contara con un orificio de $\varnothing 26 \text{ mm}$ para el paso del cilindro acoplador del plato giratoria al motor. También contará con los orificios para el paso de pernos que acoplen el motor a la mesa y la mesa a la cabina, siendo $\varnothing 4 \text{ mm}$ y $\varnothing 6 \text{ mm}$ respectivamente.

Similar al diseño del plato giratorio se hará un análisis estático de los principales esfuerzos encontrados en la estructura, se parte directamente dándole un material de hierro dúctil de 550 MPa como límite elástico, el material aparte de ser altamente resistente, nos proporciona facilidad de manufactura que requerimos.

Para el análisis estático (Fig. 49) se considera que la carga aplicada se divide en dos partes iguales en las dos placas de la mesa. Recordando que el peso del objeto de prueba es de 60 N y para el plato elegimos una madera dura como la teca, de densidad $= 630 \text{ Kg}/\text{m}^3$, dándonos una masa aproximado de 500 gr y un peso de 5 N. Combinando las dos cargas nos da 65 N, que distribuido en las dos superficies sería 32,5 N en cada una. Se calcula:



$$\sum Fy = 0$$

$$P_1 + P_2 = R_A + R_B = 32,5 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$(21,5)P_1 + (68,5)P_2 = (90)R_B$$

$$R_B = \frac{16,25(21,5 + 68,5)}{90}$$

$$= 16,25 \text{ N} = R_A$$

Fig. 49. Diagrama de fuerza cortante y momento flector de la mesa.

Fuerza Cortante:

$$V_{P1} = 16,25 \text{ N}$$

$$V_{P2} = -16,25 \text{ N}$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}(120)(3)^3 = 270 \text{ mm}^4$$

Máximo esfuerzo (agujeros de carga)

$$\sigma_{max} = \frac{M \times y}{I} = \frac{349,38 * 1,5}{270} = 1,94 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante máximo
(Orificios de carga)

$$Q = A'y' = (1,5 \times 120)(0,75) = 135 \text{ mm}^3$$

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} = \frac{16,25(135)}{270(120)} = 0,068 \text{ MPa}$$

Momento Flector:

$$M_{P1} = \Delta V|_0^{21,5}$$

$$M_{P1} = 16,25 \times 21,5$$

Tensión de von Mises

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{3.76 + 0.014} = 1,94 \text{ MPa}$$

A continuación en la Fig. 50 se ilustra el análisis finito. Comprobando los resultados con los calculados anteriormente podemos concluir que debido a la geometría de la placa inferior los esfuerzos críticos se ven aumentados y focalizados en las áreas cercanas donde se aplica la carga.

Como se observa en el análisis estático, la placa superior casi no sufre ninguna afectación por parte de la carga aplicada. Por otro lado la placa inferior tiene sus esfuerzos más altos cerca de las columnas de la estructura (14,7 MPa, dentro del límite elástico) y sus deformaciones mayores cerca del perímetro del orificio central ($3,44 \times 10^{-2} \text{ mm}$, valor aceptable).

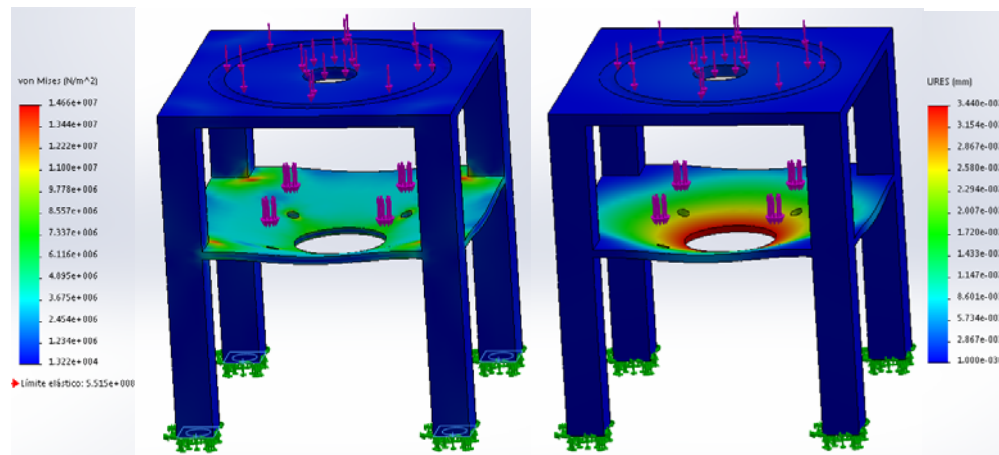


Fig. 50. Análisis estático de la mesa: Tensiones de Von Mises (izquierda) y desplazamientos de la mesa (derecha).

3.4 Módulo 2. Cabina

En el módulo cabina van acoplados todos los sistemas que comprenden el prototipo de escáner 3D de bajo costo. Las consideraciones de diseño que debe tener son:

- El dimensionamiento debe satisfacer las necesidades del usuario (tamaño del objeto a escanear) y tamaño de los elementos que constituyen el prototipo. Se agregará también una tapa que permita el ingreso del objeto. La Fig. 51 cumple las exigencias antes mencionadas.

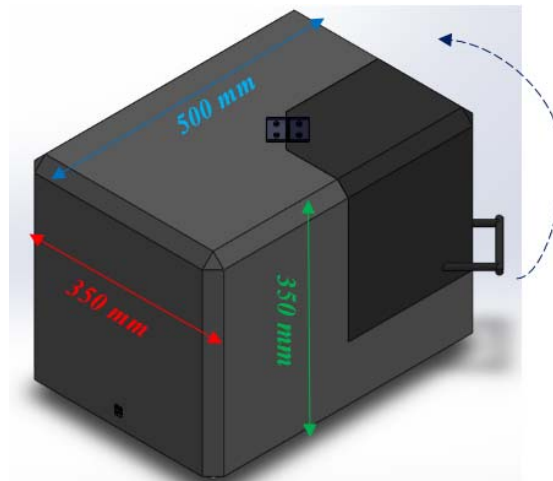


Fig. 51. Cabina prototipo escáner 3D.

- La funcionalidad debe favorecer el proceso central del prototipo, este es la adquisición de datos basado en visión artificial. Los primeras pruebas de este proceso arrojó un estatuto de diseño fundamental, el cual como se ilustra en la Fig. 52 nos indica que se requiere la implementación de una cámara oscura. Debido a que en el modelo RGB del color de luz los pixeles blancos representan un valor (255, 255,255), en otras palabras el color blanco es la mezcla completa de los colores rojo azul y verde. Los puntos blancos causarían una gran interferencia en el procesamiento de la imagen.

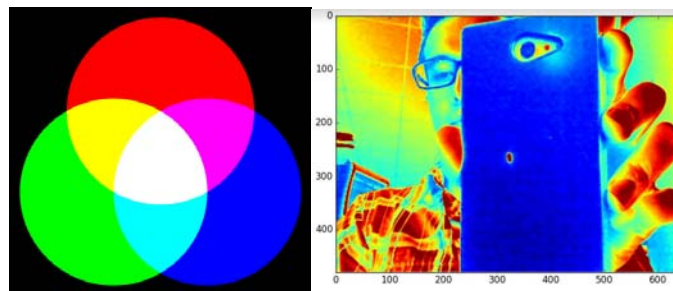


Fig. 52. Prueba RGB de visión artificial.

- La distribución obedecerá una arquitectura modular (Fig. 53), donde cada uno de sus módulos funcionales ocupara un espacio separado de los demás. De esta manera se llevara un orden bien definido entre las interacciones de los módulos generalizados en tres áreas (potencia, control y área de escaneado).

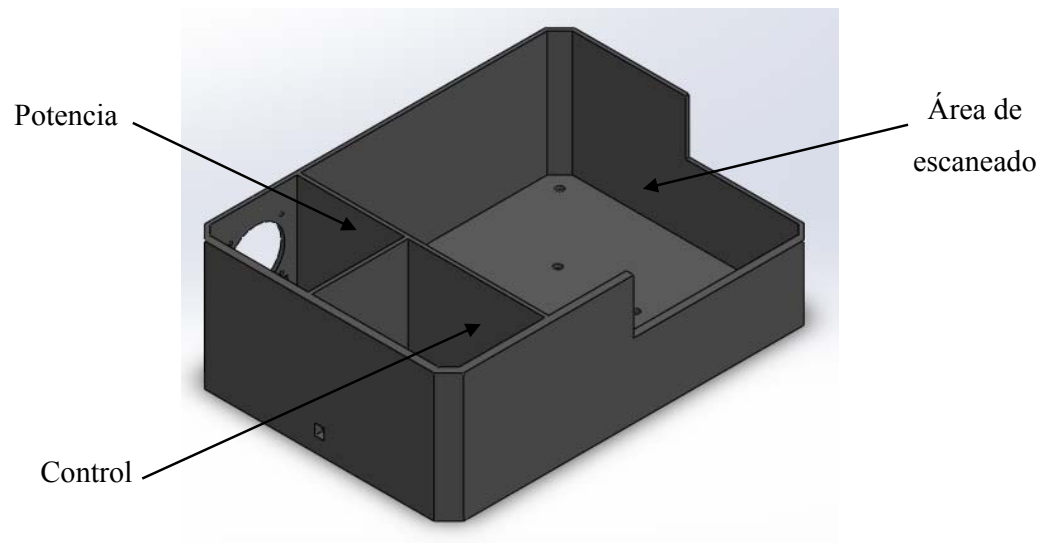


Fig. 53. Distribución del prototipo escáner 3D

- El material a ser aplicado debe ser primeramente económico y luego fácil de manufacturar. Considerando también que debe ser resistente a la carga aplicada, no ser traslucido y dar un buen aspecto. La Tabla 8 muestra la selección ponderada bajo estos criterios.

Tabla 8
Matriz de selección ponderada material de la cabina

Criterio	Peso	A (Madera)		B (Acrílico)		C (Plancha de acero)	
		Calif.	Eval. pond.	Calif.	Eval. pond.	Calif.	Eval. pond.
Costo	40%	5	2	4	1.6	2	0.8
Resistencia	30%	4	1.2	4	1.2	2	0.6
Facilidad de manufactura	10%	3	0.3	3	0.3	5	0.5
Durabilidad	20%	2	0.4	5	1	5	1
TOTAL	100%		3.9		4.1		2.9
¿Continuar?			NO		SI		NO

El material seleccionado es el acrílico, aparte de cumplir con los criterios antes mencionados tiene propiedades de antirreflejo y antiestático que vienen perfectamente para los propósitos del prototipo.

Las condiciones para el primer análisis estático aplicado al diseño de la cabina son: material acrílico de impacto medio-alto (límite elástico 45 MPa) y con sujeciones fijas en las 4 esquinas de la base como se muestra en la Fig. 54 Para el cálculo de tensiones se considera también el peso de la mesa (15 N), dando un total de carga aplicada sobre la base de 80 N . Los cálculos se detallan a continuación.

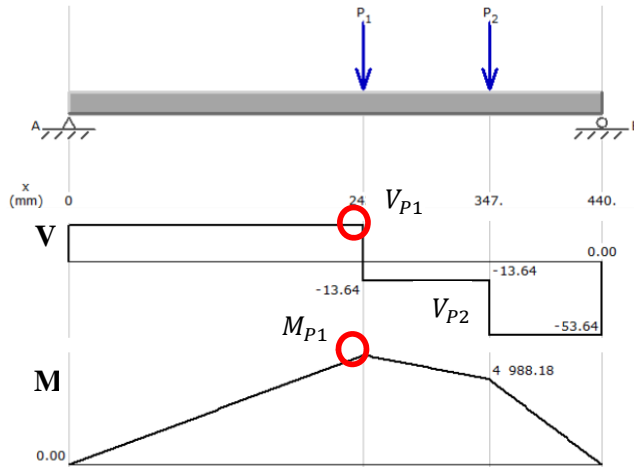


Fig. 54. Diagrama de fuerza cortante y momento flector de la mesa

$$\sum F_y = 0$$

$$P_1 + P_2 = R_A + R_B = 80 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$(243)P_1 + (347)P_2 = (440)R_B$$

$$R_B = \frac{40(243 + 347)}{440}$$

$$= 53,64 \text{ N}$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}(290)(5)^3$$

$$= 3020,83 \text{ mm}^4$$

Momento Flector:

$$M_{P1} = \Delta V|_0^{21,5}$$

$$M_{P1} = 26,36 \times 243$$

$$= 6405,48 \text{ Nmm}$$

$$R_A = 80 - 53,64 = 26,36 \text{ N}$$

Fuerza Cortante:

$$V_{P1} = 26,36 \text{ N}$$

$$V_{P2} = 26,36 - 80 = -53,64 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} = \frac{26,36(1268,75)}{3020,83(290)} = 0,038 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo (agujeros de carga)

$$\sigma_{max} = \frac{M \times y}{I} = \frac{6405,48 \times 2,5}{3020,83} = 5,3 \text{ MPa}$$

Tensión de von Mises

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{28,09 + 0,0043}$$

$$= 5,3 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante máximo (Agujeros de carga)

$$Q = A'y' = (2,5 \times 290)(1,75) = 1268,75 \text{ mm}^3$$

El análisis finito de tensiones de von Mises (Fig. 55) verifica los valores obtenidos por los cálculos y no muestra ningún problema respecto al límite elástico con un esfuerzo máximo de $12,98 \text{ Mpa}$, en otras palabras el material no se quebrará.

Por otro lado el análisis de desplazamientos (Fig.55) de la primera prueba nos muestra una alta deformación en focalizada en la parte media del área de apoyo de la mesa, llegando a ser hasta de $3,7 \text{ mm}$. Aun estando dentro del límite elástico esta deformación no es admisible para el diseño. Para mejorar este resultado probaremos agregando un quinto apoyo fijo en el centro de mayor deformación.

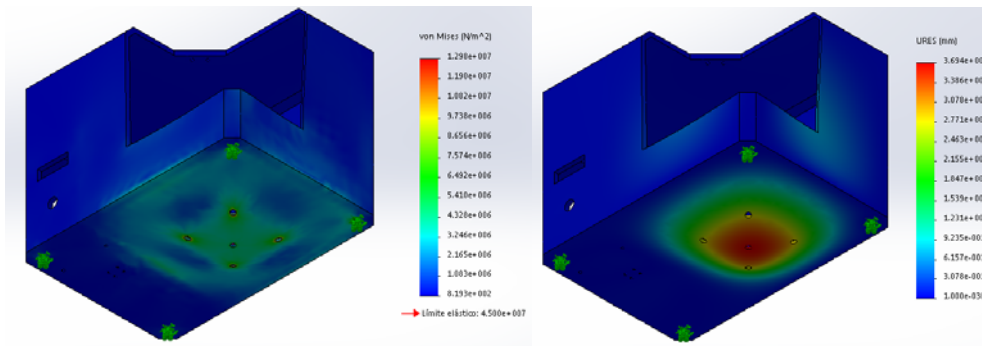


Fig. 55. Análisis estático de la cabina: Por tensiones de von Mises (izquierda) y desplazamientos de la cabina (derecha) – prueba 1.

La incorporación de un quinto apoyo trae ventajas tanto para las tensiones (Fig. 56 izquierda) como para los desplazamientos (Fig. 56 derecha). La reducción de un 32% en las tensiones y un 82% en las deformaciones. Por lo que se puede concluir que la prueba dos es notoriamente aceptable.

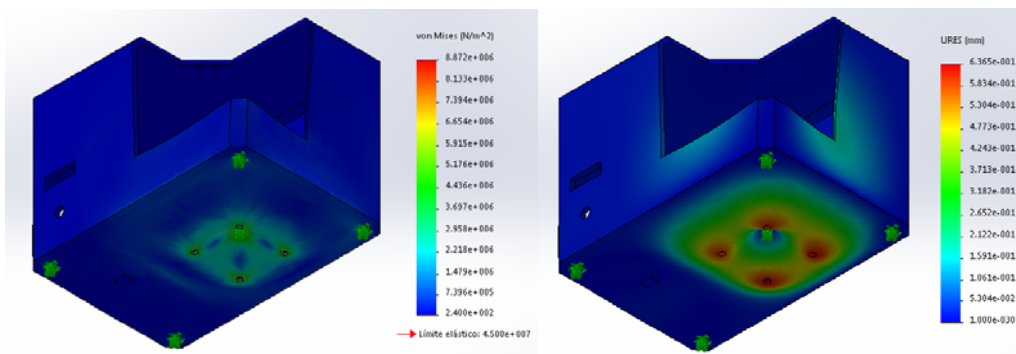


Fig. 56. Análisis estático (izquierda) por tensiones de von Mises y (derecha) desplazamientos de la cabina – prueba 2.

- El diseño de la cabina debe facilitar el mantenimiento. La consideración de diseño es sostenida por la posibilidad de acceso a las áreas de control y potencia por medio de una puerta. En la Fig. 57 se ilustra su diseño.

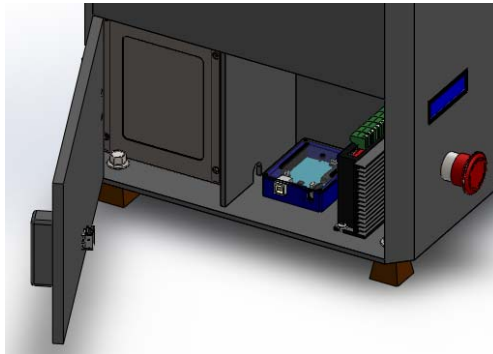



Fig. 57. Acceso de mantenimiento del prototipo escáner 3D.

3.5. Módulo 3. Escáner

El primer paso será definir el tipo de cámara a implementar, para una selección adecuada se evaluará criterios como costo, calidad de la imagen y tipo (color o monocromática). La cámara cumple una función fundamental en el proceso de visión artificial, que es la de digitalizar una imagen plana de un mundo tridimensional. Para la selección se evaluará dos tipos de cámaras, una webcam y otra para propósitos industriales, sus características se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9
Alternativas de cámara

Alternativa	Imagen	Característica
A Cámara web Omega 361148BS		Costo: \$15 Sensor CMOS 300K píxeles 24 bits de color verdadero Formato de digitalización JPEG y BMP 640 x 480 píxeles

Continua 

B Cámara JAI
Industrial
A-200 CL



Costo: \$150-200 fuera del país

Sensor KODAK KAI-02050 CCD

Monocromática de 8, 10 o 12 bits

1600 x 1200 píxeles

A primera vista la diferencia de costos entre ambas alternativas es grande, no hace falta realizar una matriz de selección y se toma la Cámara web Omega 361148BS como decisión de implementación. La cámara es lo suficientemente robusta para los propósitos didacto-educativos del prototipo escáner 3D de bajo costo.

El dispositivo láser lineal cumple la función de formar el contorno del objeto a escanear por medio de un haz de luz láser. El contorno generado será captado por la cámara, completando así el modelo tridimensional del objeto (Fig. 58).

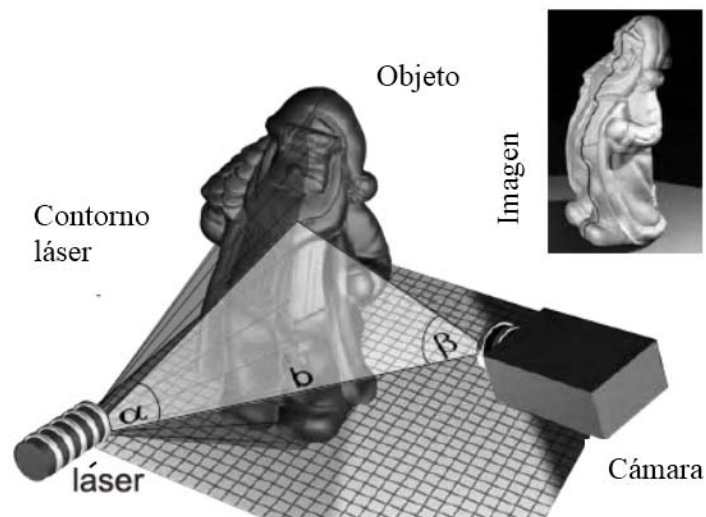


Fig. 58. Modelo visión artificial.

En el mercado local es difícil la adquisición de estos dispositivos, por lo cual se optó por la fabricación de uno. La construcción del láser lineal constará de un diodo láser y un cilindro de vidrio de $\varnothing 3mm$. El funcionamiento (Fig. 59) es sencillo, el

punto láser pasa por el cilindro (lente) generando la refracción de la luz en forma de línea.

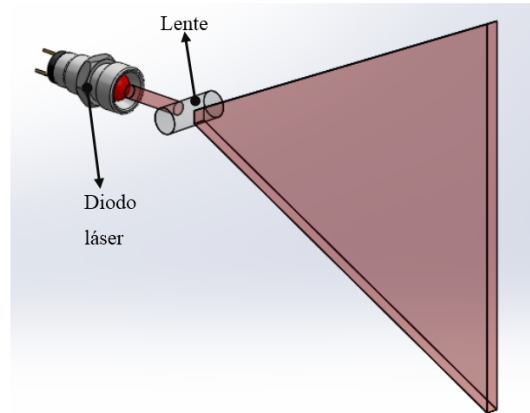


Fig. 59. Refracción del puntero láser.

Para entender mejor el funcionamiento del presente modulo se expone en la Fig. 60 el proceso completo que debe llevar a cabo.

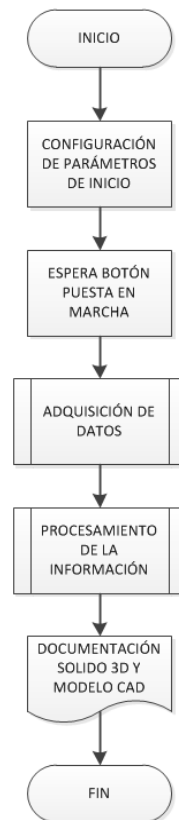


Fig. 60. Diagrama de flujo del proceso de escaneado.

3.5.1. Subsistema 1. Adquisición de datos

El software a usarse para este propósito que va de la mano con los objetivos y necesidades del prototipo es GNU/Linux Ubuntu 16.04 LTS de 64 bits como sistema operativo y Python 2.7 como intérprete de programación. Ambos por ser software libre nos dan una amplia ventaja en lo que a costos respecta, debido a que el prototipo tiene propósitos netamente didácticos y educativos.

También se empleara las siguientes librerías para complementar la aplicación que se desea desarrollar:

- OpenCV: Paquete libre para funciones de visión artificial (OpenCV, 2017).
- Numpy: Útil para cálculos matemáticos y arreglos matriciales (NumPy, 2006).
- Matplotlib: Ilustra gráficamente puntos en el espacio (Matplotlib, 2017).
- PyQt4: Librería para el desarrollo de interfaces (PyQT, 2016).
- Serial: Comunicación con el controlador arduino.

En la primera etapa de configuración de parámetros de inicio se habilitará al usuario por medio de una HMI (Interfaz Humano Maquina) con la posibilidad de poder modificar las siguientes variables de control:

- Ángulo de paso: 3,6° y 7,2°
- Salto de Pixel: 8 y 16
- Sensibilidad de la escala de rojo: 100 a 255 (valor 140 por defecto).
Intensidad de rojo detectable, a valores pequeños mayor sensibilidad.

De estas tres variables y sus combinaciones dependerá la calidad de escaneado y el tiempo de procesamiento.

El subproceso Adquisición de Datos (Fig. 61) se detalla en el siguiente diagrama de flujo:

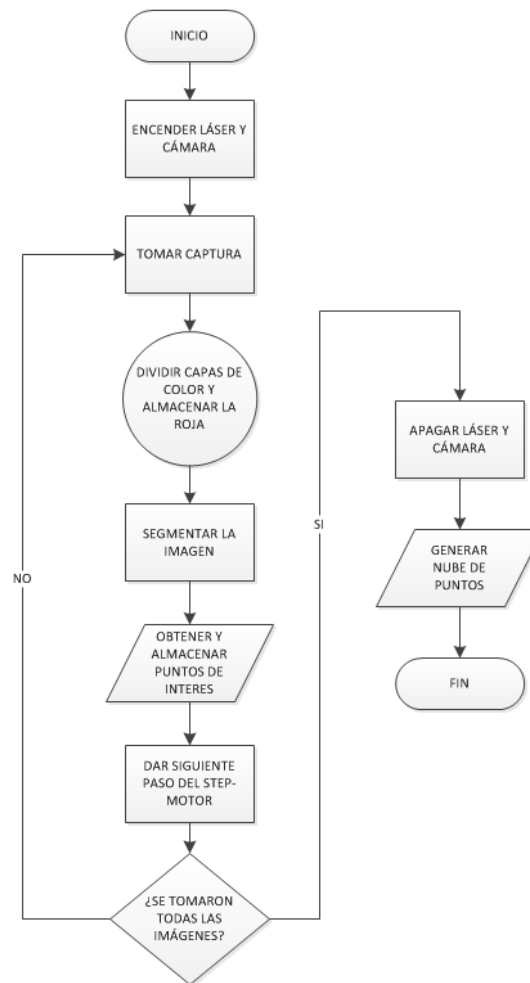


Fig. 61. Diagrama de flujo adquisición de datos

El bucle del proceso inicia con la captura de la imagen del objeto que se desea escanear. Como se vio en el capítulo anterior las imágenes digitalizadas forman arreglos matriciales de $m \times n$ píxeles, que al tratarse de píxeles a color se trabajará en una escala RGB de 1 byte por color. Se busca el procesamiento y tratamiento de la capa roja de cada captura, por lo cual el proceso deberá separar las tres capas de color RGB y almacenar únicamente la roja.

El siguiente paso es segmentar el contorno láser (Fig. 62) proyectado sobre el objeto, obteniendo las coordenadas (x, y) de la posición de los puntos que conforman el contorno dentro de la imagen.

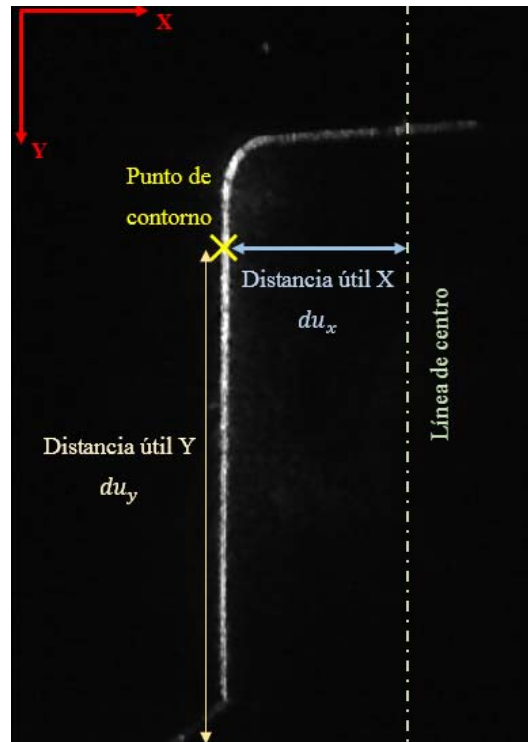


Fig. 62. Contorno láser.

La reestructuración de los puntos de contorno en un espacio tridimensional es posible mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\begin{cases} X_{real} = Kp \times Kt \times du_x \times \cos \theta \\ Y_{real} = Kp \times (du_y + tr_y) \\ Z_{real} = -Kp \times Kt \times du_x \times \sin \theta \end{cases} \quad (3.11)$$

Donde:

Kt : Coeficiente de triangulación.

Kp : Coeficiente de proporcionalidad.

du_x : Distancia útil en "X" (distancia en píxeles de la línea centro de la imagen al contorno del objeto).

du_y : Distancia útil en "Y" (distancia en píxeles de la parte inferior de la imagen al contorno del objeto).

tr_y : Traslación de píxeles de contorno en el eje "y".

θ : Ángulo de rotación.

Rotación del contorno: Primeramente se debe entender que cada contorno escaneado (en los 360° del objeto) debe ser rotado espacialmente en θ grados (N° de pasos \times paso del motor), por lo cual será prescindible la utilización de una matriz de rotación Ec. 3.12 sobre el eje “Y” como se indica en la Fig 63. Donde X', Y' y Z' son las coordenadas de los puntos rotados en el espacio (Craig, 2006).

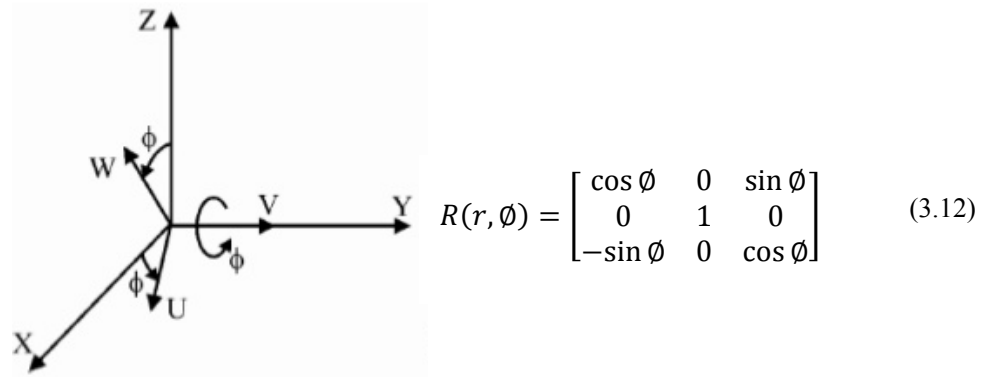


Fig. 63. Matriz de rotación en el eje “Y”.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

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

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \cos \phi + Z \sin \phi \\ Y \\ -X \sin \phi + Z \cos \phi \end{pmatrix}$$

Multiplicando la matriz R por un punto (Ec. 3.13) dará como resultado el punto rotado ϕ grados sobre el eje “Y”. El valor de Z en la aplicación es siempre cero, debido a que el cálculo de cualquier punto rotado se lo hará desde un mismo eje de referencia. Quedando la siguiente Ec. 3.14:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \cos \phi \\ Y \\ -X \sin \phi \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Traslación del contorno: Es necesario entender por qué se aplica un valor tr_y (Ec. 3.11) a la triangulación espacial de los puntos. Como se observa en la Fig. 64 el cilindro

escaneado tiene su cara superior paralela al piso, por lo que los puntos del contorno deben ser trasladados y alineados con el punto del centro de la cara mencionada.

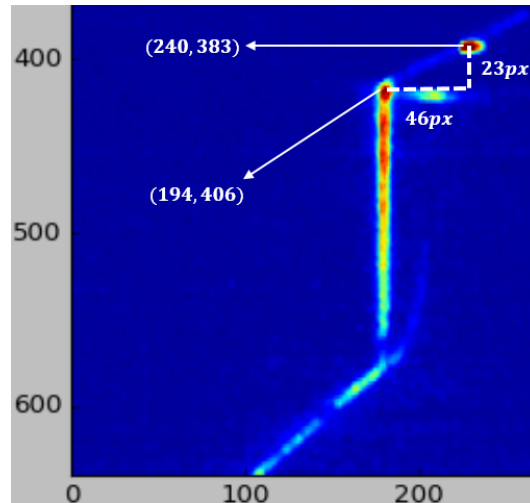


Fig. 64. Contorno del cilindro.

Entonces es importante saber la cantidad de pixeles que debemos recorrer a los puntos escaneados (Ec. 3.16). La cantidad tr_y dependerá de la distancia de cada punto a la línea centro de la imagen du_x y del ángulo θ formado por el desplazamiento que se requiere dar como se observa en la Fig. 65.

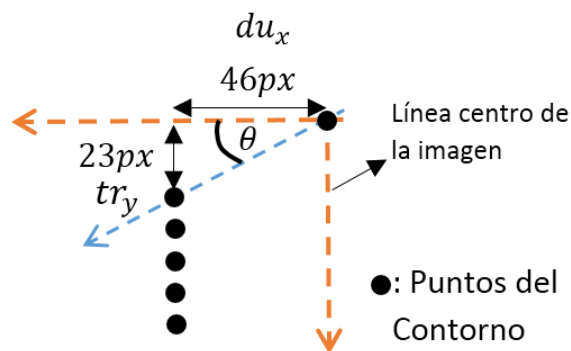


Fig. 65. Diagrama de traslación de pixeles.

Se obtiene:

$$\tan \theta = \frac{tr_y}{du_x} \quad (3.15)$$

$$tr_y = du_x * \frac{23}{46}$$

$$tr_y = 0,5 du_x \quad (3.16)$$

El coeficiente de triangulación se calcula a partir del posicionamiento del láser, webcam y el contorno del objeto que se desea escanear, formando entre ellos un triángulo como se observa en la Fig. 66.

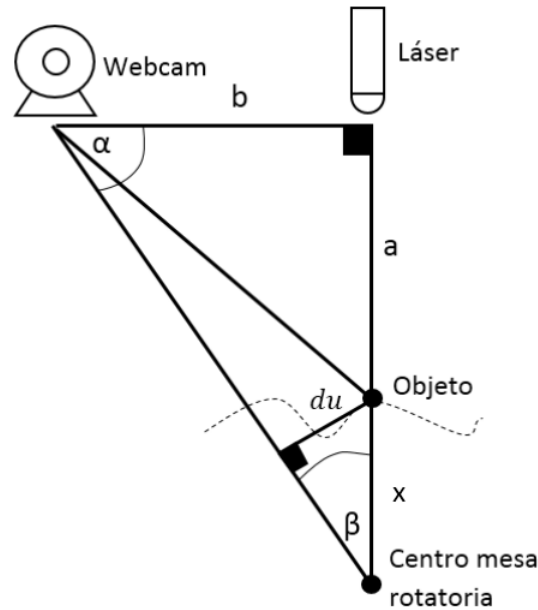


Fig. 66. Modelo de triangulación del prototipo.

Donde $a + x = 250 \text{ mm}$ y $b = 140 \text{ mm}$ como constantes dimensionales del prototipo. Se desea conocer la relación entre du (distancia útil en píxeles) y x (distancia real en píxeles), por ello se calculará el ángulo β (Ec. 3.17) y así también hallar el coeficiente de triangulación Kt .

$$\tan \beta = \frac{140}{250} \quad (3.17)$$

$$\beta = 29,25^\circ$$

Entonces:

$$\sin \beta = \frac{du}{x} \quad (3.18)$$

$$x = \frac{du}{\sin \beta}, \quad \text{donde } Kt = \frac{1}{\sin \beta} = 2,05$$

El coeficiente de proporcionalidad Kp describe la relación entre unidad de pixel y unidad milimétrica, se calculará en base a una regla de tres. Como se ve en la Fig. 67 se tiene el contorno de un envase de shampoo en una imagen de 480x640 pixeles.

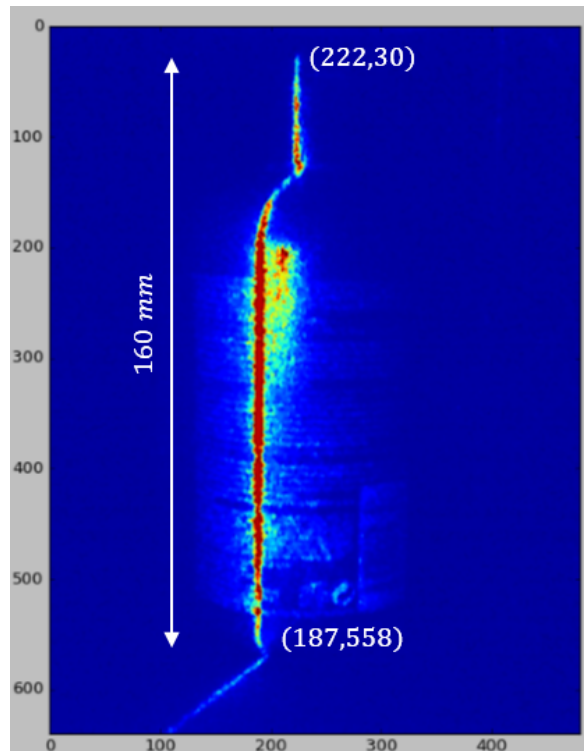


Fig. 67. Imagen de prueba para valor Kp .

Teniendo en cuenta la variación de pixeles en el eje “Y” de la imagen Δpx_y y la altura del objeto escaneado, es sencillo deducir la relación que guardan estos valores. A continuación en la Ec. 3.19 se demuestra la obtención del valor Kp .

$$Kp = \frac{d_{real}}{\Delta px_y} \quad (3.19)$$

$$Kp = \frac{160}{528} = 0,3$$

Una vez escaneados los puntos del contorno de los 360° del objeto, se requiere que sean almacenados en una matriz de dimensión [numero de puntos escaneados, 3] y que a su vez se genere un archivo que contenga la nube de puntos con extensión “.asc” para su posterior procesamiento en el software especializado en el mallado de puntos.

3.5.2. Subsistema 2. Procesamiento de la información

El procesamiento de la información se detalla en el siguiente diagrama (Fig. 68).

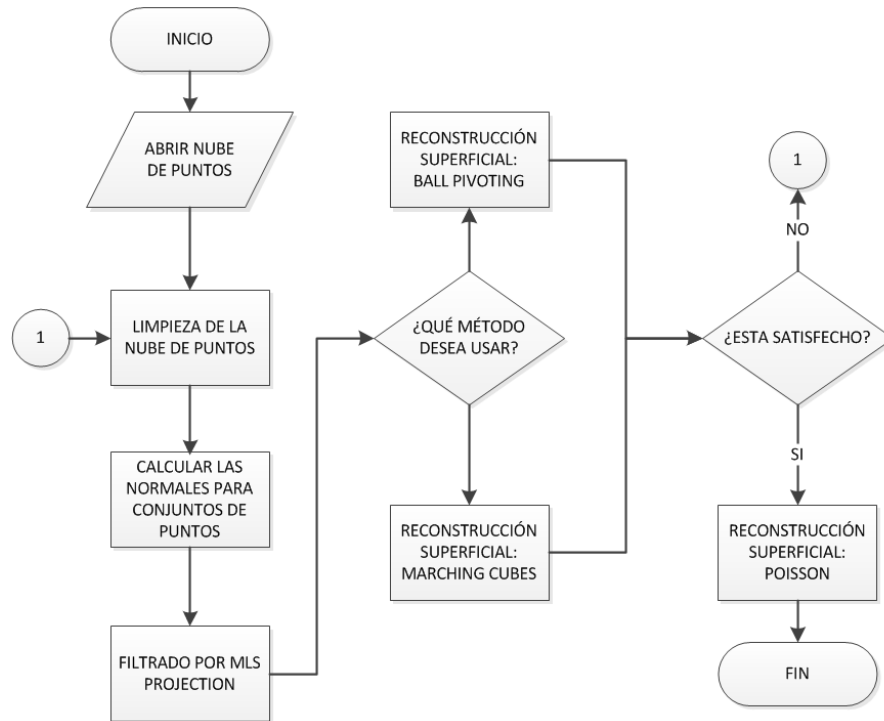


Fig. 68. Diagrama de flujo procesamiento de la información.

El proceso inicia por abrir la nube de puntos del objeto que fue escaneado con el software libre *Meshlab*, el cual cuenta con diversas funciones para el mallado de objetos y por tal motivo se encargara de todo el proceso de reconstrucción superficial. A continuación se procede con la limpieza de la nube de puntos, en este paso se borra puntos duplicados y puntos fuera de la nube o errores.

Siguiendo con el proceso se deberá calcular los vectores normales a los conjuntos de puntos que conformaran las caras del mallado superficial. Para dar una mejor disposición y disminuir la dispersión de los puntos en el espacio se utiliza una herramienta de suavizado MLS (Moving Least Squares) que trabaja bajo aproximación de mínimos cuadrados (Fleishman, Cohen-Or, & Silva).

La reconstrucción superficial se realiza dependiendo de la complejidad del objeto que se escaneo, se recomienda el método Marching Cubes (Lorenson & Cline, 1987)

para objetos de baja complejidad y el método Ball Pivoting para objetos de considerable complejidad geométrica (Bernardini, Mittleman, Rushmeir, Silva, & Taubin); la diferencia entre métodos radica en que el primero genera puntos y caras para completar el mallado (puede distorsionar la reconstrucción de objetos no lineales) mientras que el otro trabaja con los puntos con los que cuenta. Por último si los resultados son los esperados se ejecuta una última reconstrucción por el método de Poisson (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006) para cerrar todos los posibles huecos que pueda tener el mallado y refinar las superficies antes de exportarlo.

3.6. Módulo 4. Potencia y control

El alma del presente módulo lo conforma el controlador, por lo que en primer lugar se realiza la selección de este elemento. El controlador debe satisfacer las necesidades del prototipo en cuanto a número de entrada y salidas, costo y debe ser de uso libre. Las posibles alternativas de diseño pueden ser Arduino UNO y PIC16F877A.

Tanto Arduino como el microcontrolador PIC16F877A son sistemas de hardware embebido, lo que quiere decir que su estructura interior es parecida a la de una computadora. Tiene procesador, memorias, puertos de entrada y salida, reloj interno, entre otros más componentes.

Arduino UNO

Ventajas

- Alta flexibilidad
- Ahorra costos y tiempo
- No requiere de componentes extras para su funcionamiento
- Facilidad de uso e implementación
- Dirigido para fines didácticos y educativos

Desventajas

- Poco recomendable para producción a escala



PIC16F877A*Ventajas*

- Costo bajo
- Alta flexibilidad

Desventajas

- Requiere de amplios conocimientos previos para su implementación
- Requiere componentes extras
- Poca documentación

Tabla 10
Alternativas de controlador del prototipo

Alternativa	Imagen	Característica
A Arduino UNO R3		Costo: \$15 Microcontrolador ATmega328 Voltaje de operación 5 V E/S Digitales : 14 (6 PWM) Entradas análogas: 6
B PIC16F877A		Costo: \$8 Fabricante: Microchip Frecuencia de operación: 20 MHz E/S Digitales : A,B,C,D,E Entradas análogas: 8 de 10 bits

Aplicando una matriz de selección a las anteriores alternativas (Tabla 10), se tiene:

Tabla 11
Matriz de selección ponderada del controlador

Criterio	Peso	A (Arduino UNO R3)		B (PIC16F877A)	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo	50%	4	2	5	2.5
Flexibilidad	20%	5	1	4	0.8
Facilidad de implementación	20%	5	1	2	0.4
Disponibilidad	10%	4	0.4	3	0.3
TOTAL	100%		4.4		4
¿Continuar?			SI		NO

La alternativa elegida es el Arduino UNO R3, este dispositivo embebido presta grandes ventajas de implementación frente al PIC y está relacionado a los propósitos didácto-educativos del prototipo escáner 3D de bajo costo. Sus características se enumeran en la Tabla 12.

Tabla 12
Características Arduino UNO R3

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (limites)	6-20 V
E/S Digitales	14 (6 PWM)
Entradas análogas	6
Corriente DC por E/S	40 mA
Corriente DC por pin de 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Las funciones que deberá desempeñar el controlador se detallan en el diagrama de flujo (Fig. 69) a continuación. En resumen se encargará del encendido y apagado de la cámara, láser e interfaz 16×2. Así también del control de los pasos que se desea que el motor rote luego de haber realizado una captura de imagen.

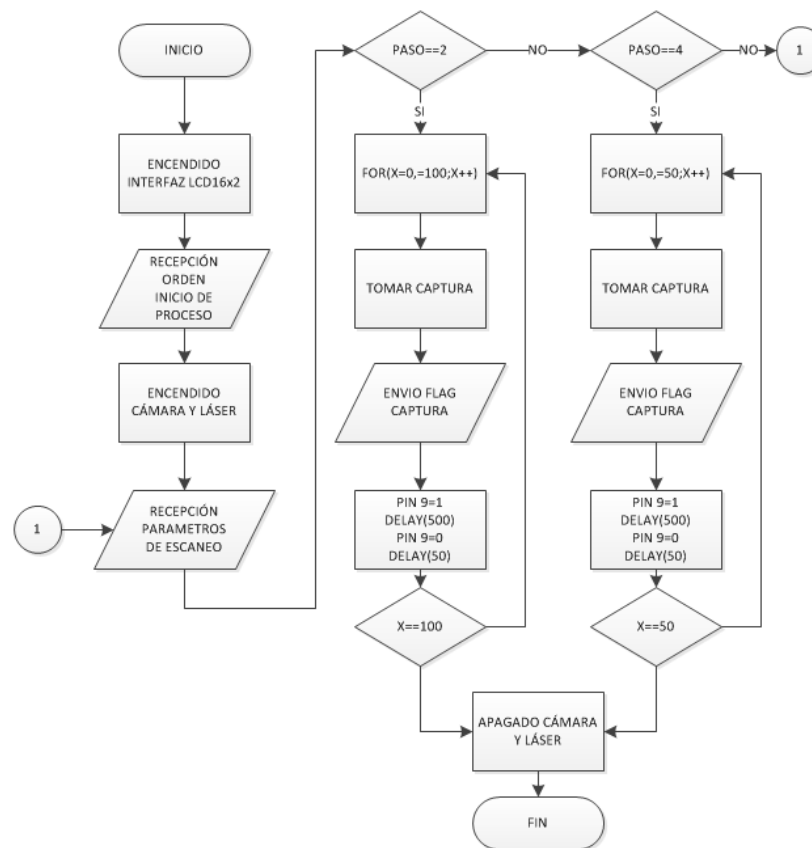


Fig. 69. Diagrama de flujo programación del arduino UNO.

El sistema electrónico se encargará de las funciones a continuación detalladas:

- Un driver será implementado para el control del motor a pasos, el integrado elegido para llevar a cabo esta función es el A4988 (Fig. 70).



Fig. 70. Driver para motor a pasos A4988.

El integrado tiene un precio bajo de adquisición y es abundante en el mercado. Soporta de 8- 35 V y 2 A de alimentación por lo que lo hace ideal para el prototipo. Sus características se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13
Características A4988

Mínimo voltaje de operación	8 V
Máximo Voltaje de operación	35 V
Máxima corriente por fase	2 A
Rango de voltaje lógico	3.3-5 V
Pasos	Full, $1/2$, $1/4$, $1/8$ y $1/16$
Potenciómetro de ajuste	SI
Protección sobrecarga térmica	SI
Requiere disipador térmico	SI

El diagrama de conexión recomendado por el fabricante (Pololu, s.f.) se detalla a continuación en la Fig. 71.

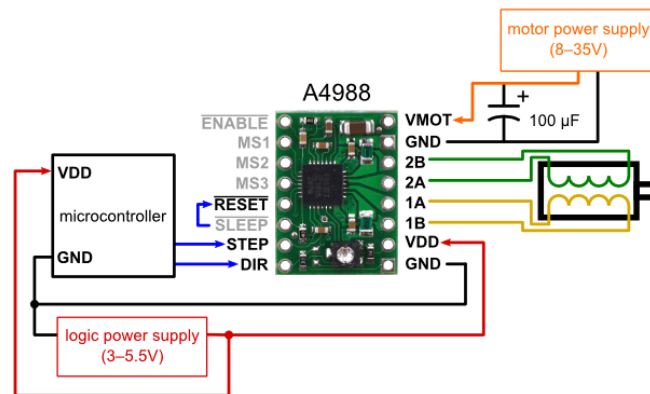


Fig. 71. Diagrama de conexión A4988.

- El estado y progreso del proceso de escaneado en el interior de la cabina será dado a conocer por medio de la implementación de un display LCD HD44780 16x2 con luz azul. Las pantallas de cristal líquido transforman la energía eléctrica en ondas de luz. El display 16x2 (ElectronicaStore.Net, s.f.) es suficiente para mostrar la información deseada y es compatible con el dispositivo Arduino UNO.

Tabla 14
Características LCD HD44780

Fondo cristal liquido	AZUL
Brillo ajustable	SI
línea de caracteres	2 filas y 16 columnas de caracteres
Voltaje de operación	5 V
dimensiones	80 x 35 x 11 mm

La conexión recomendada con el Arduino UNO se ilustra en la Fig. 72.

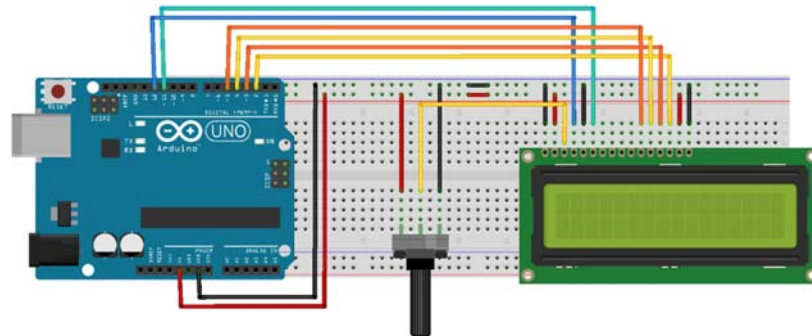


Fig. 72. Diagrama de conexión con Arduino UNO.

Diseño electrónico final

Revisados y seleccionados cada uno de los elementos que constituirán el sistema electrónico, se desarrolla un diagrama (Fig. 73) que representa el conjunto completo del circuito de control.

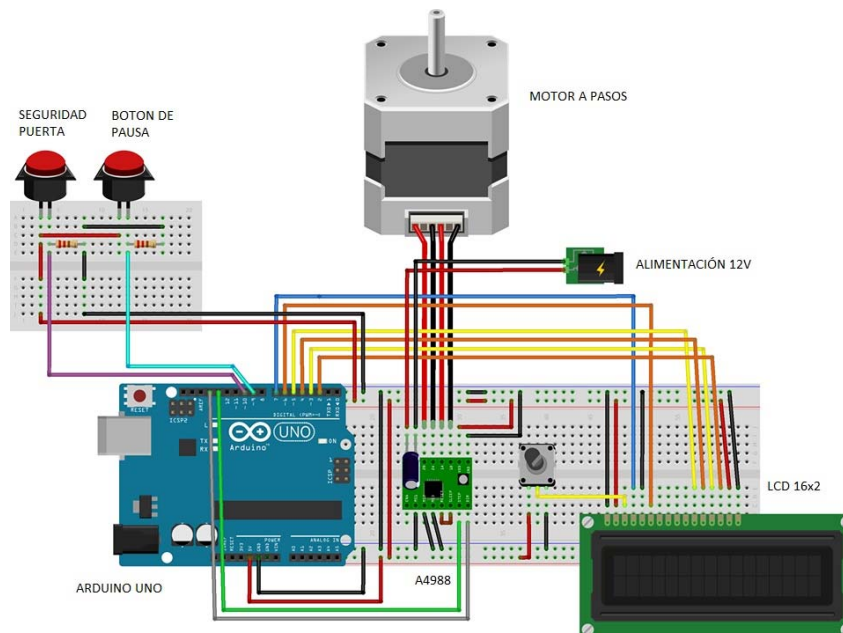


Fig. 73. Diagrama esquemático del sistema electrónico.

La placa de control encargada de la automatización de los módulos escáner (encendido y apagado del dispositivo láser lineal por medio de un relé), mesa rotatoria (control del número de pasos que debe dar el motor con 12v de alimentación), interfaz

LCD 16×2 y seguridad. Se desarrolló con software especializado en el diseño de diagramas esquemáticos, el resultado se ilustra en la Fig. 74.

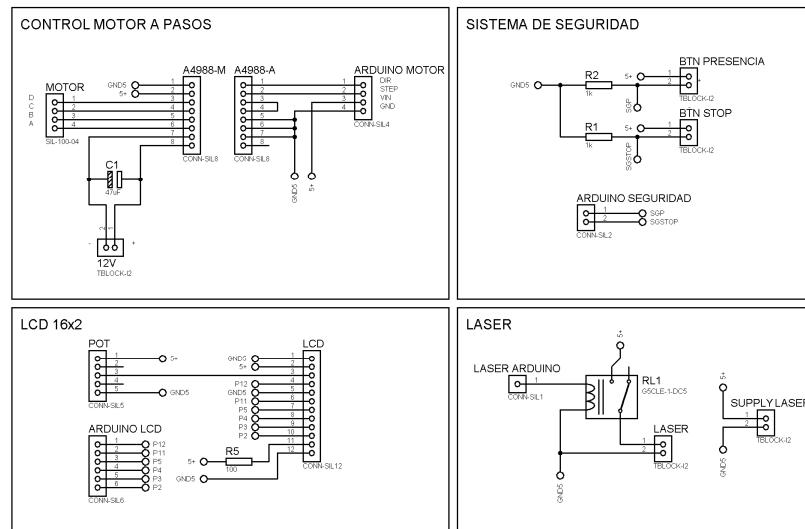


Fig. 74. Diagrama esquemático de la placa.

Una previa visualización del resultado de manufacturar la placa de control se observa en la siguiente Fig. 75. Se distribuyó ordenadamente la conexión de los módulos y sus componentes.

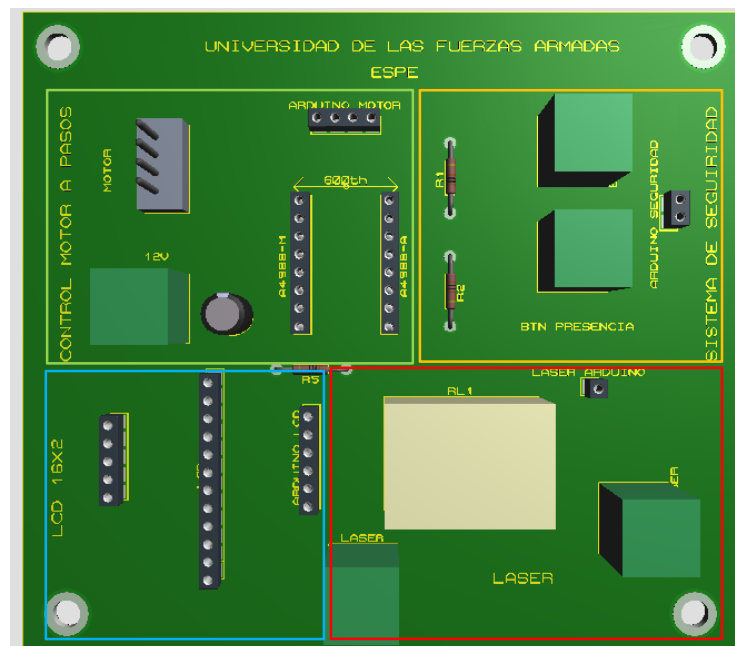


Fig. 75. Vista 3D simulada de la placa.

3.7. Módulo 5. Interfaz

Para completar el diseño es necesario implementar una interfaz con el usuario HMI, en la cual debe representarse ordenada y ergonómicamente la información y objetos interactuantes con el usuario. La interfaz inicialmente propuesta se observa en la siguiente Fig. 76. La cual cuenta con un encabezado de presentación; a la derecha se dispone de un área de check list para configurar la calidad de escaneo; debajo se cuenta con dos botones, uno para iniciar el proceso de escaneo y otro para para el proceso en cualquier momento; a la derecha se ilustra dos ventanas las cuales mostraran en tiempo real el perfil láser generado sobre el objeto y la nube de puntos calculada.



Fig. 76. Interfaz de usuario-primer concepto

La interfaz está desarrollada de igual manera por un medio libre con el software Qt Designer. Este programa cuenta con un entorno gráfico de diseño similar a *Visual Basic* que genera un código XML y mediante un algoritmo puede ser convertido a código que pueda ser interpretado por Python, mediante la ejecución de la librería PyQt4 (PyQT, 2016).

Adicionalmente se implementará un HMI en la cabina (Fig. 77), la cual consiste en un display LCD 16×2 que nos indique el estado de la máquina y el progreso del proceso de escaneado. También se acoplará un botón de pausa por cualquier eventualidad que se registre durante el proceso.



Fig. 77. Interfaz humano máquina de la cabina.

3.8. Concepto final

El diseño del concepto se realizó de tal manera para que cada uno de sus bloques funcionales se organice en módulos; con ello se facilita el armado, distribución, mantenimiento, adaptabilidad y escalabilidad del prototipo de escáner 3D de bajo costo. Adicionalmente se requiere que el producto sea visualmente estético y ergonómico. En la Fig. 78 se muestra el modelo CAD correspondiente al concepto final.

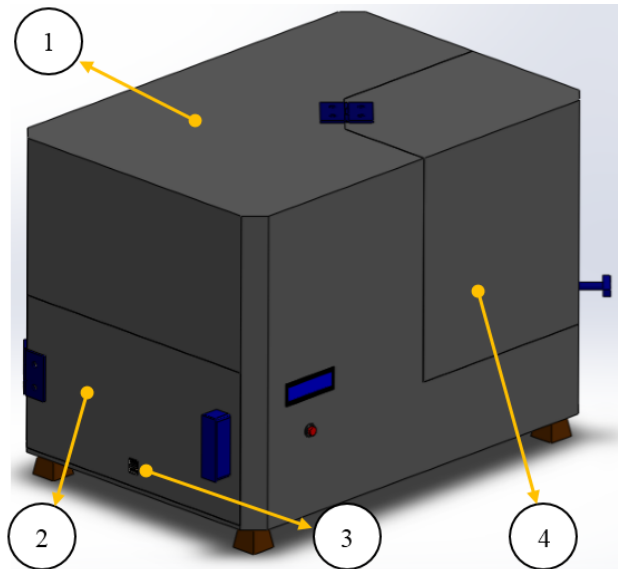


Fig. 78. Concepto final del prototipo escáner 3D de bajo costo.

En la Fig. 79 a continuación se ilustra los componentes internos del concepto final del escáner 3D de bajo.

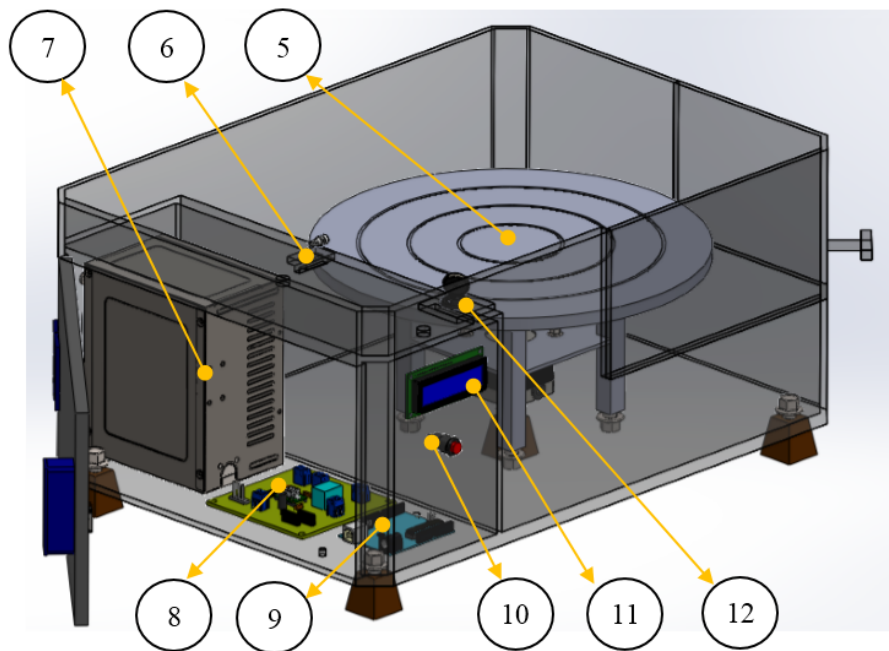


Fig. 79. Componentes internos del prototipo escáner 3D de bajo costo.

La Tabla 15 describe los componentes anteriormente enumerados.

Tabla 15
Descripción de componentes y módulos

Numeración	Descripción	Módulo
1	Cabina	Cabina
2	Puerta de mantenimiento	Potencia y control
3	Puertos USB	Potencia y control
4	Tapa del escáner	Cabina
5	Mesa de rotación	Mesa de rotación
6	Emisor láser lineal	Escáner
7	Fuente de alimentación	Potencia y control
8	Placa de control	Potencia y control
9	Arduino UNO	Potencia y control
10	Botón de Pausa	Potencia y control
11	LCD 16x2	Potencia y control
12	Webcam	Escáner

La conexión entre los componentes interactuantes se ven en Fig. 80 a continuación:

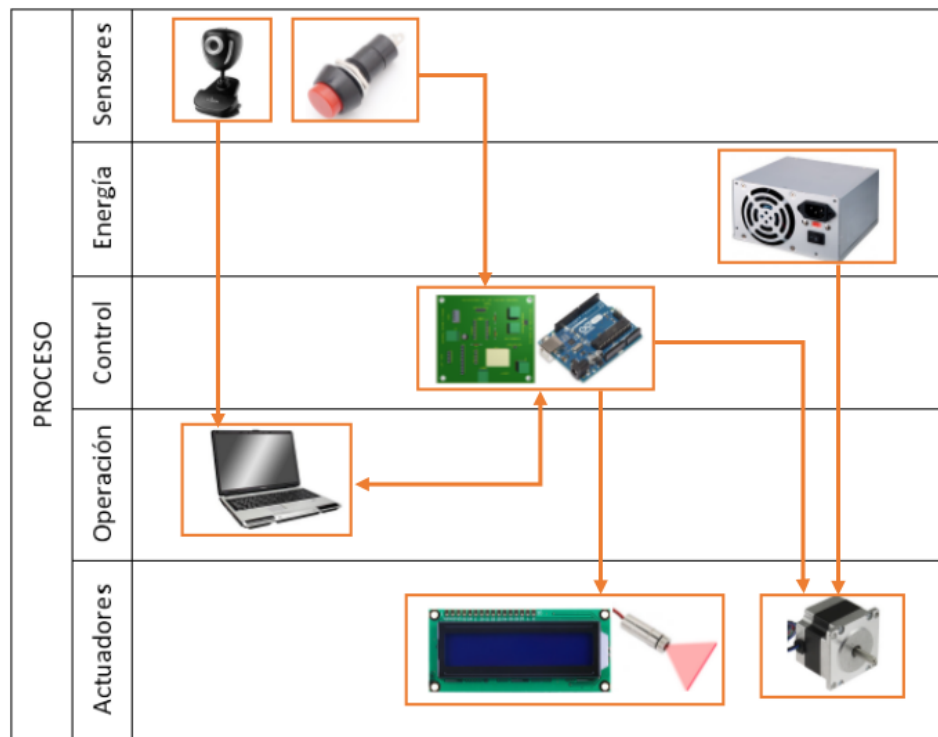


Fig. 80. Diagrama de interacción de componentes.

3.9. Resumen

- En el presente capítulo se detalló un método estructurado para diseño de sistemas mecatrónicos (Ulrich & Eppinger, 2013), el cual se usó para establecer el concepto final del prototipo escáner 3D de bajo costo. Se empezó por reconocer las necesidades que los posibles usuarios requieren sobre el producto, por lo cual se desarrolló una matriz QFD (Fig. 43) que relaciona las necesidades con las especificaciones técnicas del prototipo. La finalidad de la matriz es de dar calidad al diseño en base a la importancia ponderada de cada especificación.
- Al tratarse de un producto mecatrónico donde se abarca varias disciplinas de la ingeniería como la electrónica, mecánica y control, es conveniente dividir el sistema en varios módulos. Cada módulo tendrá uno o varios subsistemas dependiendo de su complejidad, de esta manera se facilita el desarrollo del diseño en general. En la Tabla 4 se detalla la división de módulos y subsistemas.
- El módulo Mesa de rotación se divide en dos subsistemas, uno llamado rotación en el cual se realizó una selección del actuador más adecuado entre motor DC, motor a pasos y servomotor; siendo el motor a pasos el selecto que posteriormente se dimensiono mediante un análisis dinámico. El segundo llamado Estructura mesa se encarga de dar soporte al objeto por lo que se centra en la selección de materiales y el desarrollo de un análisis estático para garantizar la resistencia del plato y mesa.
- El módulo cabina detalla las consideraciones de diseño que debe tener como: Dimensionamiento, material y distribución. Realizada la matriz de selección se determinó al acrílico como material debido a su costo y facilidad de manufactura. Para garantizar su resistencia se realizó también un análisis estático.
- El módulo Escáner describe el sensor óptico a implementarse, siendo la webcam la seleccionada frente a una cámara de uso industrial debido principalmente al factor económico. Luego se indica cómo transformar el haz de luz láser de punto a una línea. Tiene dos subsistemas; el uno de nombre

Adquisición de datos que despliega el procedimiento que sigue el módulo desde que realiza la primera captura de imagen hasta que se ha generado la nube de puntos; el segundo detalla cómo debe tratarse la nube de puntos para realizar la reconstrucción superficial del objeto escaneado.

- El módulo Potencia y control inicia con la selección del controlador que se encargará de la automatización del prototipo, el arduino UNO fue el seleccionado frente al PIC16F877A debido a su facilidad de implementación. Conjuntamente se diseñó la placa de control en un programa de diseño esquemático para su posterior exportación a PCB, dicha placa tiene las funciones de comunicación con el ordenador, control del motor, interfaz LCD y seguridad.
- El módulo Interfaz ilustra dos HMI's, el que tendrá el usuario en el ordenador para manipular al prototipo y el que va en la cabina mediante un LCD para indicar el estado y progreso del proceso de escaneo.
- En el concepto final cada módulo queda lo suficientemente detallado para empezar con la etapa de construcción, la cual durante su proceso dará a conocer si se requiere agregar o quitar algún estatuto de diseño si el sistema lo requiere.

Capítulo 4

Construcción y pruebas

El capítulo presenta el proceso de manufactura, implementación de elementos normalizados, instalación de componentes electrónicos y ensamble de los diferentes módulos que conforma el prototipo escáner 3D de bajo costo. Finalmente se detalla las pruebas realizadas en el prototipo y sus respectivos resultados.

4.1. Plato giratorio

Es el encargado de dar soporte al objeto a escanear. En el proceso de diseño se determinó la madera como material de este elemento, el mecanizado se lo realizó con la ayuda de un maestro carpintero.

4.1.1. Corte

Se utilizó una plancha MDF (aglomerado de fibras de madera) de 15mm de espesor para cortar el plato en una ingletadora como se detalla en la Fig. 81 Con la ayuda de un taladro de mano se realizó la perforación en el centro del plato que seguidamente se limo a mano consiguiendo su forma cuadrada. Para dar rugosidad a la superficie de contacto con el objeto se pegó una lija. Finalmente se dio un acabado superficial mediante la aplicación de pintura negra.



Fig. 81. Plato giratorio: (a) Elemento cortado (b) Elemento terminado.

4.2. Acople

Como su nombre lo indica es el elemento que permite el acople entre el plato giratorio y el eje para transmitir el movimiento rotatorio del motor. Se usó una barra de $\varnothing 25,4 \text{ mm}$ de acero A36.

4.2.1. Maquinado

El acople fue maquinado en el Laboratorio de Procesos de Manufactura. Un tocho fue cortado con la sierra eléctrica y sus caras circulares se rectificaron en el torno hasta lograr la longitud deseada. Se prosiguió con el fresado del prisma cuadrado que servirá de acople con el plato giratorio con un ajuste H7/h6 para asegurar un buen apriete y que permita un rápido ensamble. Como último paso se rosco la cara circular inferior facilitando así su conexión con el eje. El proceso puede observarse a continuación en la Fig. 82 y en la hoja de procesos descrita en el Anexo D.

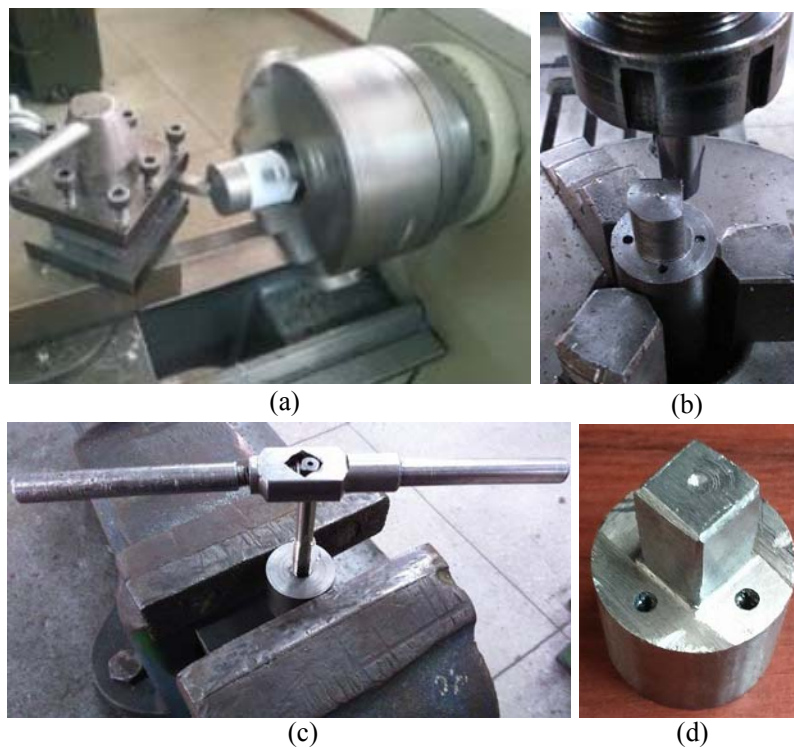


Fig. 82. Maquinado del acople; (a) torneado, (b) fresado, (c) Roscado y (d) acople terminado.

4.3. Eje

Componente transmisor de par torsor que permite la conexión del acople con el motor a pasos. El material designado para su fabricación fue acero A36.

4.3.1. Maquinado

El eje fue maquinado en el Laboratorio de Procesos de Manufactura. Se cortó un cilindro de la longitud especificada que posteriormente fue cilindrado en el torno hasta obtener el diámetro deseado. Por último se roscó uno de sus lados por la profundidad de la rosca del acople como se ve en la siguiente Fig. 83, adicionalmente se describe su proceso de manufactura en el Anexo D.

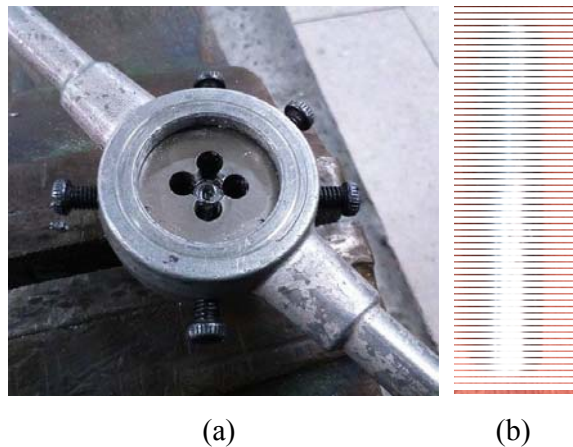


Fig. 83. Eje: (a) Roscado (b) Pieza terminada.

4.4. Cabina

Estructura donde incorpora todos los módulos. El material seleccionado para su construcción fue el acrílico por lo que se realizó de la compra de dos medias planchas de $2,4 \times 1,2 \text{ m}$ con espesores de 3 mm y 5 mm respectivamente.

4.4.1. Corte Láser

Se utilizó la tecnología de corte láser CNC (Control Numérico Computarizado) para dar forma a las diferentes partes que conforman la cabina. El proceso de corte y las piezas cortadas listas para el ensamble se pueden observar en la siguiente Fig. 84.

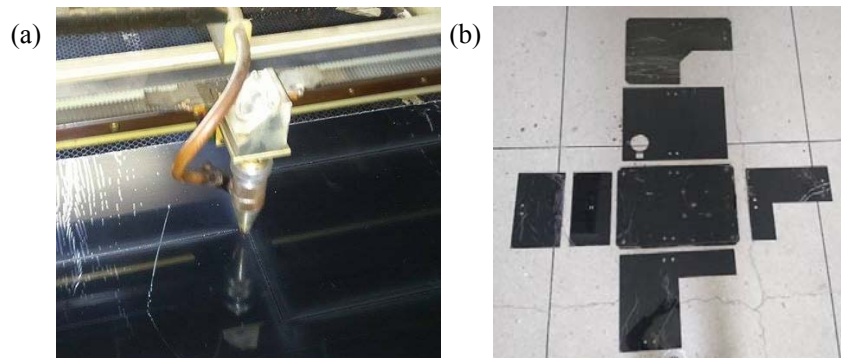


Fig. 84. Corte láser del acrílico; (a) Proceso de corte, (b) Piezas de la cabina.

4.4.2. Ensamblaje

La unión de las piezas se la realizo mediante la aplicación de cemento acrílico en las superficies de sujeción. El cemento acrílico es un líquido que disuelve ligeramente el acrílico y forma una especie de soldadura plástica. En la Fig. 85 se muestra la aplicación del líquido con una jeringa.



Fig. 85. Proceso de pegado de acrílico.

Finalmente en la Fig. 86 se puede observar el ensamble parcial de la cabina y en la Fig. 87 el ensamble final, los ensambles se ilustran en el Anexo C.



Fig. 86. Cabina: Ensamble parcial.

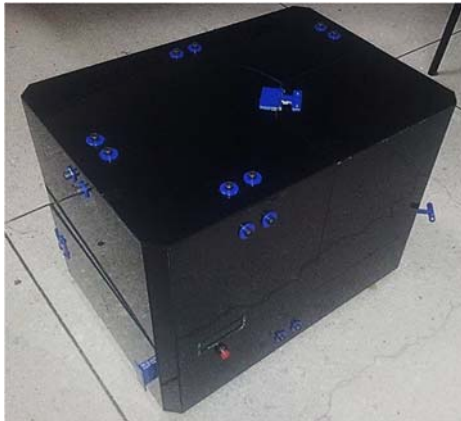


Fig. 87. Cabina: Ensamble final.

4.5. Mesa

Estructura de soporte del plato giratorio y del motor. Esta construido con tubo estructural cuadrado ASTM A-500 de $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$ y plancha laminada al frio ASTM A366 de $1,9 \text{ mm}$ de espesor.

4.5.1 Partes manufacturadas

Las cuatro barras de tubo estructural se cortaron con una sierra de mano y corregidas puliéndolas en la amoladora de banco. Las dos placas de plancha laminada se cortaron con cizalladora. Por ultimo haciendo uso del taladro de banco se perforo las placas con los diámetros necesarios para el paso del eje, acople del motor y sujeción del rodamiento. La hoja de proceso de detalla en el Anexo D y el resultado de manufactura se ilustra a continuación en la Fig. 88.

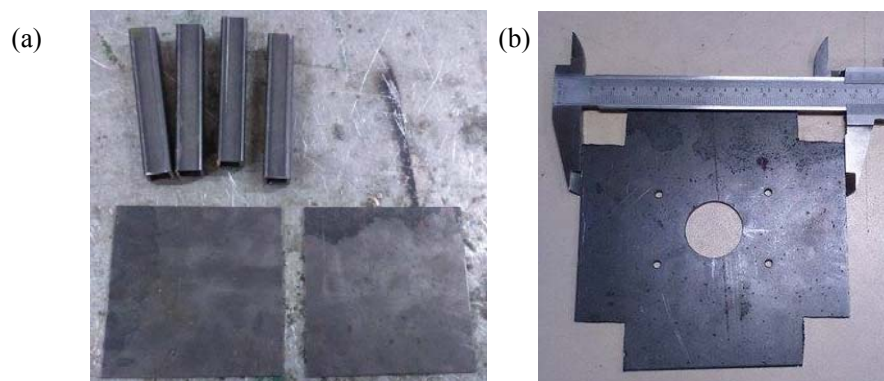


Fig. 88. Mesa: (a) piezas cortadas, (b) Calibración.

4.5.2. Ensamblaje

Se efectuó el ensamble (Anexo C) aplicando un proceso de soldadura por arco SMAW con electrodo 6011 y el resultado se observa en la Fig. 89. Adicionalmente se soldó en cada pata de la mesa un perno M6 para su sujeción a la cabina.



Fig. 89. Ensamble de la mesa.

Para completar el ensamble final de la mesa (Anexo C) se adaptó el plato giratorio, rodamiento, acople y eje como se ve en la Fig. 90.



Fig. 90. Ensamble subconjunto plato giratorio.

Por último se acoplo el ensamble anterior a la mesa conjuntamente con el motor y su acople flexible (Anexo C). La Fig. 91 muestra el resultado final.

4.6.2. Elaboración de la placa

Posteriormente mediante transferencia térmica fueron pegadas en la baquelita los diseños PCB. Haciendo uso de ácido férrico o también conocido como cloruro férrico se efectuó un proceso corrosivo en la superficie de cobre de la baquelita en donde únicamente se mantendrá este material en las áreas que estén protegidas por las pistas pegadas. Por ultimo como se observa en al Fig. 93 se colocaron todos los elementos electrónicos en la placa y fueron soldados por cautín con estaño como material de aporte.

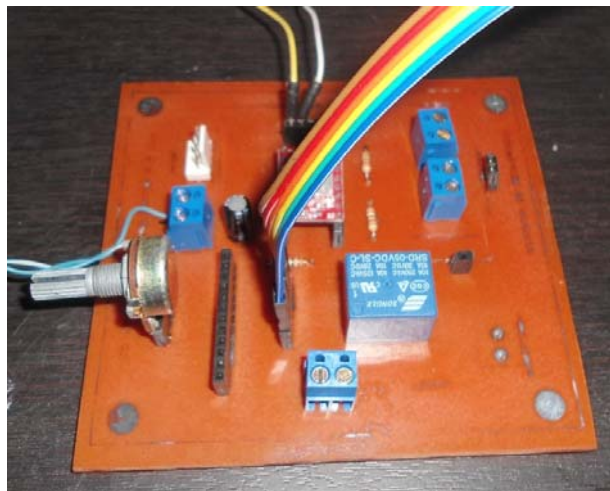


Fig. 93. Placa de control terminada.

4.6.3. Interfaz LDC 16x2

Paralelamente se desarrolló también la soldadura de los cables en el display LCD 16x2 que irán conectados a la placa de control y para comprobar su funcionamiento se realizó una prueba de interfaz como se puede apreciar en la Fig. 94.



Fig. 94. LCD 16x2: (Izq.) Conexión y (Der.) Funcionamiento.

La distribución de los elementos electrónicos anteriormente descritos dentro de la cabina se detalla en la Fig. 95 a continuación.

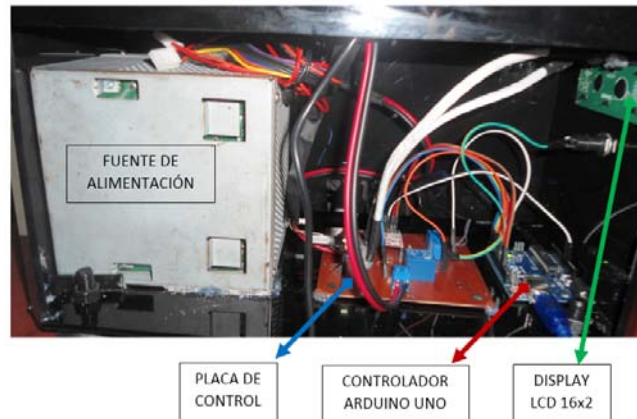


Fig. 95. Distribución elementos electrónicos.

4.7. Módulo escáner

4.7.1. Láser lineal y calibración con la webcam

El láser lineal es el dispositivo encargado de generar un haz de láser lineal de color rojo sobre la superficie del objeto que se desea escanear. Su difícil adquisición en el mercado nacional hizo necesaria su fabricación a partir de un diodo láser y un lente cilíndrico de vidrio como se ven en la Fig. 96.



Fig. 96. Conversión láser puntero a línea.

El resultado de la construcción fue aceptable teniendo un haz láser lineal de fuerte intensidad como se observa en la Fig. 97 a continuación. La localización del láser lineal se la realizo de tal forma que se encuentre calibrado al centro de la cabina y con su haz de luz perpendicular al suelo.

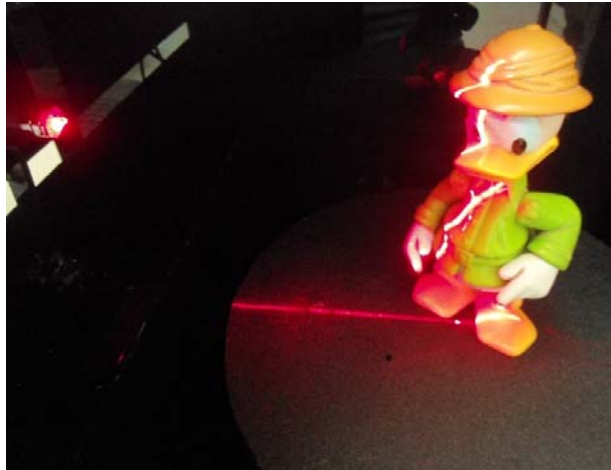


Fig. 97. Láser lineal-funcionamiento.

4.7.2. Láser Lineal y calibración con la webcam

Conjuntamente con la calibración del láser se calibra la cámara. Como se observa en la Fig. 98 por métodos de visión artificial se dibujaron en la captura de la webcam líneas de color rojo que deben ser paralelas al haz de luz láser y otra que sea colineal con el centro de la mesa de rotación y centro de la imagen.



Fig. 98. Calibración de la webcam.

4.8. Interfaz Humano-Máquina

El desarrollo de la HMI fue dirigido bajo librería libre de QT versión 4 para Python. Con la ayuda de QT designer se creó la ventana de control en un ambiente gráfico, que posteriormente será traducida a código HTML y por medio de un comando en el terminal transformado a código Python listo para usarse.

La ventana de la Fig.99 se enfoca en dar un fácil manejo de la interfaz al usuario de forma amigable y ergonómica. Consta de las siguientes partes:

1. Encabezado y presentación.
2. Configuración de parámetros de escaneo.
3. Prueba de módulos.
4. Inicio de proceso de escaneo.
5. Visualización en tiempo real del objeto escaneado.

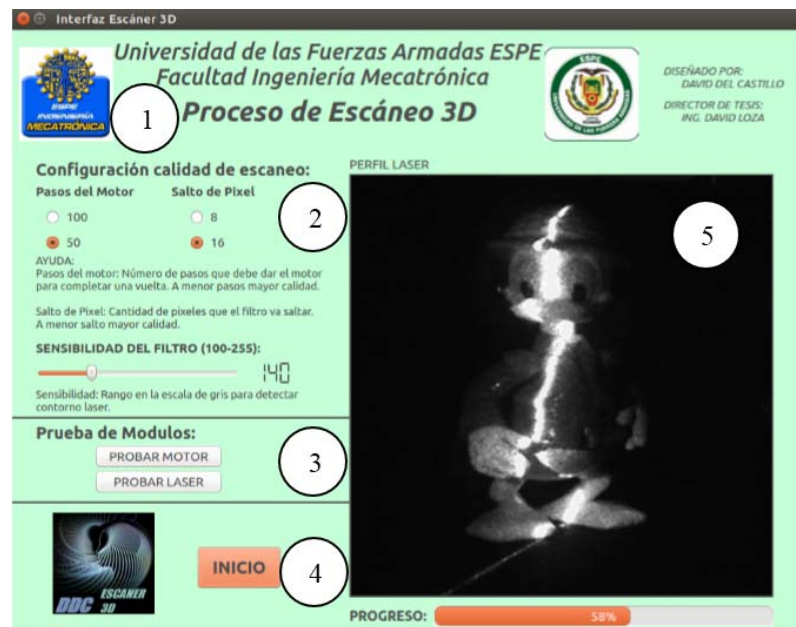


Fig. 99. HMI final del prototipo escáner 3D de bajo costo.

4.9. Pruebas y resultados

Conforme se finaliza la etapa de construcción se busca la calibración y robustecimiento de los parámetros que rigen el algoritmo de triangulación espacial detallado en el capítulo anterior, donde la matriz bidimensional de cada captura de la webcam se segmenta para obtener los puntos del contorno del objeto y llevarlos a un entorno tridimensional.

Se evaluará porcentualmente los errores de cada parametrización comparando el dimensionamiento de la nube de puntos del objeto escaneado con el dimensionamiento real del mismo.

4.9.1. Primera evaluación dimensional

La primera prueba se realizara con los parámetros iniciales obtenidos durante el proceso de diseño del cálculo de triangulación espacial (Ec. 3.11). El objeto de prueba es un cilindro (Fig. 100) de $\varnothing 65\text{mm}$ y $48,5\text{ mm}$ de altura.



Fig. 100. Primer objeto de prueba (cilindro).

En la Tabla 16 se ilustra la vista frontal de la nube de puntos correspondiente al primer objeto de prueba, donde a simple vista se puede observar claramente que las dimensiones tanto de diámetro como altura del cilindro no se asemejan a las reales, por tal motivo los parámetros de triangulación espacial necesitan calibración.

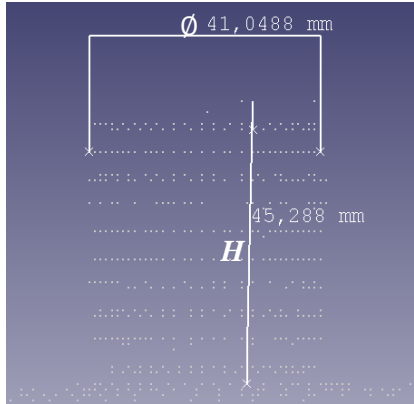
El error porcentual es un indicador cuantitativo de la comparación entre las dimensiones reales y las escaneadas, ilustrará el grado de satisfacción de los resultados, esperando obtener un error inferior al 5%. Para su cálculo se utilizara las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{|V_{teorico} - V_{experimental}|}{V_{teorico}} \quad (4.1)$$

Entonces el error porcentual es:

$$E\% = E \times 100 \quad (4.2)$$

Tabla 16
Primera prueba

OBJETO ESCANEADO	Dimensiones	
	\emptyset	H
	41,05 mm	45,29 mm
ERROR	$E = \frac{ 65 - 41,05 }{65}$ $E = 0,3685$ $E\% = 36,85\%$	$E = \frac{ 48,5 - 45,29 }{48,5}$ $E = 0,0661$ $E\% = 6,61\%$

4.9.2. Segunda evaluación dimensional

Visto que los errores en la primera evaluación son elevados, se efectuará una corrección al valor Kp (coeficiente de proporcionalidad), con el fin de mejorar los resultados. A continuación se indica el cálculo de corrección Kp' el cual está basado en una regla de tres.

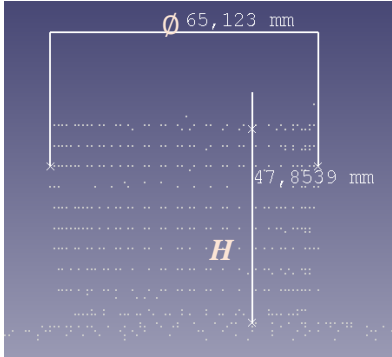
$$Kp' = \frac{V_{teorico} * Kp}{V_{experimental}} \quad (4.3)$$

$$Kp' = \frac{48,5 * 0,3}{45,29}$$

$$Kp' = 0,31$$

Con el nuevo valor aplicado al sistema, se efectúa nuevamente el proceso de escaneado y se obtiene los siguientes resultados indicados en la Tabla 17.

Tabla 17
Segunda prueba-cilindro

OBJETO ESCANEADO	Dimensiones	
	\emptyset	H
	65,12 mm	47,85 mm
ERROR	$E = \frac{ 65 - 65,12 }{65}$ $E = 0,0018$ $E\% = 0,19\%$	$E = \frac{ 48,5 - 47,85 }{48,5}$ $E = 0,0134$ $E\% = 1,34\%$

La prueba también se realizará sobre un envase de shampoo (Fig. 101), el cual es de un tamaño mayor al cilindro anterior y tiene una forma ligeramente más compleja. Se ejecuta el escaneo para medir el error producido con un objeto diferente.

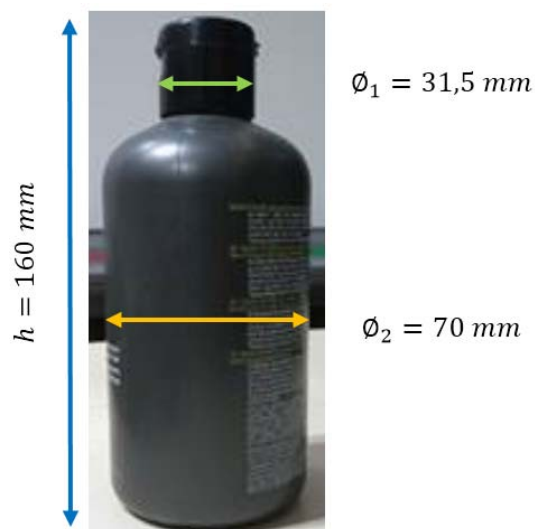
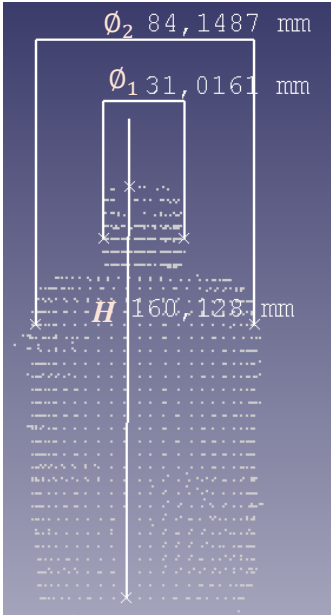


Fig. 101. Segundo objeto de prueba (envase de shampoo).

Los resultados obtenidos después de escanear el envase de shampoo pueden observarse en la Tabla 18.

Tabla 18
Segunda prueba-envase de shampoo

OBJETO ESCANEADO	Dimensiones		
	\varnothing_1	\varnothing_2	H
	31,02 mm	84,15 mm	160,13 mm
ERROR	$E = \frac{ 31,5 - 31,02 }{31,5}$ $E = 0,0152$ $E\% = 1,52\%$	$E = \frac{ 70 - 84,15 }{70}$ $E = 0,2021$ $E\% = 20,21\%$	$E = \frac{ 160 - 160,13 }{160}$ $E = 0,0008$ $E\% = 0,08\%$

La prueba con el cilindro no presento ningún problema, pero en el caso del envase de shampoo se puede ver que el diámetro mayor presenta un error muy alto, por lo que al parecer el valor Kp no sería constante sino más bien variable y dependiente del espaciamiento que tiene el punto de contorno con la línea centro de la imagen.

4.9.3. Tercera evaluación dimensional

Como en la anterior prueba se dedujo que el coeficiente Kp es variable, se encontrará la manera de relacionar la variación con el valor de la coordenada en “x”

de cada punto de contorno. Se empezará por analizar qué valor debería tener Kp según el posicionamiento del punto, teniendo como resultado la Fig. 102.

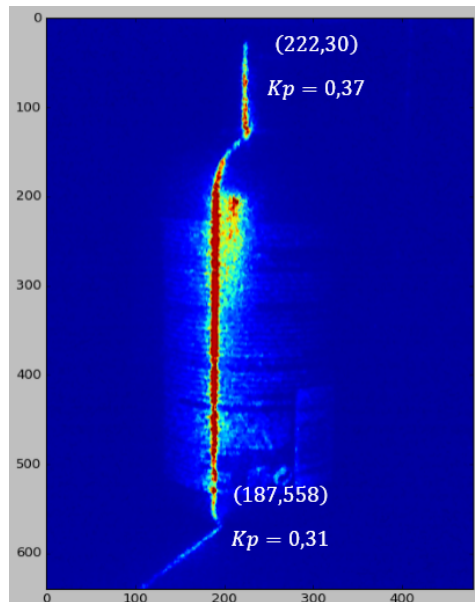


Fig. 102. Valor del Kp según la posición del punto de contorno.

El siguiente algoritmo fue obtenido según las anteriores consideraciones:

$$Kp'' = Kp' \left(\frac{x}{187} \right) \quad (4.4)$$

Donde x es el valor de la coordenada en “x” del punto de contorno.

Se comprueba despejando la anterior ecuación con las dos coordenadas de la Fig. 102.

Para $x = 187$

$$Kp'' = 0,31 \left(\frac{187}{187} \right)$$

$$Kp'' = 0,31$$

Para $x = 222$

$$Kp'' = 0,31 \left(\frac{222}{187} \right)$$

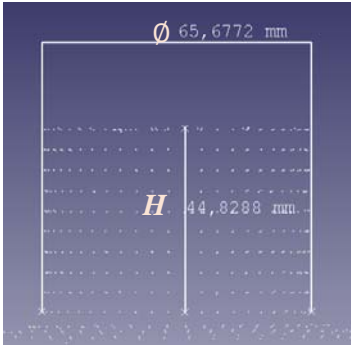
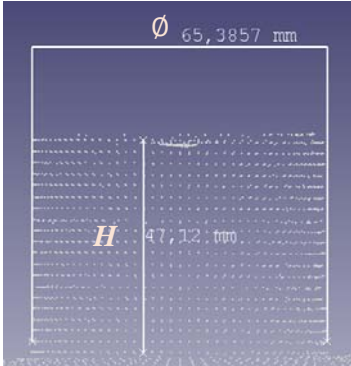
$$Kp'' = 0,368$$

Los valores obtenidos son satisfactorios y son validados para continuar con la siguiente evaluación.

Una tercera evaluación será procesada para constatar que los errores previos han sido debidamente corregidos. Se utilizará dos tipos de calidad de escaneo: Baja (N° pasos = 50 y salto px = 16) y Alta (N° pasos = 100 y salto px = 8).



Primero se escaneará el cilindro y los resultados se observan en la Tabla 19.

Tabla 19
Tercera prueba-cilindro

CILINDRO CALIDAD BAJA	Dimensiones	
	\emptyset	H
	65,68 mm	44,83 mm
ERROR	$E = \frac{ 65 - 65,68 }{65}$ $E = 0,0105$ $E\% = 1,05\%$	$E = \frac{ 48,5 - 44,83 }{48,5}$ $E = 0,0757$ $E\% = 7,57\%$
CILINDRO CALIDAD ALTA	Dimensiones	
	\emptyset	H
	65,39 mm	47,12 mm
ERROR	$E = \frac{ 65 - 65,39 }{65}$ $E = 0,006$ $E\% = 0,6\%$	$E = \frac{ 48,5 - 47,12 }{48,5}$ $E = 0,0285$ $E\% = 2,85\%$

Los errores en el cilindro disminuyeron significativamente, aún más cuando se trata del proceso de escaneo en alta calidad. Ahora en la Tabla 20 se muestra los resultados obtenidos con el envase de shampoo.

Tabla 20
Tercera prueba-envase de shampoo

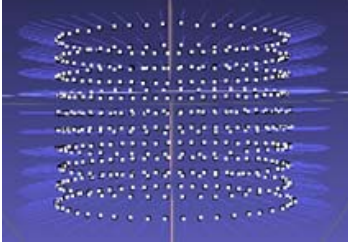
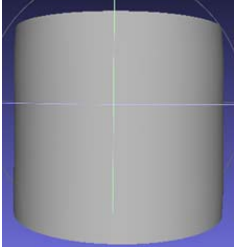
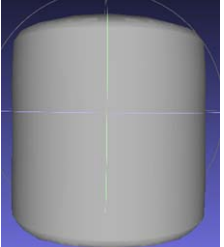
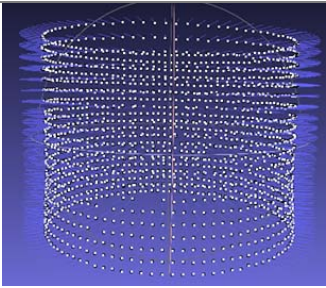
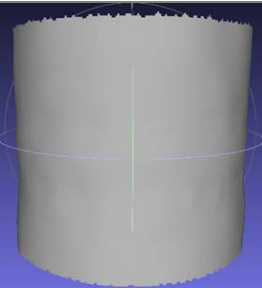
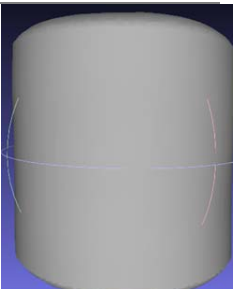
ENVASE SHAMPOO BAJA CALIDAD	Dimensiones		
	\varnothing_1	\varnothing_2	H
	31,92 mm	70,29 mm	159,45 mm
ERROR	$E = \frac{ 31,5 - 31,92 }{31,5}$ $E = 0,0133$	$E = \frac{ 70 - 70,29 }{70}$ $E = 0,0041$	$E = \frac{ 160 - 159,45 }{160}$ $E = 0,0034$
	$E\% = 1,33\%$	$E\% = 0,41\%$	$E\% = 0,34\%$
ENVASE SHAMPOO ALTA CALIDAD	Dimensiones		
	\varnothing_1	\varnothing_2	H
	31,41 mm	70,35 mm	159,95 mm
ERROR	$E = \frac{ 31,5 - 31,41 }{31,5}$ $E = 0,0029$	$E = \frac{ 70 - 70,35 }{70}$ $E = 0,005$	$E = \frac{ 160 - 159,95 }{160}$ $E = 0,0003$
	$E\% = 0,29\%$	$E\% = 0,5\%$	$E\% = 0,03\%$

Se ha conseguido exitosamente obtener errores dimensionales inferiores al 5%, por lo que se da por terminada la calibración del coeficiente de proporcionalidad y se da por aprobando la Ec. 4.4.

4.9.4. Reconstrucción superficial

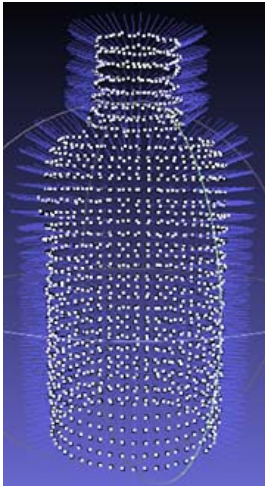

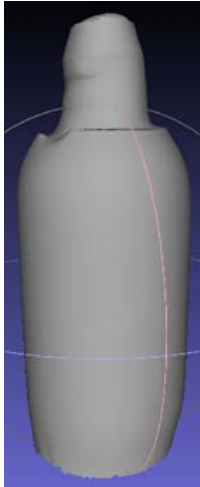



Una vez que los errores dimensionales han sido reducidos, se pasará a la reconstrucción superficial de la nube de puntos de los distintos objetos escaneados. En la Tabla 21 se observa el proceso de mallado superficial del cilindro realizado con el software libre *Meshlab*.

Tabla 21
Reconstrucción superficial-cilindro

Paso	Vectores Normales y suavizado MLS	Reconstrucción superficial: Marching Cubes	Reconstrucción superficial: Poisson
Calidad Baja			
Alta			

De igual forma se realiza la reconstrucción superficial del envase de shampoo, demostrado en la Tabla 22.

Tabla 22
Reconstrucción superficial-envase de shampoo

Paso Calidad	Vectores Normales y suavizado MLS	Reconstrucción superficial: Marching Cubes	Reconstrucción superficial: Poisson
Baja			
Alta			

4.9.5. Comparación de resultados

La Tabla 23 detalla las diferentes ventajas que presenta la calidad de escaneo baja frente a la alta y viceversa.

Tabla 23
Ventajas de la calidad de escaneo

BAJA	ALTA
Rápida respuesta en : <ul style="list-style-type: none"> • Generación de la nube de puntos • Calibración del filtro de color • Visualización de posibles errores 	Mayor número de puntos en la nube. Menor porcentaje de error dimensional. Mejor distribución de los vectores normales a las caras del mallado. Menor dispersión de los puntos en el suavizado MLS.
Menor demanda computacional en procesamiento matemático.	Mayor calidad en la reconstrucción superficial.
Menor demanda computacional en reconstrucción superficial.	Mejor visualización de detalles en objetos de geometría compleja.

4.9.6. Prueba solido complejo

Con esta prueba se intenta llevar al límite las capacidades del prototipo de escáner 3D de bajo costo. Para lo cual se digitalizara un objeto con geometría compleja como el juguete de pato (Fig. 103) y se determinará visualmente que tan semejante es el objeto reconstruido digitalmente comparado con el real (Tabla 24).

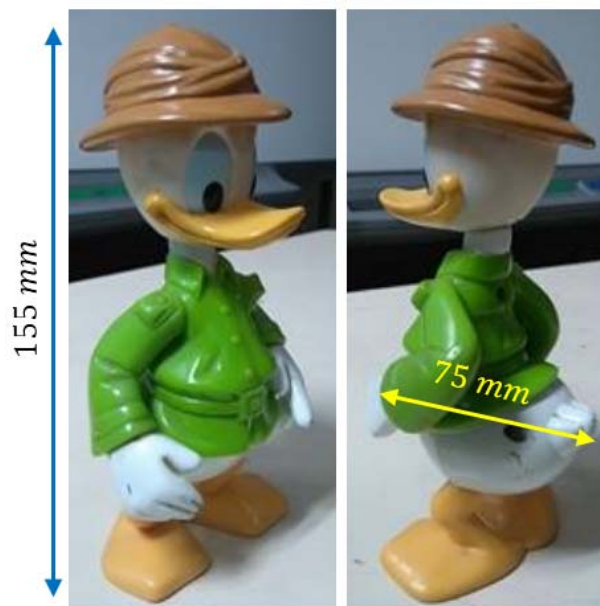
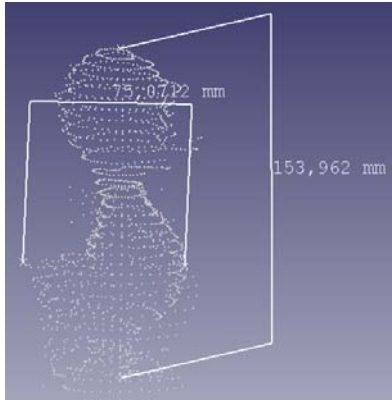
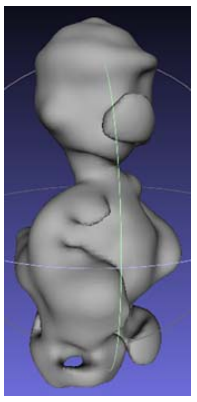
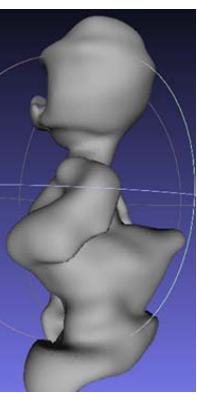
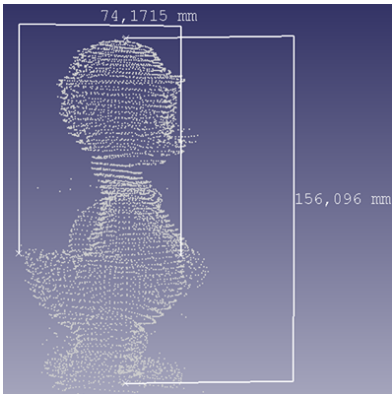
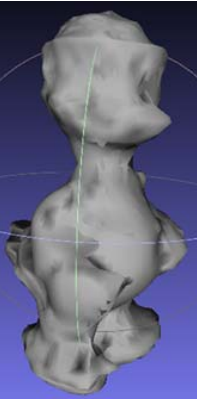
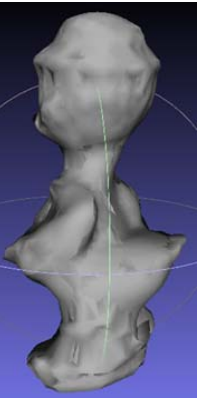


Fig. 103. Juguete de pato.

Tabla 24
Prueba solido complejo

Paso Calidad	Nube de puntos y dimensiones principales	Reconstrucción superficial: Vista frontal	Reconstrucción superficial: Vista posterior
Baja			
Alta			

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, tanto en la calidad baja como en alta se nota una buena distribución de la nube de puntos nube con dimensiones principales similares. En la reconstrucción superficial se observa que detalles como las patas, brazos, cola, pico y ojos del juguete se visualizan con claridad.

La Tabla 25 manifiesta los errores en las dimensiones principales obtenidas del proceso de escaneo del juguete de pato. Siendo valores aceptables.

Tabla 25
Error dimensional porcentual del solido complejo

	Altura	Ancho
Real	155 mm	75 mm
Escaneada	156,1 mm	74,17 mm
ERROR	$E = \frac{ 155 - 156,1 }{155}$ $E = 0,0071$	$E = \frac{ 75 - 74,17 }{75}$ $E = 0,0111$
	$E\% = 0,71\%$	$E\% = 1,11\%$

4.9.7. Prueba de objeto cóncavo-convexo

Se escaneará un cubo de dimensiones detalladas en la Fig. 104 para probar la respuesta de digitalización del prototipo de escáner 3D de bajo costo ante cavidades cóncavas y convexas. El objeto de prueba (Fig. 105) fue impreso en el Laboratorio de Procesos de Manufactura.

En primer lugar se realiza una prueba métrica de las dimensiones del objeto escaneado comparado con el objeto real; el análisis se muestra a continuación en la Tabla 26.

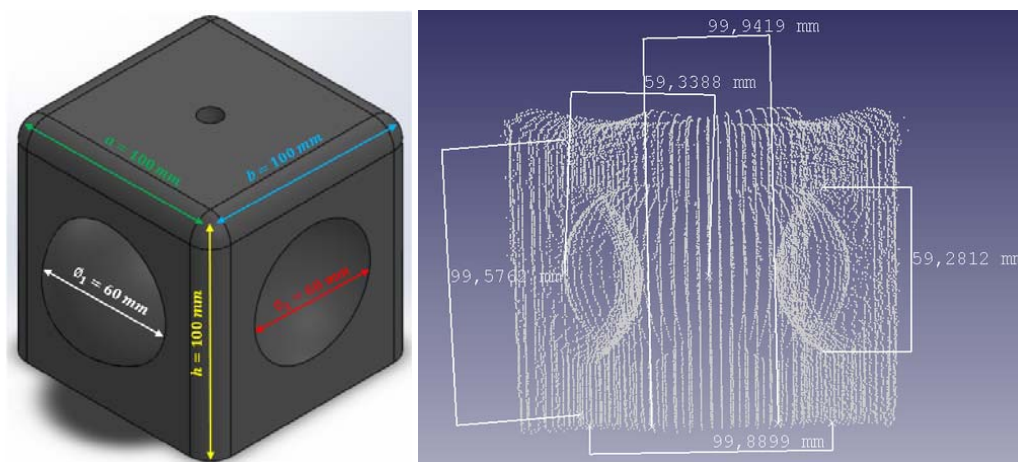



Fig. 104. Prueba dimensional del objeto cóncavo-convexo: Diseño CAD (Izq.) y Nube de puntos (Der.)

Tabla 26
Prueba dimensional objeto cóncavo-convexo

Dimensión	<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ϕ_1	ϕ_2
Real	100 mm	100 mm	100 mm	60 mm	60 mm
Escaneada	99,57 mm	99,89 mm	99,94 mm	59,34 mm	59,28 mm

Continúa 

ERROR	$E = \frac{ 100 - 99,57 }{100}$	$E = \frac{ 100 - 99,89 }{100}$	$E = \frac{ 100 - 99,94 }{100}$	$E = \frac{ 60 - 59,34 }{60}$	$E = \frac{ 60 - 59,28 }{60}$
	$E = 0,0043$	$E = 0,0011$	$E = 0,0006$	$E = 0,011$	$E = 0,012$
	$E\% = 0,43\%$	$E\% = 0,11\%$	$E\% = 0,06\%$	$E\% = 1,1\%$	$E\% = 1,2\%$

Validadas las dimensiones se prosigue con la reconstrucción de la nube de puntos (Fig. 105). El método seleccionado para el mallado es Ball Pivoting por considerarse al objeto de cierta complejidad.

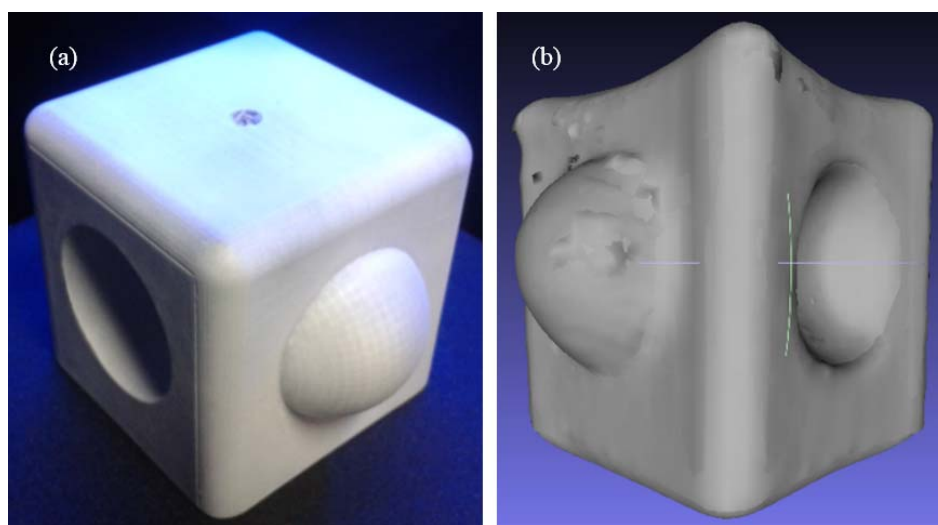


Fig. 105. Prueba de reconstrucción superficial objeto cóncavo-convexo: Pieza impresa (a) y Pieza mallada (b).

Se puede observar claramente que no existe ningún tipo de problema para escanear superficies cóncavas y convexas, salvo ciertas secciones de la cavidad cóncava donde el contorno láser generado no es captado por la webcam.

4.9.8. Prueba de figuras geométricas

La prueba no intenta medir errores dimensionales, sino más bien analizar la respuesta de digitalización del escáner 3D de bajo costo en tres tipos de figuras geométricas: Triángulos, círculos y cuadrados en diferentes tamaños. El objeto de prueba (Fig. 106) es un prisma cuadrado de $50 \times 50 \times 150 \text{ mm}$ que tiene en tres de sus caras verticales las figuras geométricas destinadas para el estudio. Se usa la denominación (Cir.) para los cilindros circulares de dimensión \emptyset , (Tri.) para las

pirámides triangulares (el triángulo base es circunscrito en un círculo de diámetro \emptyset) y (Sqr.) para los cilindros cuadrados de lado l .

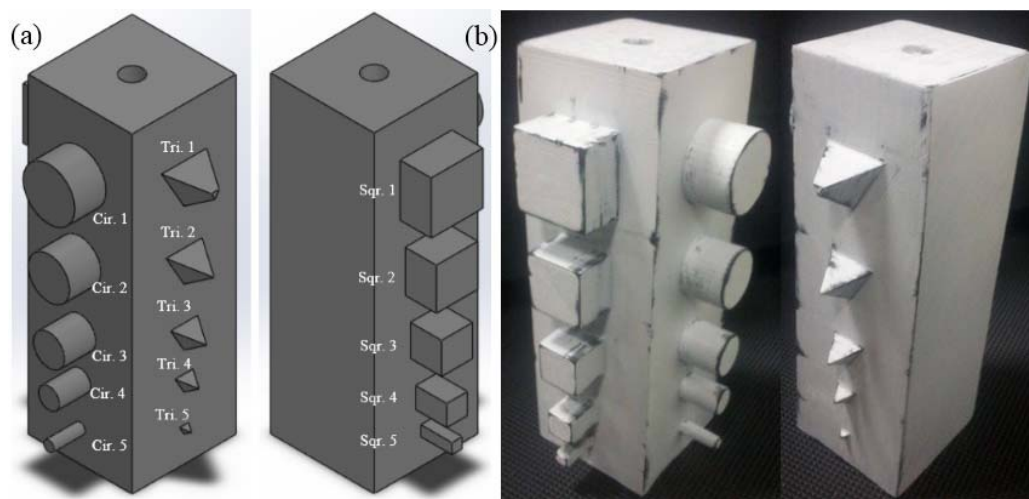
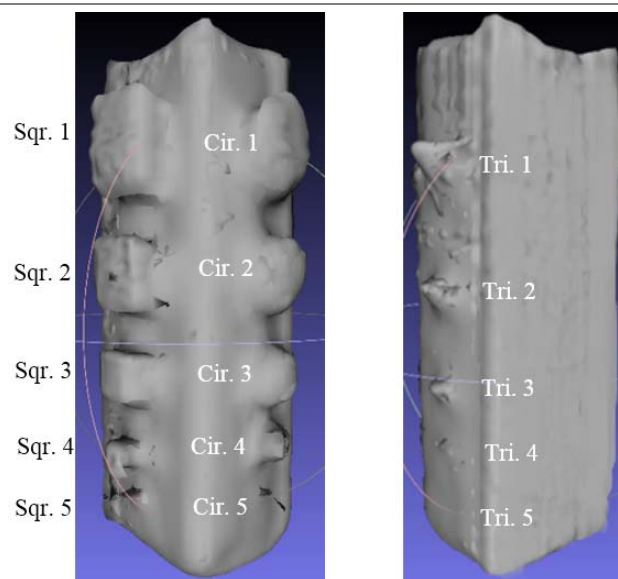


Fig. 106. Prueba de figuras geométricas: Diseño CAD (a) y pieza impresa (b).

En la Tabla 27 se observa el resultado de la reconstrucción superficial del objeto de prueba de figuras geométricas que se realizó mediante el método de Ball Pivoting. Se analiza cada una de las figuras en los distintos tamaños para determinar si son legibles a simple vista o no.

Tabla 27
Resultados de la prueba de figuras geométricas



Continua


Denominación	Dimensión	¿Es legible?
Cir. 1	$\emptyset = 25 \text{ mm}$	SI
Cir. 2	$\emptyset = 20 \text{ mm}$	SI
Cir. 3	$\emptyset = 15 \text{ mm}$	SI
Cir. 4	$\emptyset = 10 \text{ mm}$	A PENAS
Cir. 5	$\emptyset = 5 \text{ mm}$	NO
Tri. 1	$\emptyset = 25 \text{ mm}$	SI
Tri. 2	$\emptyset = 20 \text{ mm}$	SI
Tri. 3	$\emptyset = 15 \text{ mm}$	SI
Tri. 4	$\emptyset = 10 \text{ mm}$	NO
Tri. 5	$\emptyset = 5 \text{ mm}$	NO
Sqr. 1	$l = 25 \text{ mm}$	SI
Sqr. 2	$l = 20 \text{ mm}$	SI
Sqr. 3	$l = 15 \text{ mm}$	SI
Sqr. 4	$l = 10 \text{ mm}$	A PENAS
Sqr. 5	$l = 5 \text{ mm}$	NO

Se puede apreciar que las figuras geométricas más pequeñas son poco o nada legibles, se debe a parámetros de escaneo como el ángulo de paso del motor que no permite obtener los suficientes puntos de contorno para definir con mayor exactitud las figuras; la longitud de onda del láser lineal que debido a su anchura impide una segmentación fina del contorno generado y al salto de pixel que provoca pérdida de información para salvaguardar el rendimiento en la generación de la nube de puntos.

4.9.9. Prueba comparativa

La última prueba compara los resultados obtenidos en el prototipo actual con los dos proyectos previamente desarrollados en la universidad y con un digitalizador 3D de uso industrial. Los ensayos se realizaron en el escáner 3D Roland PICZA LPX-60 (Roland, 2016) del laboratorio CAD/CAM/CAE con los objetos envase de shampoo y el cubo cóncavo-convexo. Los resultados dimensionales se observa en la Tabla 28 y Tabla 29 respectivamente.

Tabla 28
Prueba dimensional PICZA LPX-60 (envase)

ENVASE SHAMPOO	Dimensiones		
	\varnothing_1	\varnothing_2	H
	31,50 mm	69,59 mm	157,79 mm
ERROR LPX-60	$E = \frac{ 31,5 - 31,5 }{31,5}$ $E = 0,00009$ $E\% = 0,009\%$	$E = \frac{ 70 - 69,59 }{70}$ $E = 0,0059$ $E\% = 0,59\%$	$E = \frac{ 160 - 157,79 }{160}$ $E = 0,0138$ $E\% = 1,38\%$
ERROR PROTOTIPO	$E\% = 0,29\%$	$E\% = 0,5\%$	$E\% = 0,03\%$

A simple vista la nube de la digitalización 3D realizada en el escáner LPX-60 tiene un mayor número de puntos, lo cual es un factor importante para definir detalles pequeños. Los errores porcentuales del prototipo comparado con el de uso industrial son semejantes sin sobrepasar el 5% de margen aceptable.

El cubo cóncavo-convexo digitalizado (Fig. 107) tiene una respuesta similar a la prueba anterior donde predomina una mayor cantidad de puntos en la nube y además se registra los puntos en su totalidad de las cavidades cóncavas.

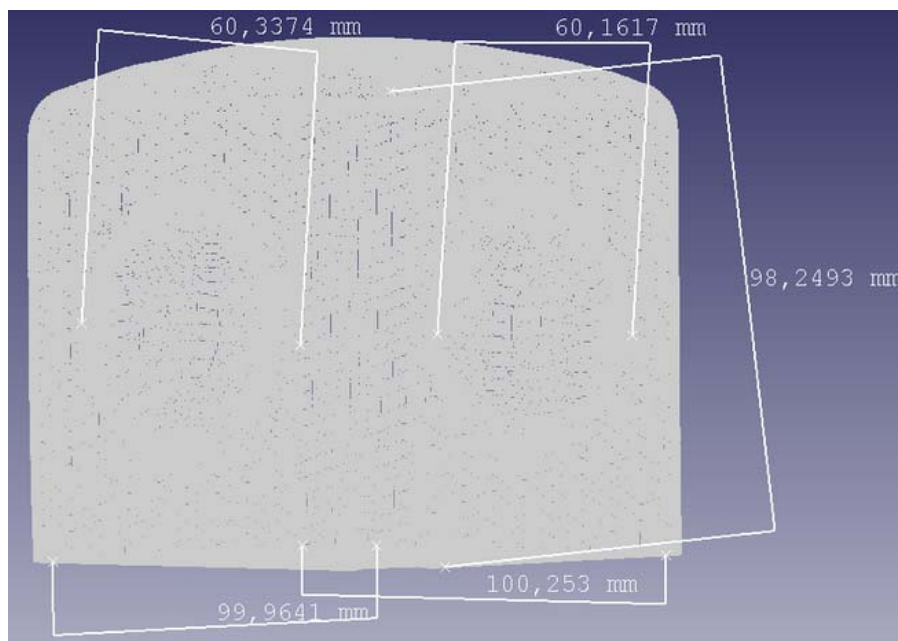


Fig. 107. Nube de puntos cubo cóncavo-convexo (PICZA LPX-60).

Tabla 29

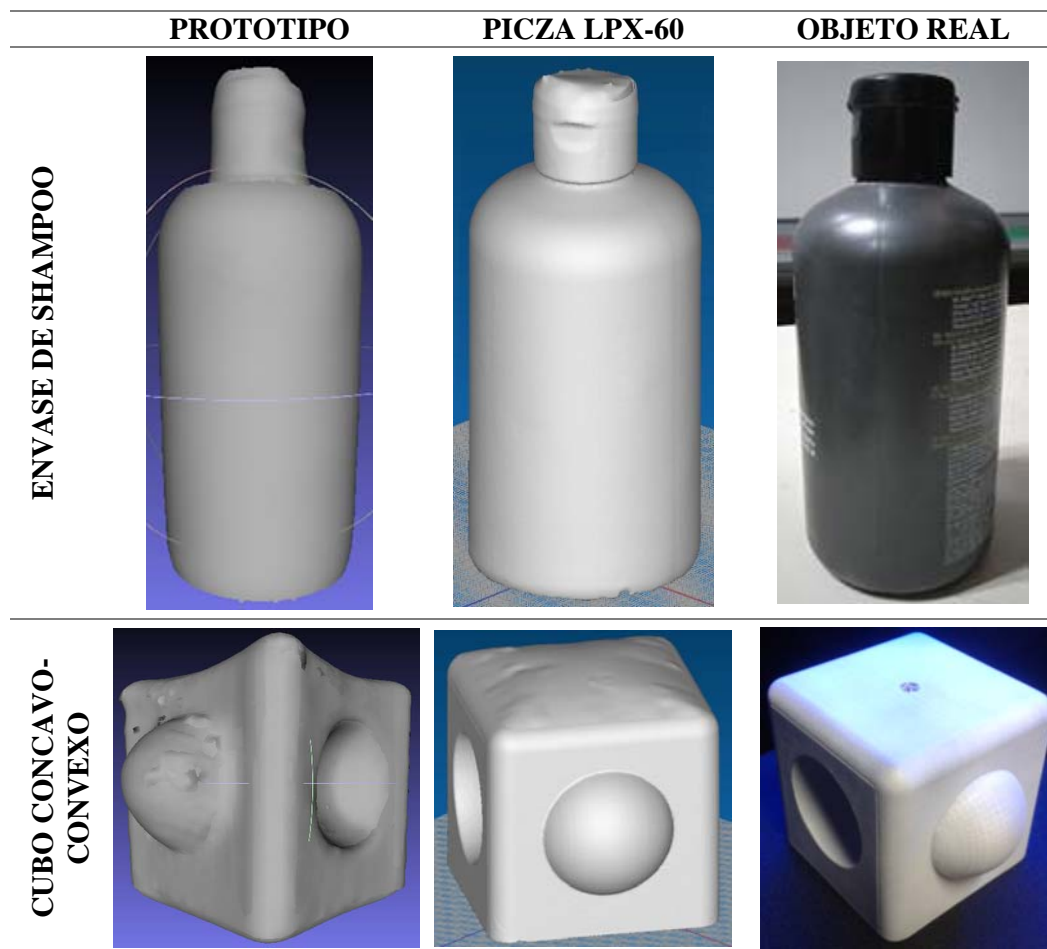
Prueba dimensional PICZA LPX-60 (cubo cóncavo-convexo)

Dimensión	<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ϕ_1	ϕ_2
Real	100 mm	100 mm	100 mm	60 mm	60 mm
Escaneada	98,25 mm	99,96 mm	100,25 mm	60,34 mm	60,16 mm
ERROR LPX-60	$E = \frac{ 100 - 98,25 }{100}$ $E = 0,0175$	$E = \frac{ 100 - 99,89 }{100}$ $E = 0,00004$	$E = \frac{ 100 - 100,2 }{100}$ $E = 0,0025$	$E = \frac{ 60 - 60,34 }{60}$ $E = 0,0057$	$E = \frac{ 60 - 60,16 }{60}$ $E = 0,0027$
	$E\% = 1,75\%$	$E\% = 0,004\%$	$E\% = 0,25\%$	$E\% = 0,57$	$E\% = 0,27\%$
ERROR Prototipo	$E\% = 0,43\%$	$E\% = 0,11\%$	$E\% = 0,06\%$	$E\% = 1,1\%$	$E\% = 1,2\%$

Nuevamente se observa que los errores porcentuales comparados son muy aceptables, lo que da validez al algoritmo de triangulación espacial desarrollado. En cuanto a detalle el escáner LPX-60 presenta una amplia ventaja.

La comparación de reconstrucción superficial del prototipo versus al digitalizador 3D de uno industrial se observa en la Tabla 30. A nivel de forma ambos resultados son muy parecidos, pero a nivel de detalle el LPX-60 define de mejor manera a la tapa del envase de shampoo y a las superficies cóncavas del cubo, llevando una amplia ventaja debido a su número de puntos en la nube que supera 10 a 1 frente al prototipo de bajo costo.

Tabla 30
Cuadro comparativo de reconstrucción superficial



La Tabla 31 muestra comparativamente los principales aspectos del prototipo, los dos digitalizadores previamente desarrollados en la universidad y la maquina PICZA LPX-60.

Tabla 31
Cuadro comparativos entre digitalizadores 3D

	Prototipo	LPX-60	ESPE-L (HIDALGO, 2015)	ESPE-S (Andrés Sosa, 2013)
Error dimensional	< 5 %	< 3 %	< 26,68 %	< 11,33 %
Carga máxima	6 Kg	5 Kg	500 gr	No especifica
Nivel de detalle	Medio	Alto	Bajo	Medio
Tiempo de escaneado	1 min 40 seg	40 min	10 min	10 min

4.10. Análisis económico

Se han obtenido resultados satisfactorios, así que dado por terminado la construcción del prototipo de escáner 3D de bajo costo se realizará un estudio de los gastos realizados durante todo el proyecto.

En la fabricación del prototipo se utilizó materiales eléctricos, electrónicos, mecánicos, etc. La tabla 32 detalla los gastos realizados:

Tabla 32
Costos asumidos durante el proyecto

N°	Artículo	Costo USD
1	Cámara Web	\$ 15.00
2	Láser lineal	\$ 4.00
3	Motor a pasos	\$ 20.00
4	Driver A4988	\$ 4.00
5	Acople flexible	\$ 4.85
6	Acrílico	\$ 58.00
7	Corte láser	\$ 15.00
8	Accesorios	\$ 30.00
9	Arduino UNO	\$ 15.00
10	Pantalla LCD 16x2	\$ 5.00
11	Fuente de poder	\$ 15.00
TOTAL		\$185.85

El costo final aproximado de construcción del proyecto es de \$185.85 dólares, no se ha considerado el ordenador, los insumos que provee la universidad, gastos de manufactura y costos en desarrollo de software. Por otro lado es importante recalcar que el sistema se implementó completamente con software libre, lo cual reduce el costo total significativamente.

4.11. Resumen

- La construcción del prototipo de escáner 3D fue desarrollada en el siguiente orden: Plato giratorio, Acople, Eje, Cabina, Mesa, Placa de control, Módulo escáner e Interfaz Humano Máquina.
- El funcionamiento del prototipo se evalúa mediante 6 etapas. La primera prueba el valor de relación entre pixeles y milímetros (Kp) calculado en el anterior capítulo. La segunda calibra el coeficiente de proporcionalidad (Kp) para mejorar los resultados. La tercera demuestra que (Kp) es variable y se crea un algoritmo para su cálculo. La cuarta realiza la reconstrucción de las nubes de puntos obtenidas del proceso de escaneado del cilindro y envase de shampoo en calidad baja y alta. La quinta compara los resultados obtenidos en los dos tipos de calidad de escaneo. La sexta explora la capacidad de detalle que se puede escanear en un objeto de geometría compleja. La séptima analiza la respuesta de digitalización en un objeto con cavidades cóncavas y convexas. Por últimos la octava prueba describe el nivel de detalle en la reconstrucción superficial de un objeto con tres diferentes figuras geométricas con distintos tamaños.
- Finalmente se desarrolla un análisis económico para garantizar el objetivo principal del proyecto.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

El capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones generadas durante el desarrollo del proyecto diseño y construcción de un prototipo de escáner 3D de bajo costo. Adicionalmente se plantea una serie de recomendaciones para futuras investigaciones.

5.1. Conclusiones

- Se cumplió exitosamente con el objetivo del proyecto, diseñando y construyendo un prototipo de escáner 3D de bajo costo con una inversión aproximada de 185,85 dólares. La implementación tecnológica libre aplicada tanto en hardware como en software es lo suficientemente robusta para la finalidad del proyecto, demostrando que se puede fabricar un escáner 3D con una mínima inversión.
- La información recopilada en los antecedentes, proyectos semejantes realizados en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y en el estado del arte brindo las pautas necesarias para definir las concesiones iniciales de diseño como la aplicación de un emisor láser lineal junto con el método de triangulación espacial para la generación de la nube de puntos, adquisición de datos por una visión artificial y construcción de una estructura rotacional para el objeto. Comparando el presente producto con los dos anteriormente desarrollados en la universidad y el de uso industrial se tiene una gran diferencia en el tiempo de escaneado, se debe a la implementación de un emisor láser lineal que agiliza el proceso de escaneo, siendo de 1min 40seg como máximo para el prototipo actual, 10 minutos para los dos proyectos anteriores en la universidad y 40 minutos para la maquina industrial; la carga que puede soportar también es mayor, siendo de hasta 6 Kg (análisis estático de la mesa rotacional y dinámico del motor) versus los 500 gr que soporta el construido en la ESPE de Latacunga y a los 5 Kg de la maquina industrial; La definición

de escaneado es superior a los dos productos previos de la universidad con un error dimensional menor al 5% versus el 26,68% de la ESPE-L y 11,33% de la ESPE-S, además se puede describir contornos cóncavos y cuenta con una generación de puntos en la nube más amplia; comparado con la maquina industrial se tiene un menor nivel de detalle, las pruebas realizadas presentaron un error dimensional menor al 3% y una cantidad de puntos en la nube mayor de 10 a 1.

- El proceso de selección de las alternativas de solución para el problema del proyecto se aplicó correctamente dando como resultado el diseño final del prototipo. Se guió la selección de las alternativas de cada módulo basándose en el diseño y desarrollo de productos mediante filtros por criterios ponderados. El volumen de trabajo tiene la capacidad para objetos de $16 \times 16 \times 18 \text{ cm}$. Presenta gran precisión de escaneo ($\pm 1,2 \text{ mm}$ de error máximo) gracias a la excelente exactitud del motor a pasos NEMA 23 ($\pm 5\%$ de error no acumulativo por paso completo) que permite el giro de los 360° del objeto con un par torsor de $0,15 \text{ Nm}$. La webcam con una resolución de imagen de 640×480 pixeles junto con el emisor láser lineal (longitud de onda: $1,6 \text{ mm}$) desempeñan un importante papel en la adquisición de datos, generando y digitalizando el contorno del objeto. La placa de control diseñada cumple con los requisitos para automatizar junto con el arduino UNO la rotación del motor, interfaz 16×2 , comunicación y seguridad. El diseño modular facilita la implementación y mantenimiento.
- Para que la construcción del prototipo tenga éxito se la realizo bajo un procedimiento ordenado debidamente documentado como se ve en los planos mecánicos (Anexo C) y las hojas de proceso de las piezas manufacturadas en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” (Anexo D). Se concluye que el prototipo es estético, ergonómico y amigable tanto en la parte física como en el HMI.
- El sistema fue desarrollado exitosamente en software libre (Python 2.7) cumpliendo todos los requerimientos del proyecto. La generación de la nube de puntos se debe al algoritmo de triangulación espacial desarrollado el cual

empieza con la captura y segmentación del contorno generado por el haz láser sobre el objeto; luego por métodos numéricos (Ec. 3.11) se convierte cada punto del contorno de coordenadas (x, y) en coordenadas tridimensionales (x, y, z) ; se da el siguiente paso del motor y así se realiza el bucle por todo los 360° alrededor del objeto. En la interfaz el usuario puede configurar el número de pasos del motor y el número de pixeles que desee que el algoritmo de construcción de la nube de puntos salte, teniendo cuatro posibles combinaciones para la calidad de escaneo; cuenta con dos botones de prueba, uno para el motor y otro para el láser lineal; se dispone también de otro botón para dar inicio al proceso de escaneo 3D; una ventana a la derecha muestra en tiempo real el contorno generado por cada paso que da el motor; todos los componentes de la interfaz están debidamente distribuidos y claramente identificados.

- Los resultados arrojados en la etapa de pruebas son debidamente satisfactorios, obteniendo errores dimensionales menores al 5%. Se debe gracias a que el modelamiento matemático para la triangulación espacial (formada por la webcam, emisor láser lineal y el contorno del objeto escaneado) fue correctamente realizada y también por la concesión de diseño de crear una cabina oscura, que fue de gran ayuda para facilitar el trabajo de visión artificial. La reconstrucción superficial realizada en el software libre *Meshlab* confirma que los métodos de mallado investigados y aplicados tuvieron excelentes resultados para realizar un modelo CAD sobre el objeto escaneado; la reconstrucción realizada en el cilindro y en el envase de shampoo tiene una gran similitud con el objeto real; en el caso del objeto complejo aunque el nivel de detalle no es sobresaliente se puede apreciar con claridad partes físicas como la cabeza, extremidades y cola; la prueba en el objeto cóncavo-convexo demuestra que el prototipo es capaz de escanear este tipo de superficies limitado en algunos casos en secciones cóncavas donde la webcam no puede captar el contorno generado; la digitalización de diferentes tipos de figuras geométricas con distintos tamaños arrojó resultados positivos para dimensiones mayores a 5 mm.

- Finalmente, se concluye que el proyecto será de gran ayuda para el laboratorio de procesos de manufactura, ya que enseña el principio de funcionamiento de un escáner 3D y además se podrá realizar en él experimentos y prácticas de laboratorio relacionados con la ingeniería inversa, prototipado rápido y metrología, motivando así la investigación de los campos técnicos antes mencionados por los estudiantes, docentes y personas afines con el tema.

5.2. Recomendaciones

- Para un producto de mejores prestaciones es recomendable implementar dispositivos de una gama más alta o industrializados que podrían establecer grandes beneficios en cuanto calidad de adquisición de datos respecta; como por ejemplo una cámara de uso industrial (mayor resolución de píxeles) con un lente óptico especializado (eliminación del efecto ojo de pescado) daría una mejor resolución de imagen y calidad de la misma; la configuración del driver del motor puede modificarse para que este dé micro pasos ($1/2$, $1/4$, $1/8$ y $1/16$ de paso); también se podría adaptar un emisor láser con una longitud de onda más fina (635 nm) para reducir el ruido generado por el haz de luz en la superficie del objeto; un ordenador con mejores características en procesador y memoria RAM podría cargar con un mayor número de información (nube de puntos más grandes) y algoritmos de mayor complejidad. En conjunto la aplicación de estas mejoras darían paso a una generación de la nube de puntos más amplia, precisa y exacta pero conllevaría una mayor inversión.
- Se puede profundizar la investigación del tema de digitalización 3D para generar diferentes prototipos de escáner utilizando métodos como: por contacto, tiempo de vuelo, diferencia de fase, holografía conoscópica, luz estructurada, estereoscópico o silueta (Capítulo 2); de esta manera se puede comparar los métodos nombrados y describir las ventajas o desventajas que tengan. De igual forma se recomienda investigar la aplicación de nuevos filtros para reducir la influencia del ruido producto del reflejo láser sobre la superficie del objeto, esto podría disminuir significativamente los errores en la adquisición de datos (ej. filtro *dust* para tratar el efecto de blooming).

- Completar la definición del prototipo con un diseño robusto (Genichi Taguchi) enfocado en la adquisición de datos, donde se alcance la mejor calidad posible en la generación de la nube de puntos (mayor número de puntos posible en la nube) comparado con el rendimiento del ordenador. Las variables responsables de la cantidad de puntos dentro de la nube son el número de pasos del motor, salto de pixel, resolución de la imagen y las variables de rendimiento son velocidad del procesador y la capacidad de memoria RAM; cuantificados robustamente las variables descritas se garantiza la calidad de la nube de puntos y se evita que el proceso de escaneo se sature de información provocando un volcamiento del sistema.
- Construido el prototipo de escáner 3D de bajo costo se puede tener consideraciones de diseño que antes no se podía tener. Se recomienda que los bordes de las piezas de acrílico sean cortadas en forma de dientes rectangulares para facilitar el armado de la cabina como si se tratase de un rompecabezas. Verificar con antelación el articulamiento de piezas móviles como en el presente caso la tapa del escáner, porque durante el diseño no se pudo percatar que la bisagra acoplada limita el movimiento de la tapa, que una vez abierta no puede sostenerse en esa posición por si sola por lo que el usuario debe sostenerla.
- El desarrollo de un sistema conlleva una ardua tarea de programación donde se tiene centenas hasta miles de líneas de código donde generalmente se debe buscar y modificar una determinada parte del programa según se requiera. Por ello es recomendable siempre mantener el orden de las funciones que se vayan generando separándolas por módulos; guardar las variables con cierto indicio de la responsabilidad que mantiene en el sistema; usar clases y objetos para buscar rápidamente las variables que mantengan cierta familiaridad y de ser posible comentar las líneas que requieran cierta aclaración de su contenido. Es fundamentalmente recomendable adicionar una aplicación en la cual se pueda modificar la nube de puntos, caras y superficies para que el usuario pueda reconstruir al objeto manualmente de acuerdo a sus necesidades. Esto es

realmente útil cuando se trata de digitalizar objetos de geometría compleja donde algunos detalles pueden perderse.

- Se recomienda seguir probando al prototipo con diferentes tipos de objetos con distintos tipos de tamaños y geometrías, almacenando la información de posibles problemas en una bitácora que permita el desarrollo de nuevas investigaciones en el campo de la digitalización 3D. El software libre *Meshlab* además de las funciones revisadas en el presente proyecto cuenta con un amplio repertorio de algoritmos para mallado los cuales merecen ser analizados.

Bibliografía

- 3D, A. (2016). Recuperado el 12 de 02 de 2016, de <http://www.artec3d.com>
- 3DPRINT. (2014). *3D Systems Enters the Education Space*. Obtenido de <https://3dprint.com/3056/3d-systems-education-make-digital/>
- Akao, Y. (1993). *Despliegue de Funciones de Calidad*. Prod. Press.
- ALUDENS, E. (2016). *Reverse Engineering*. Obtenido de <http://www.aludens.com/reverse-engineering/>
- Andrés Sosa, K. G. (2013). Diseño e implementación de un sistema para digitalización de objetos en 3D mediante el uso de Matlab. Sangolquí: ESPE.
- Autodesk. (2016). *About Face Normals and Removing Hidden Surfaces*. Obtenido de <http://help.autodesk.com/view/ACD/2016/ENU/?guid=GUID-8F60862A-C1E3-4216-B947-18FA1D014D80>
- Bedford, A., & Fowler, W. (1995). *Dinámica Mecánica para Ingeniería*. Massachusetts EEUU: Addison-Wesley Iberoamerica.
- Bernrdini, F., Mittleman, J., Rushmeir, H., Silva, C., & Taubin, G. (s.f.). The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. IBM Research.
- Clouds, o. P. (s.f.). *Estimating Surface Normals in a PointCloud*. (Point Clouds Org) Recuperado el 24 de 02 de 2017, de http://pointclouds.org/documentation/tutorials/normal_estimation.php
- Craig, J. J. (2006). *Robótica-Matriz de rotación* (3era ed.). PEARSON.
- EDMANS, G. d. (2006). Técnicas y Algoritmos básicos de visión artificial. Universidad de la Rioja.
- ElectronicaStore.Net. (s.f.). *LCD 16x2 HD4478 Display con Luz de fondo Azul*. Recuperado el 22 de 11 de 2016, de <http://electronicastore.net/producto/lcd-16x2-hd4478-display-con-luz-de-fondo-azul/>

- Emaralb. (2011). Escáner de luz estructurada.
- Fleishman, S., Cohen-Or, D., & Silva, C. T. (s.f.). *Robust Moving Least-squares Fitting with Sharp Features*. Recuperado el 24 de 02 de 2017, de <http://www.sci.utah.edu/~shachar/Publications/rmls.pdf>
- Fuchs, P. +. (2017). *PRT: El Método de Medición de Gran Precisión*. Obtenido de www.pepperl-fuchs.es/spain/es/10090.htm
- Guennebaud, G., & Gross, M. (2007). Algebraic point set surfaces. San Diego, California: SIGGRAPH 07.
- HIDALGO, M. Á. (2015). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER DIGITAL 3D A PARTIR DE UN SISTEMA DE VISIÓN ESTEREOSCÓPICO. Latacunga: ESPE.
- José Francisco Vélez, A. B. (2003). Visión por Computador.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). Poisson Surface Reconstruction. Redmond WA, USA: Microsoft Research.
- Leica, g. (2017). *Leica ScanStation C10*. Obtenido de http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-ScanStation-C10_79411.htm
- Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. New York: General Electric Company.
- Luebke, D. (2002). *Scanning Monticello*. Obtenido de University of Virginia Computer Science Department: <http://www.cs.virginia.edu/Monticello/>
- Marc Levoy, J. S. (2000). *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*. (Cyberware) Recuperado el 02 de 03 de 2016, de <http://graphics.stanford.edu/papers/dmich-sig00/>
- Matplotlib. (2017). Obtenido de <http://matplotlib.org/>
- MicroScribe. (2016). *MicroScribe 3D G2X Portable CMM*. Obtenido de <http://www.3d-microscribe.com/G2%20Page.htm>

- Minolta, K. (s.f.). *Vivid 910 3D Laser Scanner*. Obtenido de http://www.qubic.com.au/minolta_910.htm
- Montero, I. B. (2016). *Equipos Microinformáticos*. Madrid, ESPAÑA: Ediciones Paraninfo SA, 2da Edición.
- Nalwa, V. (1993). *A Guided Tour to Computer Vision*. Addison-Wesley.
- NumPy. (2006). Obtenido de <http://www.numpy.org/>
- OpenCV. (2017). *OPENCV (Open Source Computer Vision)*. Obtenido de <http://opencv.org/>
- Optimet. (s.f.). *Holografía Conoscópica*. Obtenido de DSI PLUS: <http://www.dsipius.es/web/optimet.asp>
- Pescanova. (1999). Ejemplo de luz estructurada.
- Pololu, C. (s.f.). *A4988 Stepper motor driver carrier*. Recuperado el 22 de 11 de 2016, de <https://www.pololu.com/product/1182>
- PyQT. (2016). Obtenido de <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>
- Ridel, B., Guennebaud, G., Reuter, P., & Granier, X. (2015). Parabolic-cylindrical moving least squares surfaces. *Computers and Graphics (ISSN : 0097-8493)*.
- Senplades. (2016). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017*. Recuperado el 12 de 02 de 2016, de <http://documentos.senplades.gob.ec/Plan%20Nacional%20Buen%20Vivir%202013-2017.pdf>
- Serrano, J. F., Díaz, A. B., Calle, Á. S., & Sánchez-Marín, J. L. (2003). *Visión por computador*.
- Song Zhan, P. H. (2006). High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement.
- Teutsch, C. (2007). *Model-based Analysis and Evaluation of point sets from 3D laser Scanners*. Magdeburger Schriften zur: Shaker Verlag.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (5ta Edición ed.). México D.F.: McGraw Hill.

Wiora, G. (10 de 04 de 2006). Principio de un sensor de triangulación láser.

ANEXOS

ANEXO A
MANUAL DE USUARIO

ANEXO B

DATOS TÉCNICOS – PROTOTIPO ESCÁNER 3D DE BAJO COSTO

ANEXO C
PLANOS MECANICOS

ANEXO D
HOJAS DE PROCESO